

Türkiye'nin Enerji, Su ve İklim Değişikliği Sorunları İçin Kesin Çözüm: Hidrojen Yakıtı



İ. ENGİN TÜRE

Prof.Dr.

1969 yılında Ankara Üniversitesi Fizik Yüksek Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Türkiye Atom Enerjisinde 1977 senesine kadar uzman araştırmacı olarak çalıştı. 1980-1984 yılları arasında İngiltere'de Durham Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışırken doktorasını tamamladı ve aynı üniversitede bir yıl, daha sonra Londra'da General Electric şirketinde dört yıl ve Manchester UMIST'de bir buçuk yıl çalıştı. 1990 senesinde yurda döndükten sonra aynı yıl doçentlik unvanını aldı ve Gaziantep Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümünde iki yıl öğretim üyeliği ve Bölüm Başkanlığı yaptı. 1992 yılında TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi'nde Enerji Sistemleri Bölümü (Enstitüsü) Başkanlığına getirilen Türe, burada kurucu olarak beş yıl görev yaptı. TÜBİTAK-MAM Yılın Personeli ve Proje Başarı Ödülleri aldı. 1998 yılında profesör olarak atandığı Mimar Sinan Üniversitesi'nde Fizik Bölümü Başkanı olarak görev yaparken Yeditepe ve Haliç üniversitelerinde de dersler verdi. 2005 yılında Birleşmiş Milletler Uluslararası Hidrojen Teknolojileri Merkezinde önce başkan yardımcısı daha sonra 2008 yılına kadar başkanlık yaptı. 2008 yılında Haliç Üniversitesi Rektörlüğüne atanan Prof. Dr. Türe 2010 yılına kadar bu görevi sürdürdü. Aynı yıl Arentek Enerji ve Teknoloji şirketini kurdu ve birçok şirkete danışmanlık yaptı. 2017 yılından beri MEF Üniversitesi öğretim üyeliği görevini sürdüren Prof. Türe, Temiz Enerji Vakfı kurucusu ve eski başkanı olarak da çalışmalar yapmaktadır. Prof. Türe'nin çoğunluğu uluslararası dergilerde olmak üzere 50'dan fazla yayını bulunmakta olup, bu yayınlarına 600 kadar atıf yapılmıştır. Prof. Türe bugüne kadar aralarında, Japonya, Çin, ABD, İngiltere, Fransa, İtalya, Norveç gibi ülkelerin de bulunduğu 30 kadar ülkede davetli konuşmacı olarak 40'dan fazla konferans vermiş ve birçok uluslararası toplantılara başkanlık yapmıştır.

E-posta: enginture@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6570-1882>**Geliş Tarihi:** 29.12.2021**Kabul Tarihi:** 25.04.2022

Atf: Türe, İ. E. (2022). Türkiye'nin enerji, su ve iklim değişikliği sorunları için kesin çözüm: Hidrojen yakıtı. *Kuşak ve Yol Girişimi Dergisi (BRIQ)*, 3(3), 22-49.



ÖZ

Bugüne kadar Ay'a Seyahat, Deniz Altında 20 Bin Fersah, 80 Günde Devriâlem kitaplarındaki birçok öngörüsü gerçekleşen Jules Verne'nin bu öngörüsü belki de diğerlerine göre çok daha gerçekçidir. Hidrojen yakıtı zaten birçok yerde kullanılmaya başlamıştır. İnanılması güç ama 1960 yıllarında hidrojen yakıtı ile çalışan traktör, golf arabası, hatta Volkswagen minibüs bile üretilip kullanılmıştır. Bu senelerde petrolün çok ucuz oluşu ve alt yapının hızlı bir şekilde hazırlanması ile hidrojene olan ilgi azalmış ve maalesef bu teknoloji geri plana itilmiştir. Bugünlerde artan petrol fiyatları, küresel ısınma ve dolayısıyla iklim değişikliği nedeniyle temiz enerjiler ve hidrojen tekrar gündeme gelmiştir. Güneş, rüzgâr gibi temiz ve tükenmez enerjilerin en büyük dezavantajı kesikli, güvenilir olmaması yanında yakıt olarak kullanılmasının mümkün olmadığıdır. Burada enerjinin büyük miktarda depolanabilmesini sağlayan hidrojen devreye girmektedir. Bilindiği gibi günümüzde enerjinin en büyük problemi büyük miktarda depolanamamasıdır. Burada hidrojen üretim kaynak ve yöntemleri arasında Karadeniz'deki büyük miktarda mevcut Hidrojen sülfür de eklenmiştir. Hidrojenin güvenliği ve depolanması için yine ülkemizin sahip olduğu Bor rezervinden faydalanma konusu işlenmiştir. Makale başlığında belirtildiği üzere enerji, su ve iklim değişikliği için kesin çözümün yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak özellikle sonsuz sayılabilecek potansiyele sahip deniz suyunun elektroliz ile gerçekleştirilebileceği anlatılmıştır. Bu makalede hidrojen enerjisinin özellikleri yanında, üretim teknolojileri, maliyetleri, güvenilirliği, ile deniz suyundan hidrojen üretiminin ülkemizle birlikte dünyanın enerji, su kıtlığı ve iklim değişikliği sorunlarına nihai çözüm olabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: deniz suyu, enerji, hidrojen-sülfür, hidrojen yakıtı, sodyum bor-hidrür

İnanıyorum ki suyu oluşturan hidrojen ve oksijen, birlikte ya da ayrı ayrı kullanıldığında taş kömüründen daha kuvvetli bir ısı ve ışık kaynağı oluşturacak ve tükenmez bir kaynak olarak sonsuza kadar enerji sağlayacaktır.

1874, Jules Verne "Gizemli Ada"

Giriş

BİLİNDİĞİ ÜZERE 19. YÜZYIL ORTALARINDA başlayan Endüstri Devriminden bu yana, önce kömür daha sonra petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıt olarak anılan yer altı kaynakları, yoğun bir şekilde enerji sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Sanayileşme ile enerji kullanımının artışı, ülkelerin yaşam standartlarını yükseltirken, fosil yakıt tüketimi de buna bağlı olarak hızlanmıştır. İnsanoğlu maalesef bu aşırı tüketimin, çevre kirliliğinin yanı sıra, küresel iklim değişikliği gibi

son derece vahim sonuçları olabileceğini ancak son yıllarda fark edebilmiştir. Fosil yakıt şirketleri ise kendi çıkarları uğruna, iyi kazanç getiren bu sektörde başka alternatifleri sürekli küçümsemiş ve güçlerini kullanarak bunların karar vericiler nezdinde dışlanmasını sağlamışlardır (Türe, 2021: par.3).

Çevre dostu olarak bilinen güneş, rüzgâr, küçük akarsu gibi alternatif enerjilerin fosil yakıtlara görece daha pahalı olmasının yanı sıra toplum tarafından yeterince kabul edilemiyor olmasının bir

başka nedeni ise; bu kaynakların sürekli olmaması ve yakıt olarak kullanılmamasıdır.

Bilindiği üzere, kömür, petrol, doğalgaz gibi yakıtlar kullanıldığında, çevreye çeşitli gazlarla birlikte bazı toz parçacıkları atılmaktadır. Atılan bu gaz karışımı ve parçacıklar arasında, karbon oksitler, kükürt oksitler, hidrokarbonlar, polinükleer aromatik hidrokarbonlar (PAH), olefinler, aldehitler ve bazı diğer kirleticiler bulunmaktadır.

Hidrojen, kullanılan yakıtlara göre birçok avantaja sahiptir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılacağı bir yakıt hücresinde, enerji yüksek verimle elde edilirken, atık olarak sadece saf su çıkmaktadır.

Hava kirliliğinin çevre üzerindeki etkileri, global, bölgesel ve yerel ölçekte meydana gelmektedir. Global ölçekte, başta karbondioksit olmak üzere, sera gazlarının yol açtığı küresel ısınma ve bunun sonucu olarak kasırgaların şiddetini arttırması, aşırı kuraklık veya sel gibi iklim değişikliklerini saymak mümkündür. Bölgesel ölçekte, asit yağmurları, ormanların tahribi, göllerin asitlik derecesinin artması sonucunda, ekolojik dengenin bozulması en önemli belirtilerdir. Yerel ölçekte ise, CO, SO₂, NO_x, O₃ gibi hava kirleticileri, insan sağlığı, bitkiler, yapı ve malzemeler üzerinde olumsuz etkiler meydana getirmektedirler. Şu anda, dünyada fosil yakıtların çevreye verdiği toplam zarar yılda 8 trilyon doları bulmaktadır (Greenpeace, 2020).

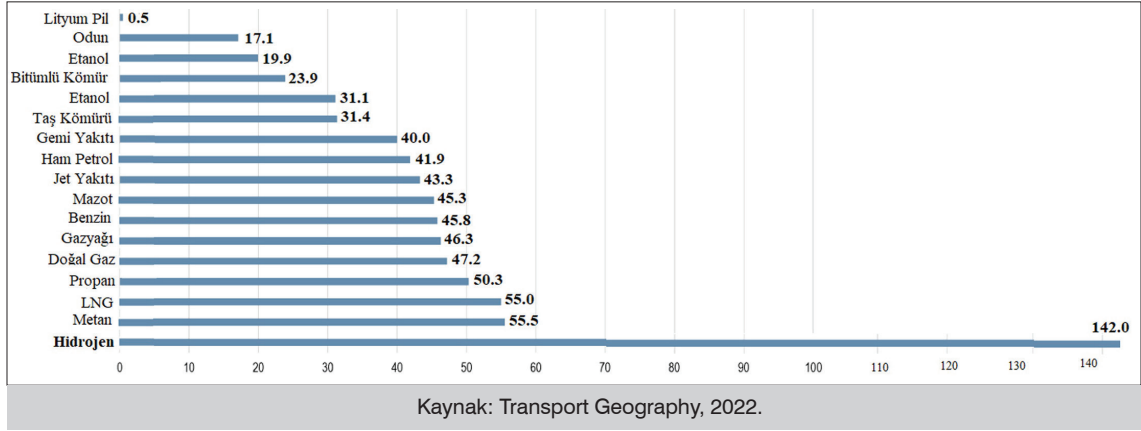
Hidrojen ise halen kullanılan yakıtlara göre birçok avantaja sahiptir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılacağı bir yakıt hücresinde, enerji yüksek verimle elde edilirken, atık olarak sadece saf su

çıkmaktadır. Hidrojen kaynağı olarak suyun kullanılması hidrojenin en önemli avantajlarından biridir. Halen hidrojen teknolojilerinin çözüm bekleyen en önemli problemlerinin başında, ekonomik olarak depolanma ve taşınmamasıdır. Ancak son yıllardaki çalışmalar bu problemlerin kısa sürede aşılacağını göstermektedir. Hidrojen teknolojisi, kullanım alanının sürekli gelişmesi ve enerji verimini arttıracak yöntemlerin ilavesiyle giderek önem kazanmaktadır.

Yapılan maliyet hesaplarına göre hidrojen teknolojisi sistemlerini kullanmak, mevcut fosil yakıt sistemlerinden daha pahalı olmakla birlikte yakın gelecekte artan petrol ve doğalgaz fiyatları ile bu konudaki eşitlik gelecek on yıl içinde sağlanacaktır. Fosil yakıtların sosyal maliyet olarak sınıflandırılan; küresel iklim değişikliği, hava kirliliği, petrol saçılmaları, maden kazaları vb. unsurların dünyaya verdiği bu zarar fosil yakıt fiyatları üzerine konulduğunda, maliyet açısından hidrojen çok daha avantajlı konuma gelmektedir.

Yukarıda da belirtildiği üzere fosil yakıtların sınırlı olması ve dünyamızı bekleyen çevre felaketleri nedeniyle bu durumun böyle devam etmesi zaten mümkün değildir. İnsanların sahip oldukları konfor ve yaşam standardından feragat etmeleri de mümkün olmayacağına göre, fosil yakıtlar yerine yeni bir sentetik yakıt bulunması gereği doğmuştur. Bu yakıt, temiz, çevre dostu, yenilenebilir, sonsuz, her yerde kullanılabilir, kolayca taşınabilir, ekonomik, yüksek kalori değeri ve verime sahip olmalıdır. Uzun yıllar yapılan çalışmalar ideal yakıtın kesinlikle hidrojen olduğunu ortaya koymuştur. Hidrojen çevre problemlerine tek çözüm olarak gösterilmekte ve ülkeleri fosil yakıtlardan kurtarabilecek “bağımsızlık yakıtı” olarak da adlandırılmaktadır. Hidrojen enerjisinin dünya gündemine oturması,

Şekil 1. Hidrojenin Çeşitli Yakıtlarla Göre Enerji İçeriği (MJ/kg)



1973'te enerji krizinin patlak vermesiyle bilim çevrelerinin bu soruna çözüm aramaları vasıtasıyla olmuştur.

Normal sıcaklık ve basınç altında kokusuz ve renksiz olan bu gaz oksijenle birleştiğinde hayat için en önemli madde, yani su elde edilmektedir. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğalgazın 1/9'u kadardır. Atmosfer basıncında -253°C 'ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10'u kadardır. Hidrojen en verimli yakıttır. Ortalama olarak, fosil yakıtlardan %26 daha verimlidir. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. Şekil 1 de hidrojenin diğer yakıtlara göre enerji içeriği verilmiştir. 1 kg hidrojen 2.1 kg doğalgaz veya 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir (Türe, 2021: par.6).

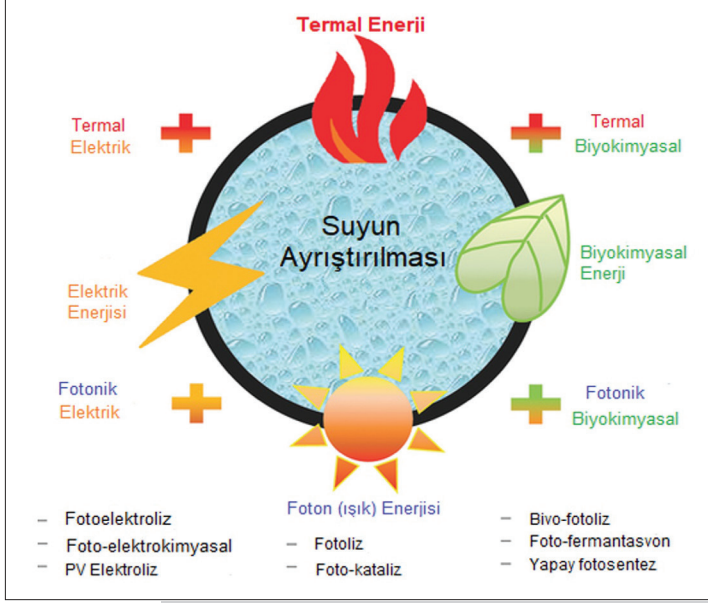
Sıvı hidrojenin ısı değeri 120,7 MJ/kg iken uçak benzinin ısı değeri kg başına yalnız 44 Mega Joule olduğu göz önüne alındığında, sıvı hidrojenin roket yakıtı olarak kullanılmasını kolaylıkla anlamak mümkündür. Ancak birim hacim başına ısı değeri düşüktür. Hidrojen gazının ısı değeri, metre küp başına yaklaşık 12 Mega Joule olarak verilmiştir (Türe, 2021: par.7).

Hidrojen en temiz enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin yüksek verimi ve fosil yakıtların çevreye verdiği zarar göz önüne alındığında, hidrojen en uygun maliyetli yakıttır. Küresel iklim değişikliğine neden olan sera gazları üretmez, asit yağmurlarına neden olmaz ve ozon tabakasına zarar veren kimyasallar üretmez (Türe, 2021: par 8).

Hidrojen aynı elektrik gibi ikincil bir enerji, yani taşıyıcı olup, birincil enerji kaynaklarından üretilmesi gerekmektedir. Bu üretimin temiz enerji kaynakları ile sudan elde edilmesi ise hem sonsuz bir enerji, hem de dünyanın küresel ısınma başta olmak üzere tüm çevre problemlerinden kurtulması anlamına gelmektedir. Örneğin güneş enerjisi ile suyun hidrojen ve oksijene ayrılması, elde edilen hidrojenin istenilen yere boru hatları veya depolanmış olarak taşınması ve daha sonra yine oksijenle birleşerek yakılması sonucunda elde edilen enerjinin atık maddesi yine birkaç damla saf su veya su buharı olmaktadır (Türe, 2021: par 9).

Hidrojen yalnız bu yüzyılın değil, güneşin ömrü olarak tahmin edilen gelecek 5 milyar yılın da yakıtı olarak kabul edilmektedir (Türe, 2021: par 10). İnsanın ilk günlerinden başlayarak günümüze kadar geçen sürede kullandığı yakıtlar göz önüne alındığında, bu yakıtlar içinde hidrojen

Şekil 2. Sudan Hidrojen Eldesi için Kullanılan Çeşitli Yöntemler



Kaynak: Online Library, 2017.

oranının giderek arttığı açıkça görülmektedir (Türe, 2001). Bundan sonraki devrede bu yakıtın artık tamamen hidrojen olacağı kesindir.

Hidrojen Üretim Metotları ve Maliyetleri

Hidrojen, değişik ana enerji kaynaklarının kullanılmasına bağlı olarak sudan çeşitli metotlarla elde edilebilir. Bunlar arasında, elektrolitik, termal, termo-kimyasal, elektro-termokimyasal, fotolitik ve karma metotlar bulunmaktadır. Suyun ayrıştırılması ile hidrojen üretimi için günümüzde kullanılan yöntemler Şekil 2’de özetlenmiştir.

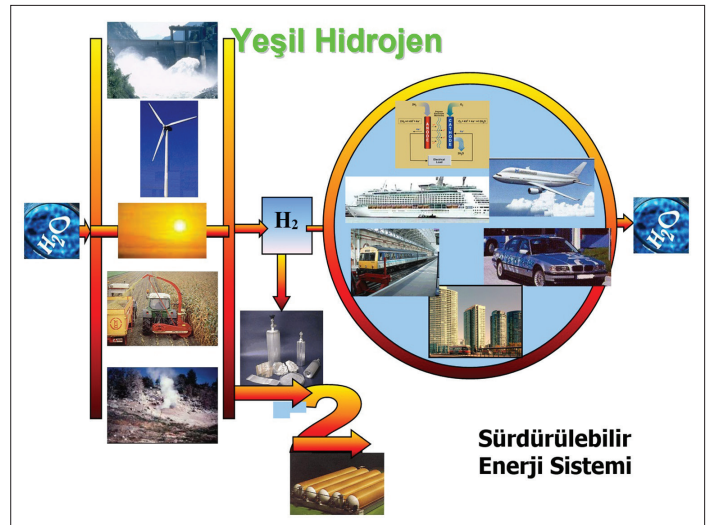
Günümüzde hidrojen üretiminde en sık kullanılan yöntem doğalgazdan reforming yöntemi ile yüksek saflıkta hidrojen eldesidir. Bu yöntemle üretilen hidrojenin maliyeti kg başına ortalama 2 ABD dolarıdır. Ancak, hidrojenin kömür gibi fosil yakıtlardan elde

edilmesi sonucu karbondioksit gazları da açığa çıkmaktadır. CO₂’in toprağın altına gömülerek saklanması teknolojisinin maliyeti de dikkate alındığında, fosil yakıtlardan hidrojen eldesi daha da pahalı hale gelmektedir. Hidrojen, fosil yakıt kaynaklarından elde edildiğinde, kaynağın temiz olmadığını belirtmek için buna “mavi hidrojen” denilmektedir (United States Department of Energy, 2020).

Günümüzde üretilen hidrojenin neredeyse %95’i tamamen ticari hale gelen ve çok iyi bilinen bu teknolojiler ile üretilmekte olduğundan, burada daha ziyade yeni teknolojilere yer verilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak suyun elektrolizi ile elde edilen hidrojen ise “yeşil hidrojen” olarak anılmaktadır (Şekil 3). Bu yöntem ile maliyet yaklaşık olarak kilogram hidrojen başına 3-7 ABD dolarıdır.

Tablo 1’de görüleceği gibi hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından ve nükleer enerjiden üretim maliyeti, fosil yakıtlara göre halen daha yüksek olmakla beraber,

Şekil 3. Yeşil Hidrojen Döngüsü



Kaynak: Online Library, 2017.

Tablo 1. Dünya'da Çeşitli Kaynaklardan Üretilen Hidrojen İçin Maliyetler

Hidrojen Üretim Kaynağı	Hidrojen Maliyeti \$/kg
Doğal gaz	0.9-3.2
Doğal gaz CO ₂ depolaması ile	1.5-2.9
Kömür	1.2-2.2
Yenilenebilir enerjiler ile suyun elektrolizi	3-7.5

Kaynak: Statista, 2020.

teknolojinin gelişimine bağlı olarak bu maliyetin düşeceği açıktır. Ayrıca, daha önce sözü edilen sosyal maliyetler fosil yakıtlara eklendiğinde yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen yine daha ucuz olmaktadır. Burada rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilecek elektrik enerjisi kullanımı esas alındığından, hidrojenin sudan alkali veya PEM elektrolizörler kullanılarak eldesi söz konusudur. Bu nedenle hidrojen maliyetleri bu teknolojilere göre karşılaştırmalı ve tahmini olarak verilmiştir. Bilindiği üzere, doğalgaz ve elektrik fiyatları ülkeden ülkeye olduğu gibi seneler içinde de değişim göstermektedir. Ayrıca üretim için kullanılan cihazların maliyetleri, üretilen hidrojen miktarı gibi faktörler de elde edilen ürünün maliyetinde önemli rol oynamakta olup, hidrojenin kg fiyatı için kesin bir rakam yerine ancak belli bir aralık içinde fiyat tahmini olarak Tablo 1'de verilmiştir.

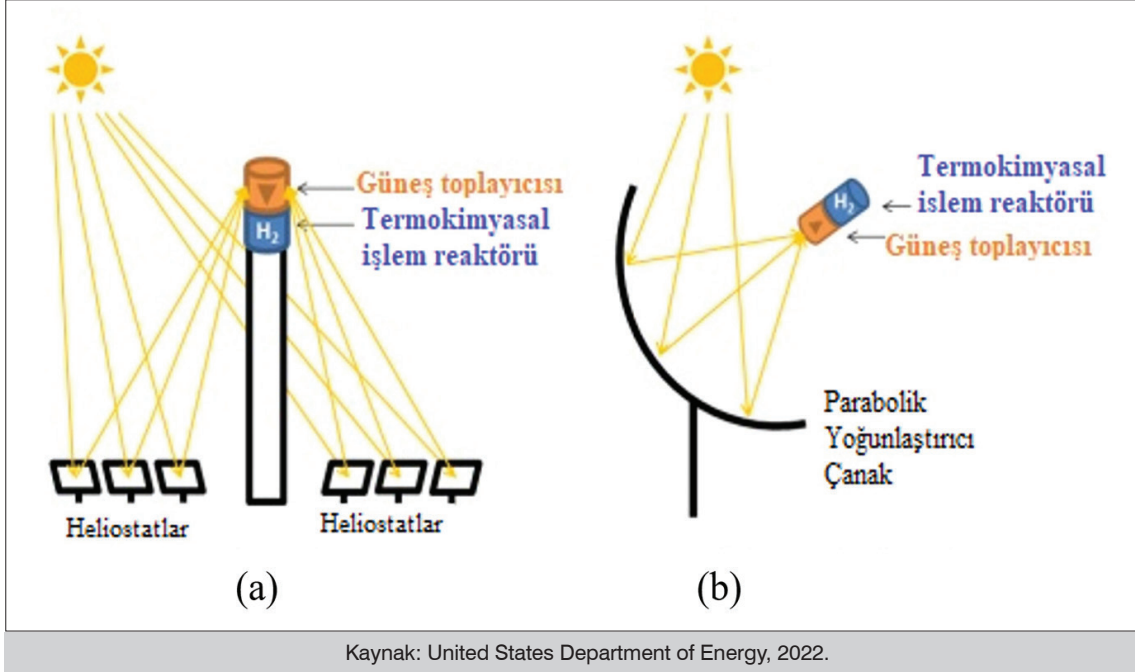
Güneş, Rüzgâr, Hidrolik ve Jeotermal Enerjilerden Hidrojen Üretimi

Tüm yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik yardımıyla suyun elektroliz edilmesi, hidrojen elde edilmesi için temel yöntemdir. Örneğin rüzgar enerjisi de yakıt olarak kullanılacak hidrojenin üretimi için

değerlendirilen önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Verimleri her gün daha yüksek seviyelere çıkan rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjini elektrik enerjisine çevirmektedir. Böylelikle üretilen elektrik enerjisi de yine suyun elektroliz yöntemi ile ayrıştırılmasında kullanılmakta ve böylelikle hidrojen elde edilebilmektedir. Elektroliz yöntemleri arasında bazı farklılıklar bulunmakta olup, bunlar aşağıda verilmiştir. Suyun elektrolizi için alkali elektroliz, polimer elektrolit membran (PEM) ve katı oksit elektroliz hücreleri (SOEC'ler) dahil olmak üzere üç ana elektrolitik hücre türü vardır.

Günümüzde yıllık hidrojen üretimi, tüketiminin yılda yaklaşık %6 artmasıyla yaklaşık 80 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Bilindiği üzere hidrojen büyük oranda sera gazı emisyonlarına yol açan bir süreç olan doğalgazın buharla reforme edilmesiyle üretilmektedir (Greenpeace, 2020: The Geography of Transport Systems, 2022). Küresel hidrojen talebinin %50'ye yakını şu anda doğalgazın buharla reformasyonu yoluyla, yaklaşık %30'u rafineri/kimyasal endüstriyel atık gazlardan kaynaklanan petrol/nafta reformundan, %18'i kömür gazlaştırmasından, %3.9'u su elektrolizinden ve %0.1 diğer kaynaklardan karşılanmaktadır.

Şekil 4. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi İle Termokimyasal Hidrojen Üretimi
a) Merkezi Güneş Toplayıcı, Kule ve Heliostatlar b) Modüler Çanak ve Güneş toplayıcı



Doğrudan Ayırıştırma Yöntemleri

Yüksek Sıcaklıkta Suyun Ayırıştırılması (Termoliz)

İki bin beş yüz santigrat dereceden daha fazla sıcaklık uygulandığında suyun hidrojen ve oksijene kimyasal olarak ayrışması işlemidir. Reaksiyon tersinir olduğundan, hidrojen ve oksijenin tekrar suya dönüşmesini önlemek için etkin bir şekilde ayrılması gerekir. Bu yöntemde konsantr güneş enerjisi veya nükleer güç reaksiyonlarının atık ısı kaynak olarak kullanılabilir. Bu, yöntemle kullanılan ısı kaynağına bağlı olarak çok az veya hemen hemen hiç sera gazı atmosfere salınmaz.

Termokimyasal metotla suyun elektroliz işlemi sırasında, suyu parçalamak için (500-2,000)°C sıcaklıkta bir dizi kimyasal reaksiyon

için (500–2,000)°C sıcaklık gerekir. Proseste kullanılan kimyasallar her döngüde yeniden kullanılarak yalnızca su tüketen, hidrojen ve oksijen üreten kapalı bir çevrim oluşturulur. İşlemler için gerekli yüksek sıcaklıklar çevre dostu yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile sağlanır (Şekil 4; United States Department of Energy).

Termoliz işlemi için gerekli yüksek sıcaklığı azaltmak için örneğin 1,200-1,500°C'lere indirmek için ara maddeler (katalizörler) kullanılır.

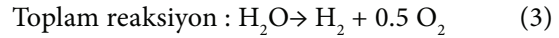
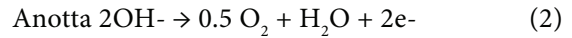
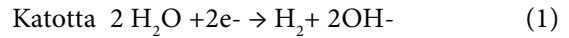
Elektroliz (Alkali)

Suyun elektrolizi veya suyun oksijen ve hidrojen ayrıştırılması 1890'lardan beri bilinen ve ticari olarak kullanılan bir yöntemdir. Elektroliz, basit olarak su içine iletkenliği arttıran KOH veya NaOH gibi bir madde katılarak ve bu sıvının içinden doğru akım geçirerek su mole-

külünde bulunan kimyasal bağların kırılmasını sağlayan bir işlemdir. Aynı zamanda, elektrolitik sıvı içine batırılmış metal elektrotlar aracılığı ile dışarıdan elektrik akımı uygulayarak, bir sıvı içinde çözülmüş kimyasal bileşiklerin ayrıştırılması olarak da tanımlanır.

Elektroliz Hidrojenin saf olarak elde edilmesi için kullanılan en önemli metottur. Elektroliz hücresinde elektrotlar kullanılan elektrolitik sıvıya göre değişik metallere seçilebilmektedir. Bu hücre, çözünerek artı ve eksi yüklü iyonlara ayrılmış bir bileşiğin içine daldırılmış iki elektrottan oluşur ve bu elektrotlar birbirine değmeyecek biçimde (genellikle iki elektrot arası 5-20 cm) ayarlanır. Örneğin Alkali elektroliz hücrelerinde nikel tabanlı, nikel-alüminyum alaşım gibi elektrotlar tercih edilmektedir.

Su içine iletkenliği arttırıcı sülfürik asit konulduğunda ise elektrot olarak asitten etkilenmeyen platin kullanılması gerekir. Platin yüksek verim veren elektrot olmakla beraber maliyet yönünden tercih edilmemektedir. Elektrotlar arasına dışarıdan en az 1.23 Volt gerilim uygulandığında katottan %99.9 saflıkta hidrojen, anottan ise oksijen gazı çıkar. KOH veya NaOH karıştırılmış elektrolitik hücre durumunda reaksiyon sırasıyla;

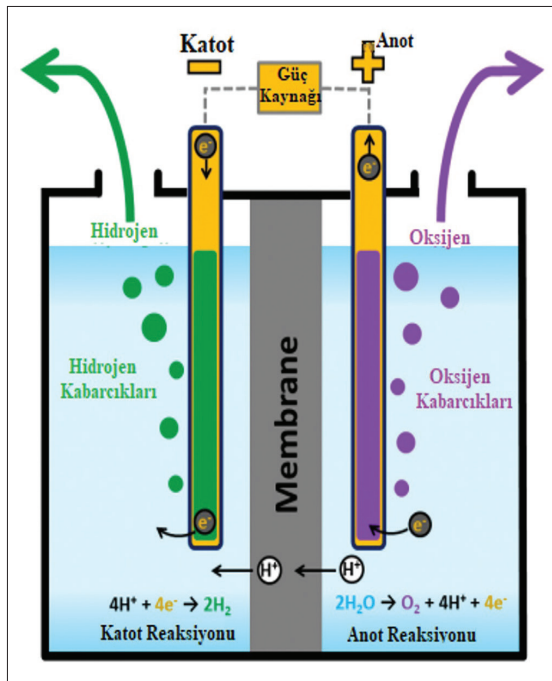


olarak meydana gelir. Alkali bir elektrolizör şeması aşağıda gösterilmiştir.

Proton Geçirgenli Membran Elektrolizör (PEM)

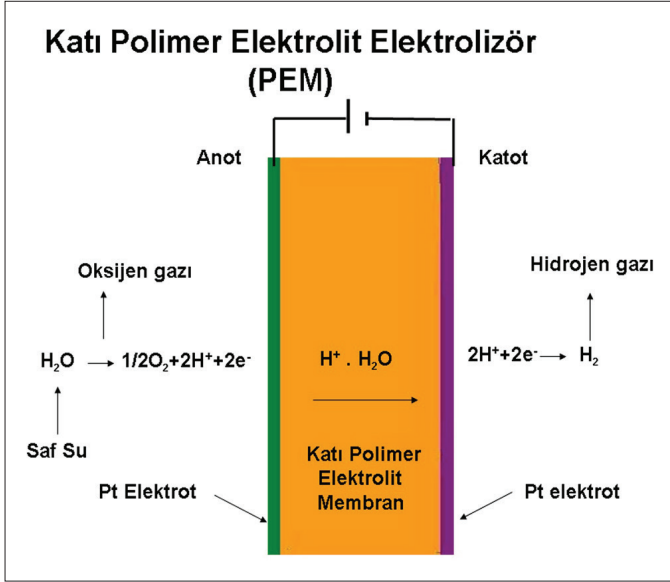
Proton Geçirgenli Membran veya Polimer Elektrolit Membran Elektrolizör (Proton Exchange Membrane-PEM): Bu tip elektrolizörler elektrokimyasal olarak 2000 psi veya daha yüksek basınçlarda ve %85 veya üzeri verimle hidrojen üretmek için tasarlanmıştır. Böylece daha sonra hidrojenin sıkıştırılması için kompresör kullanmaya da gerek kalmaz. PEM elektrolizör sıvı elektrolit yerine genellikle polimer tabanlı katı bir membran kullanır. Bu tip elektrolizörlerin bir diğer avantajı da parasitik kayıpların az olması yanında yüksek saflıkta hidrojen üretebilmesidir. PEM elektrolizörler basit yapıları ve hidrojen üretimi yanında, gazı basınçla depolayabilmeleri nedeniyle son yıllarda üzerinde en çok çalışılan konuların başında gelmektedir. Günümüzde "Regenerative Fuel Cell" olarak tanımlanan yakıt pilleri tersi-

Şekil 5. Alkali Elektroliz Hücresi



Kaynak: Nelly Hydrogen, 2022.

Şekil 6. PEM Elektrolizör



Kaynak: Kumar & Himabindu, 2021.

ne çalışarak elektrolizör görevi yaptığı gibi, yakıt hücresi olarak da hidrojenden elektrik üretilebilmekte ve atık olarak yine saf su çıkmaktadır. PEM elektrolizörü/yakıt pili şeması Şekil 6'da verilmiştir.

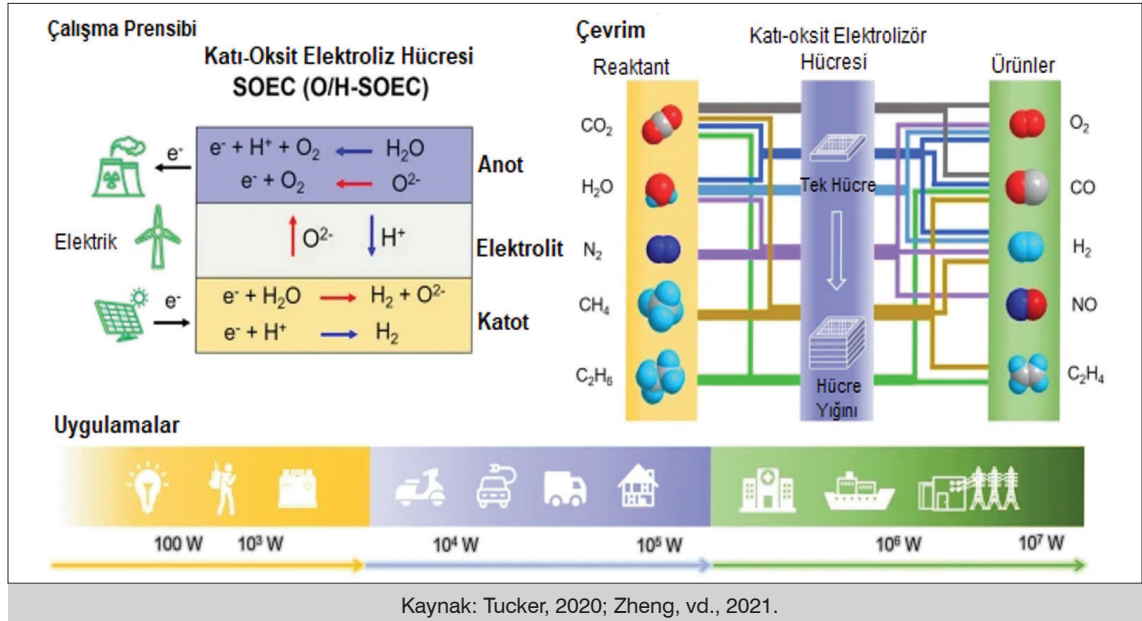
Katı-oksit Elektrolizör (Solid Oxide Electrolysis Cell- SOEC)

Katı-oksit elektrolizörler genelde (700-1000)°C gibi yüksek sıcaklıklarda negatif yüklü oksijen iyonlarını (O_2^-)- seçici olarak uygulayan elektrolit olarak ise katı bir seramik malzeme kullanan elektroliz hücrelerdir. Sistemde öncelikle dış devreden gelen elektronlar, hidrojen gazı ve negatif yüklü (O_2^-)- iyonları oluşturmak için katotta su ile birleşir. Daha sonra, oksijen iyonları seramik membrandan geçerek anotta reaksiyona girerek oksijen gazı meydana getirir ve dış devreye elektron sağlar. İşlem yüksek sıcaklık buhar elektrolizörü olarak da tarif edilebilir. Katı-oksit elektrolizörler Proton geçirgenli membran (PEM) elektrolizörlerden çok daha yüksek verime sahiptir (Tucker, 2020; Zheng, vd., 2021).

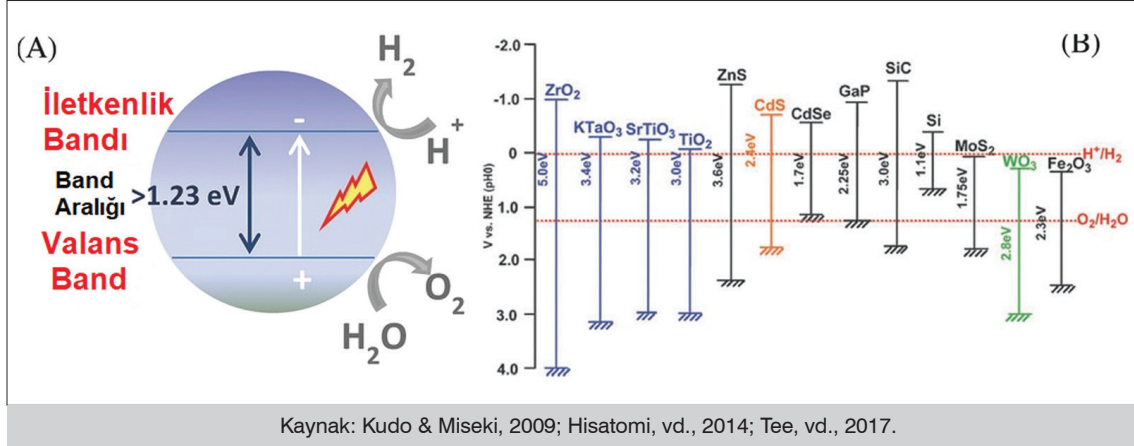
Fotonik Enerji (Fotoliz)

Fotoliz, suyun fotonik enerji ile hidrojen ve oksijene kimyasal olarak ayrışmasını içerir. Su

Şekil 7. Katı-Oksit Elektroliz Hücresi



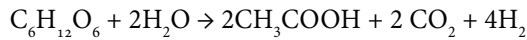
Şekil 8. Fotokatalitik Su Ayrıştırma: A) Yarıiletken Fotokatalist İle Su Ayrıştırma B) Yarıiletken Bant Yapısı ve Su Ayrıştırma Redoks Potansiyeli



ayırma işlemi için potansiyel 1.23 eV olduğundan, buna eşdeğer olan fotonların dalga boyu 1008 nm olup, kızılötesi ışığa karşılık gelir. Bu da suyun ayrışmasının teorik olarak kızılötesi ışıkla mümkün olduğunu göstermekle beraber endüstriyel olarak uygulaması mevcut değildir. Son zamanda yüksek frekans yerine daha düşük frekanslı radyasyon altında fotokatalitik yöntemle suyun ayrıştırılması üzerine daha yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Tee, vd., 2017; Waterhouse, vd., 2013).

Biyokimyasal Metot

Karbonhidratların çeşitli bakterilerin anaerobik (oksijensiz) ortamda fermente olmasıyla hidrojen eldesidir. Fermantasyon işlemi oksijen yokluğunda aşağıdaki reaksiyonla hidrojen üretebilir (Tokio, 1979).



Dolaylı (Çok Basamaklı) Yöntemler

Termo-elektroliz

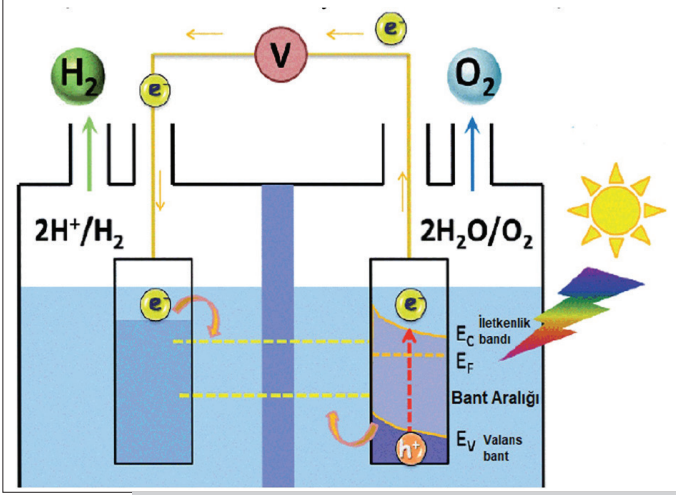
Suyun termo-elektrolizi, elektrik ve termal enerjinin birleşik kullanımı ile suyun kimyasal

olarak ayrışmasını içerir. Yüksek sıcaklıkta daha verimli ve ekonomiktir, çünkü gerekli enerjinin önemli bir kısmı daha ucuz termal enerji ile sağlanır ve bu, elektrik enerjisi talebini önemli ölçüde azaltır ve yüksek sıcaklıkta elektrolitik reaksiyon kinetiğini hızlandırır. Alkali elektroliz optimal olarak 200 °C'ye yakın yüksek sıcaklıkta çalışır ve endüstriyel ölçekte hidrojen üretimi için kullanılır. PEM elektrolizörleri tipik olarak 100 °C'nin altında çalışır (alkali elektrolizden daha verimlidir) ve ticari uygulama için giderek daha fazla kullanılabilir hale gelir. SOEC elektrolizörleri, elektriksel olarak en verimli ancak en az gelişmiş olanlardır. SOEC teknolojisi, hızlı malzeme bozulması ve sınırlı uzun vadeli kararlılıkla zorluklarla karşı karşıyadır (Chao, 2019; Baniasadi, 2012).

Biyofotoliz

Suyun biyofotolizi, doğrudan ve dolaylı yöntemle hidrojen üretimi için biyokimyasal ve fotonik enerjinin kombine kullanımı ile mikroorganizmalar (yani yeşil mikro algler ve siyanobakteriler) tarafından oksijenik fotosentez içerir. Doğrudan biyofotolizde, mikroorganizmalar güneş ışığını yakalayıp suyu hidrojen iyonu ve oksijene ayır-

Şekil 9. Foto-elektrokimyasal Elektroliz Hücresi Şeması

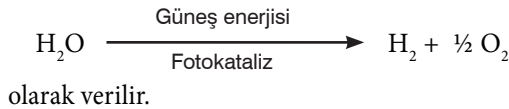


Kaynak: Fujishima & Honda, 1972; Nozik, 1978; Chen, 2010; Ruth vd., 2017.

dıklarında, üretilen hidrojen iyonları ayrıca hidrogenaz enzimi (yani $2\text{H}_2\text{O} + \text{güneş} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$) tarafından hidrojene dönüştürülür. Dolaylı biyofotolizde, güneş enerjisi mikroorganizmalar tarafından fotosentez yoluyla yakalanır ve daha sonra hidrojen üretmek için kullanılan bir tür karbohidratta $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{güneş} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ depolanır daha sonra $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{güneş} \rightarrow 12\text{H}_2 + 6\text{CO}_2$ reaksiyon sonucu hidrojen ve karbon dioksit ayrışır (Kamran & Fazal, 2021).

Foto-katalitik Su Ayırıştırma (Foto-kataliz)

Fotokatalitik yöntem basit olarak, foton enerjisi ile birlikte katalizör kullanılması yardımıyla hidrojen eldesidir. Örneğin güneş enerjisi ile fotokatalizör olarak TiO_2 kullanılması bu alanda en çok çalışılan konular arasındadır. Suyun foton enerjisi ile parçalanması için ışığı çeken fotokatalitik yarı iletken ihtiyacı vardır. Reaksiyon basit olarak;



Fotokatalizör olarak kullanılan yarıiletkenlerin özellikleri gelen foton enerjisi ile valans banttan elektronların iletkenlik bandına geçerek iletkenlik sağlamalarıdır. Yarıiletken fotokatalizör üzerine düşen ışınımın enerjisi, en az bu yarı iletkeninin valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki eV olarak verilen yasak aralık enerji değerine eşit olmalıdır. Fotokatalizör olarak en çok kullanılanlar TiO_2 , CdS, Fe_2O_3 ve SnO dur. Foto-katalitik yöntemde ışığın UV ve görünür bölgesinde bulunan foto-katalizörler, ışık absorpsiyonu ile iletkenlik bandında suyun hidrojene indirgenme reaksiyonu gerçekleştirerek hidrojen elde edilmesini sağlarlar (Kudo & Miseki, 2009; Hisatomi, vd., 2014).

Şimdiye kadar, rapor edilen foto-katalistlerin çoğu sadece ultraviyole ışık ışınımı altında aktiftir. Ancak, ultraviyole ışık (<400 nm) toplam güneş enerjisinin sadece %4'ünü oluştururken, görünür ışık (400-800 nm) ve kızılötesi ışık (>800 nm) toplam güneş enerjisinin sırasıyla %53 ve %43'ünü oluşturur.

Foto-Elektrokimyasal Ayırıştırma

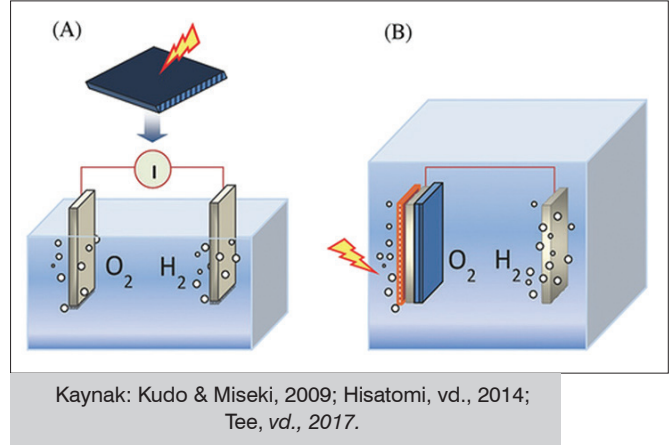
Foto-elektrokimyasal sistemler, güneş enerjisi kullanarak su moleküllerini ayırıştırır ve kimyasal tepkime sonucu olarak hidrojen elde edilir. Foto-elektrokimyasal yöntemlerin en büyük avantajı enerji kaynağı olarak güneş yanında sadece suya ihtiyaç duyması olup, gelecek için ciddi bir potansiyeli olmasıdır (Fujishima & Honda, 1972; Nozik, 1978; Chen, 2010). Foto-elektrokimyasal sistemler foto-anot, foto-katod ve elektrolit olmak üzere üç temel kısımdan oluşur (Şekil 9). Foto-anot, üzerlerine düşen güneş ışığı ile birlikte elektron-hole çiftleri olur ve foto anodun yüzeyine temas eden su molekülü oksitlenerek oksijen molekülü ve pozitif yüklü hidrojen molekülü ortaya çıkar.

Fotovoltaik Entegre Edilmiş Foto-Elektrokimyasal Su Ayrıştırma

Bilindiği gibi fotovoltaik hücreler güneş enerjisini doğrudan elektriğe çeviren elektronik araçlar olup, suyu ayrıştırarak hidrojen eldesi için elektrolizöre gerekli elektrik enerjisini sağlayabilir. Böyle bir sistem aşağıda Şekil 10'da verilmiştir. Kristal silisyum tabanlı bir fotovoltaik hücre %18 verimliliğe sahip olup, %80 verimliliğe sahip bir elektrolizör ile entegre edildiğinde, kombine güneş enerjisiyle çalışan elektrolizör sistemi \approx %14.19'lük verimle çalışır. Güneş pili ve elektrolizörün ayrı yapısı ile güneş pili elektrolite daldırılmayı gerektirmez ve bu nedenle korozyona neden olmaz. Fotovoltaik entegreli güneş enerjisiyle çalışan su ayrıştırma, doğrudan yenilenebilir güneş enerjisi kaynağını kullanır ve hidrojen üretimi sırasında sera gazı salmaz.

Günümüzde ticari olarak kullanılan Alkali, PEM ve Katı-oksit elektrolizörlerden hidrojen üretimi için halen ve gelecekte öngörülen maliyetler Tablo 2'de verilmiştir (Türe, 2005).

Şekil 10. Fotovoltaik Entegre Edilmiş Elektroliz ile Su Ayrıştırma Sistemi A) Fotovoltaik Sistem ve Dış Elektrolizör B) Fotovoltaik Entegre Elektroliz Hücresi



Hidrojen Sülfür den (H_2S) Hidrojen Üretimi

Uzun yıllardır yapılan çalışmalar Karadeniz'de çok büyük miktarda hidrojen sülfür olduğunu göstermekte olup, bu miktar her geçen yıl 2,73 x 106 metrik ton artmaktadır. Bunun nedeni Kuban, Don, Dinyeper, Dinyester ve Tuna olmak üzere beş büyük nehrin organik bileşiklerini hala Karadeniz'e akıtıyor olmasıdır. Aşırı

Tablo 2. Elektrolizör Maliyetleri

Elektrolizör Verimleri			Elektrolizör Ömürleri		
Tip	2020	2040	Tip	2020	2040
Alkali	%70	%80	Alkali	7,500 saat	125,000 saat
PEM	%60	%74	PEM	60,000 saat	100,000 saat
Katı oksit	%81	%90	Katı oksit	20,000 saat	85,000 saat

Yatırım Maliyetleri			Hidrojen Maliyetleri		
Tip	2020 \$	2040 \$	2020 \$/kg	2040 \$/kg	
Alkali	571	354	5.13	2.90	
PEM	385	239			
Katı oksit	677	420			

Kaynak: Türe, 2005.

Tablo3. Karadeniz'in Farklı Derinliklerdeki H₂S Konsantrasyonları

Derinlik (m)	Ortalama H ₂ S Yoğunluğu (g/m ³)				
	(Türe, 2004)	(Brewer, vd., 1974)	(Lein&Iva nov, 1990)	Weber, vd., 2001)	Hesaplanan
100		0.27	0.08	0.3	0.05
200			0.14		0.20
300			2.55		2.05
500					5.44
1000	5.27	10.3	8.0		9.18
1500	5.62	12.9		9.4	9.52
2000		13.6		12.2	11.56
2100					12.08
2200	8.9				12.75
2200-Dip				16.1	13.6

Kaynak: Türe, 2004; Brewer, vd., 1974; Lein & Ivanov, 1990; Weber, vd., 2001.

miktarda Organik madde, normalde onu aerobik olarak parçalayacak olan bakteriler için çok fazla olduğundan çözünmüş oksijen kaynağını tüketerek anaerobik bakterileri baskın hale getirmektedir. Bu organizmalar, deniz suyunun bir bileşeni olan sülfat iyonlarından oksijeni alarak işlemde artık gaz olarak H₂S oluştururlar. Karadeniz'deki H₂S konsantrasyonunun biri yüzeyden 700 m'ye ve diğeri 700 m'den dibe kadar iki farklı rejime uyduğu bulunmuştur (Türe, 2005; Dimitrov, P., & Dimitrov, D., 2004). Çeşitli kaynaklardan alınan veriler aşağıda Tablo 3'te verilmiştir.

Karadeniz'de şu anda mevcut olan H₂S rezervuarının 5.27 x 10⁹ metrik ton olduğu tahmin edilmektedir. Karadeniz'deki bu Yüksek miktardaki H₂S den hidrojenin ayrıştırılması hem ekonomiye katkı sağlayacak hem de ileride oluşacak çevre felaketlerini önleyecektir. Elde edilen sonuçlara göre hidrojen sülfürün elektrolizi ile elde edilen hidrojen, suyun elektrolizine göre 3 kat daha ekonomiktir (COSIA, 2017).

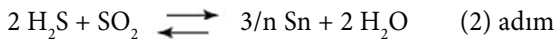
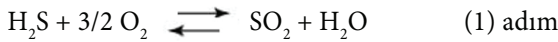
Hidrojen sülfür, H₂S, çürük yumurta kokulu kötü kokudan sorumlu renksiz, zehirli, yanıcı

bir gazdır. Hidrojen sülfür havadan ağır olduğu için yetersiz havalandırılan alanlarda yere yakın birikme eğilimindedir. Genellikle bakteriler, bataklıklar ve lağımalar gibi oksijenin yokluğunda organik maddeler parçaladığında ortaya çıkar. Volkanik gazlarda, doğalgazda ve bazı kuyu sularında da oluşur.

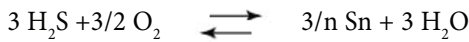
H₂S üreten bakterilerin insanın kalın bağırsağındaki faaliyetleri sonucu üretilen gaz içindeki koku büyük ölçüde eser miktarda H₂S gazından kaynaklanır. Ağızdaki bu tür bakteriyel hareket, ağız kokusuna katkıda bulunabilir. Toplam küresel H₂S emisyonlarının yaklaşık %10'u insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır (Rubright, vd., 2017). H₂S üretimi en çok petrol rafinerilerinde gerçekleşir, hidro-desülfürizasyon işlemi ile gerçekleşir ve hidrojenin etkisiyle petrolden sülfürü ayırır. Elde edilen H₂S, Claus işlemi yolu ve kısmi yanma ile elementel kükürde dönüştürülür. Hidrojen sülfür den hidrojen üretimi için de Clausmetodu kullanılır ancak burada metodun bazı adımları değiştirilmiştir. Genel olarak termal ve katalitik reaksiyonlar

olmak üzere iki basamaklı bir işlemdir.

(a): Termal Adım: H_2S hava ile kısmen oksitlenir. Bu, yüksek sıcaklıkta (1000-1400) °C bir reaksiyon fırınında yapılır. Kükürt oluşur, ancak bir miktar H_2S reaksiyona girmeden kalır ve bu reaksiyonlarda az miktarda SO_2 üretilir.



İşlem için genel reaksiyon



İşlem için genel reaksiyon

(b): Katalitik Adım: Geri kalan H_2S , daha fazla kükürt yapmak için SO_2 ile reaksiyona girer, oran yaklaşık %99.8'dir. Hidrojen üretimi için kullanılan Claus metodu basit olarak Şekil 11'de gösterilmiştir.

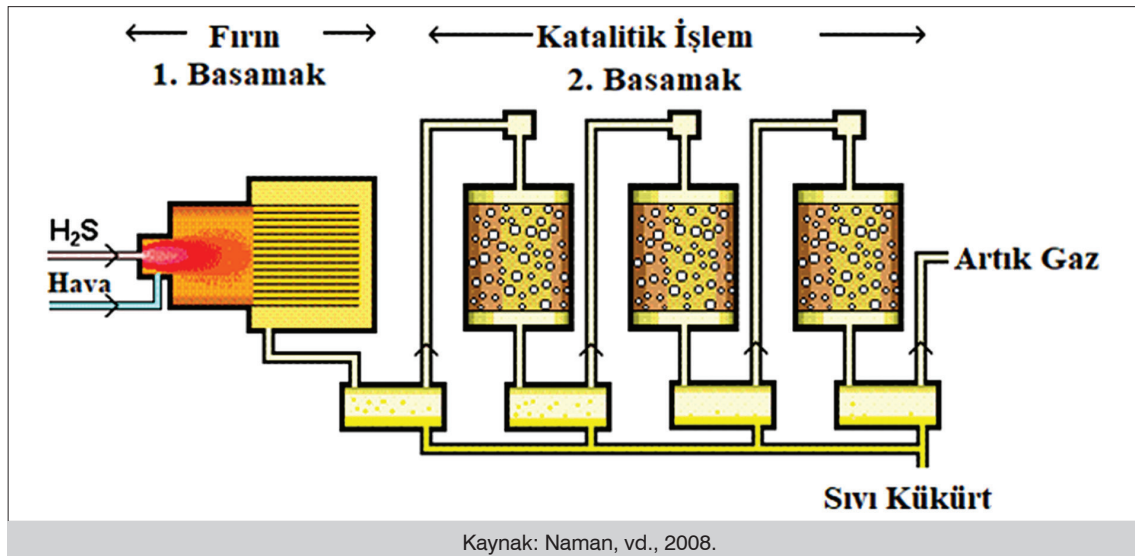
Hidrojen sülfürün deniz suyunda çözülmüş halde bulunması nedeniyle, hidrojen elde etmeden

önce sırasıyla; yoğunluğu yeterli olan H_2S 'in doğru derinlikten yüze pompalanması, H_2S molekülünü parçalanmadan sudan ayrılması gerekmektedir. Bu oldukça karmaşık sistemin detayları ilgili yayında verilmiştir (Naman, vd., 2008).

Biyokütleden Hidrojen Üretimi

Hidrojen üretiminde su yerine biyokütle olarak tarif edilen, her türlü organik atık, odun, tezek vs. kaynak olarak kullanıldığında, elektroliz yönteminden farklı bir metot uygulanır. Yapılan çalışmalar hidrojenin en ucuz, biyokütle kaynaklarından üretilebileceğini göstermektedir. Özellikle enerji tarımıyla, örneğin hızlı büyüyen sorgum gibi enerji bitkilerinin, tarımla rekabet etmeyen nispeten çorak arazilerde yetiştirilmesi ile elde edilen bu kaynak hidrojen üretimi için son derece yararlıdır. Biyokütleden hidrojen eldesinde piroliz, hetotropik ve foto fermantasyon gibi yöntemlerin yanı sıra bakterilerden de faydalanılmaktadır. Biyokütleden hidrojen üretildiği takdirde, daha önce bitki büyürken fotosentez yoluyla absorbe

Şekil 11. Klasik Claus İşlemi (Metodu)



edilen CO₂ açığa çıkacağından atmosferdeki CO₂ dengesi değişmeyecek ve çevre zararı olmayacaktır.

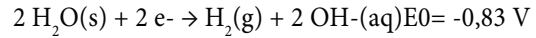
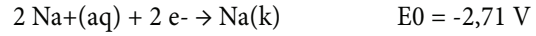
Deniz Suyundan Hidrojen Üretimi

Denizlerdeki su miktarı ve güneş, rüzgâr enerjilerinin potansiyelleri göz önüne alındığında denizlerden milyarca ton hidrojen dolayısıyla enerji ve saf su elde etmek, dünyanın çevre, enerji ve su problemleri için yegâne çözümdür (Türe, 2021: par.14). Burada deniz suyu içindeki tuz (NaCl) nedeniyle klor gazı elektrolizde elektrotların kirlenmesine yol açtığından ya suyun önce ters ozmos gibi bilinen tekniklerle arıtılması veya elektrot üzerinde bazı yeni teknolojik geliştirme yapmak gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak gerçekleştirilebilecek bu iki aşamalı teknik şematik olarak Şekil 12'de verilmiştir.

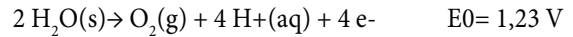
Dünya üzerindeki okyanusların tuzluluk oranı %3.1 ile %3.8 arasında değişmekle beraber, denizlerin tuzluluk oranı ortalama su sıcaklığı ve iklimin kuruluşuna bağlı olarak buharlaşma ile artarken, denizi besleyen akarsuların taşıdığı su miktarı ile azalmaktadır. Deniz suyunda su

(H₂O) ve tuzun (NaCl) dışında magnezyum, kalsiyum gibi birçok mineral bulunmaktadır. Saf bir ergimiş tuzun elektrolizinde elektrotlarda gerçekleşecek tepkimeler tuz iyonlarını nötralize eden yarı hücre tepkimeleridir. Oysa deniz suyu arıtımından arıtılan solumadaki sodyum klorür çözeltisinin elektrolizinde hem suyun hem de tuzun iki indirgenme ve iki yükseltgenme tepkimeleri katot ve anotta yarışacaktır. Na⁺ ve Cl⁻ dışındaki eser elementlerin oluşturduğu iyonlar ilk aşamada ihmal edilmekle beraber bunların da ekonomik önem taşıdığı ve ayrıca elektrotların çalışma ömrünü etkileyebilecekleri göz ardı edilmemelidir. Tepkimelerin standart hidrojen elektrodu ile kıyaslanan standart yarı hücre potansiyelleri E₀ ile gösterilmiştir.

Katot indirgenme tepkimeleri:



Anot yükseltgenme tepkimeleri:

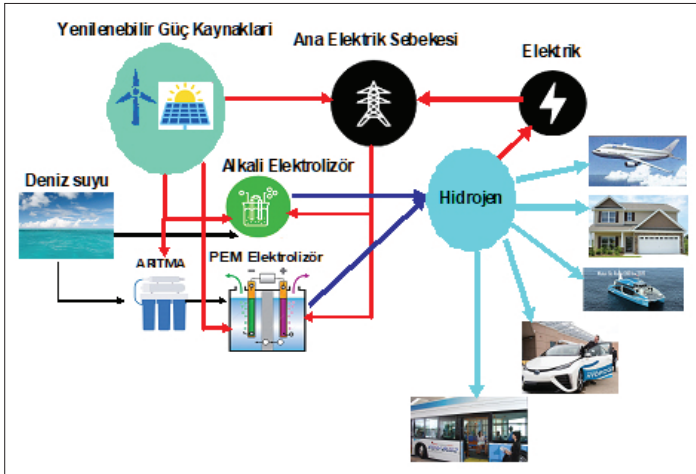


Elektrokimyasal hücrenin standart pil potansiyeli, standart katot potansiyeli (E_{0katot}) ile standart anot potansiyeli (E_{0anot}) arasındaki potansiyel farkına, yani indirgenme ile yükseltgenme yarı hücre potansiyel farkına eşittir.

$$E_{0\text{pil}} = E_{0\text{katot}} - E_{0\text{anot}}$$

Katot yarı tepkimeleri incelendiğinde sodyumun indirgenmesi suyun indirgenmesine kıyasla çok daha negatif olduğu için katotta H₂ oluşacak, Na+

Şekil 12. Deniz Suyundan Hidrojen Üretim Alternatifleri



Kaynak: Türe, 2021.

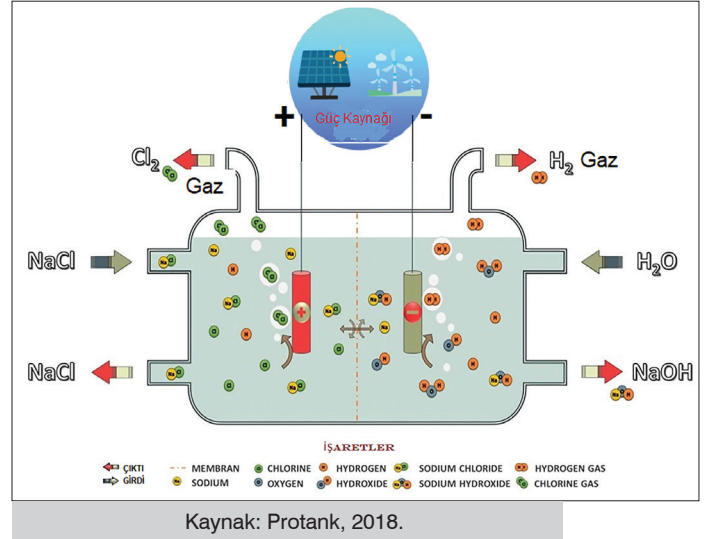
iyonuyorsa çözeltide kalacaktır. Bazı özel katalizörler haricinde O_2 'nin aşırı potansiyeli Cl_2 'nin aşırı potansiyeline göre daha fazla olduğu için, pil potansiyeli daha düşük olmasına rağmen, anotta O_2 değil istenmeyen zehirli Cl_2 gazı oluşacaktır. İşlemlerde H_2 dışında klor Cl_2 ve alkali $NaOH$ (aq) iki ana ürün olduğundan, işlem klor-alkali işlemi olarak adlandırılır. Şekil 13'te gösterilen diyafram hücrelerinde Cl_2 anot bölgesinde, H_2 ve $NaOH$ ise katot bölgesinde üretilir. Diyaframın (Membran) görevi Cl_2 ile $NaOH$ 'ın temasına engel olarak ClO^- , ClO_3^- ve Cl^- iyonları gibi istenmeyen ara ürünlerin oluşmasına engel olarak klor-alkali ürün verimini arttırmaktır. Katot bölgesindeki yaklaşık %10-12 $NaOH$ (aq) ve %14-16 $NaCl$ (aq) içeren çözelti, suyun bir kısmı buharlaştırılarak ve $NaCl$ (k) kristalleştirilerek deriştirilir ve saflaştırılır. Son ürün %1'e kadar $NaCl$ (aq) içeren %50'lik $NaOH$ 'dır.

Hidrojen Yakıtının Güvenilirliği

Gelişen hidrojen teknolojisi, doğalgaz, petrol, kömür ve uranyum gibi nükleer yakıtların geniş çapta kullanımı nedeniyle ortaya çıkan kazalar yanında çok daha güvenli kalmaktadır. Hidrojen kullanımında bazı kurallara uyulduğu takdirde tehlike yok denilecek kadar azalmaktadır. Aslında, hava gazı olarak bilinen ve dünyanın birçok büyük şehrinde yaygın olarak kullanılan gaz karışımı içinde %50 hidrojen, %30 metan ve %7 oranında zehirli bir gaz olan karbon monoksit bulunmaktadır (Türe, 2021: par.25). Hidrojenin güvenli olmasının nedenleri özetle:

- Havadan 14 kat hafif olduğundan hızla yayılarak zararsız hale gelmesi;
- Hidrojen deposu delinmesi durumunda 35-40 cm yakına gelmeden ateş almaması;
- Yandığı zaman sadece saf su oluşturması;
- Yanabilmesi için havadaki konsantrasyonun en

Şekil 13. Diyaframlı Klor – Alkali İşlemi



az % 4 olması;

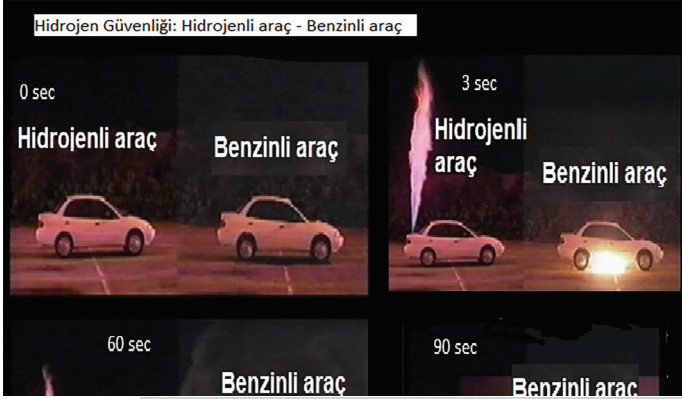
- Odun, kömür, benzin gibi etrafa ısı yaymaması;
- Araçların egzozundan zehirli gaz ve kanserojen parçacıklar yerine saf su çıkarmasıdır.

Hava içinde alev alma sınırı, patlama enerjisi, alev sıcaklığı ve atık ürün gibi parametreler göz önüne alındığında, fosil yakıtların emniyet faktörlerinin 0.5-0.80 arasında olmasına karşın, hidrojen için, daha yüksek (1 civarında) bir emniyet faktörü bulunmuştur. Bu bulgular, hidrojenin diğer yakıtlara göre daha emniyetli olduğunu açıkça göstermektedir. Hidrojenin güvenliği ile ilgili yapılan bir deney Şekil 14'te gösterilmiştir (Türe, 2021: par. 26).

Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasındaki en büyük sorun depolanmasındaki verim yetersizliğidir. Hidrojen genelde; a) Sıkıştırılmış halde b) Sıvı halde ve c) Kimyasal bağ oluşturmuş halde, olmak üzere üç farklı yolla depolanabilmektedir. Sıkıştırılmış ve sıvı hidrojen saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak nano-tüplerde de depolanabilmektedir.

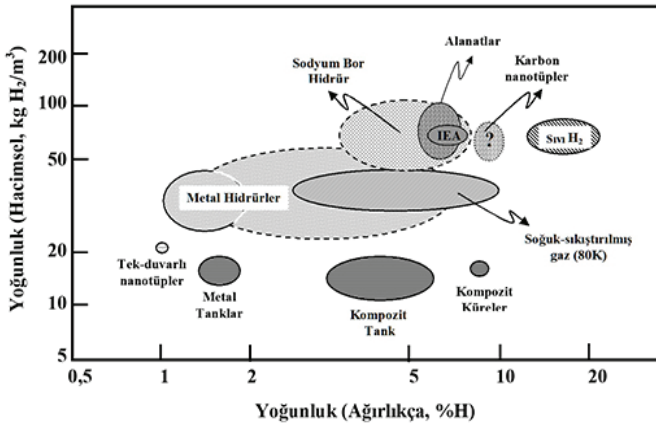
Şekil 14. Hidrojenli ve Benzinli Araçların Yangın Durumunda Karşılaştırılması



Kaynak: Parsons, 2020.

Kimyasal olarak ise genellikle hidrür şeklindedir. Hidrür formunda depolama, katı halde metallerde olabileceği gibi sodyum bor bileşiğindeki gibi sıvı halde de olabilmektedir. Araştırmalar, bazı alaşımların saf haldeki hidrojenle çok daha yüksek yoğunlukta hidrojen depolayabildiklerini göstermiştir (Türe, 2021: par. 27). Farklı depolama yöntemleri ile elde edilebilecek hacimsel ve gravimetrik hidrojen yoğunluk değerleri Şekil 15'te verilmektedir.

Şekil 15. Hidrojende Depolama Şekilleri ve Elde Edilebilen Hacimsel ve Gravimetrik Yoğunluk Değerleri



Kaynak: Ewald, 1998.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve A.B.D. Enerji Bakanlığı otomotiv uygulamaları için hedef değerleri; kapasite için: >% 5-6, geri bırakım sıcaklığı için: <150 °C ve kullanım ömrü için: >1000 dolum olarak tespit etmişlerdir (Schulz, vd., 1999).

Hidrojenin depolanmasında güvenilirlik ve hafifliğin önemli olması, hidrojenin hidrür yapısında depolanmasını ön plana çıkarmaktadır (Bilici, 2004). Şekil 15'te de görüldüğü gibi "özellikle birim hacimde depolanabilecek hidrojen açısından hidrürler gaz veya sıvı depolamada önemli bir üstünlüğe sahiptirler (Bilici, 2004).

Hidrojenin Metal Hidrürlerle Depolanması

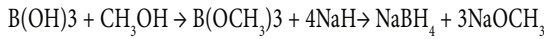
Hidrojenin metal hidrür olarak magnezyumda depolanması konusunda olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Güvendiren, vd., 2004). Bu çalışmalarda %6'lık depolama kapasitesine erişilmiş, ancak geri bırakım sıcaklığı hedef değerlerin üzerinde kalmıştır. Zehirlenmeye karşı direnç açısından sistem, iyileştirmelere gerek duymaktadır (Güvendiren, vd., 2003). Halen çalışmalar yukarıda belirtilen hedef değerler doğrultusunda Mg-Al-B sistemi esasında sürdürülmektedir. Hidrojenin, yine metal hidrür olarak Mg2Ni ve benzer sistemlerde depolanması Osmangazi Üniversitesinde ve LaNi5'te hidrojen depolamanın ısı açısından numerik modellenmesini konu alan çalışmalar ise Niğde Üniversitesinde sürdürülmektedir (Mat & Kaplan, 2001).

Hidrojenin Bor Hidrürlerle Depolanması

Sodyum bor hidrür (NaBH_4), güçlü bir indirgeyici olup, birçok organik ve inorganik bileşikler ile reaksiyona girebilmekte ve diğer bor hidrürlere oranla birim hacimde daha fazla hidrojen atomu içermektedir. Yıllardır sanayinin çeşitli kesimlerinde farklı amaçlar için kullanılmasına rağmen hidrojen taşıma kapasitesi ve bor içeren bir bileşik olması,

sodyum bor hidrürün son zamanlarda çok daha iyi bilinen bir bileşik haline gelmesine yol açmıştır (Bilici, 2004).

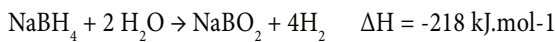
Sodyum bor hidrür, ilk olarak Schlesinger prosesi olarak bilinen yöntem ile aşağıdaki eşitlikte görüldüğü gibi borik asidin metanol ile trimetil borata ($B(OCH_3)_3$) dönüşmesi ve daha sonra sodyum hidrür ile indirgenmesi sonucunda elde edilmiştir.



Eşitlikteki stokiyometrik oranlar incelendiğinde, gerekli sodyumun %75'inin bir yan ürün olan sodyum metoksida dönüştüğü görülmektedir. Bu verim düşüklüğü, yöntemin daha büyük ölçekte uygulanabilirliğini engellemekte ve sodyum bor hidrür üretim maliyetini etkileyen en büyük faktör olmaktadır (Ortega, 2003). Dünya sodyum metalinin %66'sı ABD'de, % 14'ü İngiltere'de, geri kalanı ise Almanya, Fransa, Japonya ve Rusya'da üretilmektedir. Yıllık sodyum metali üretimi 250 bin tondur.

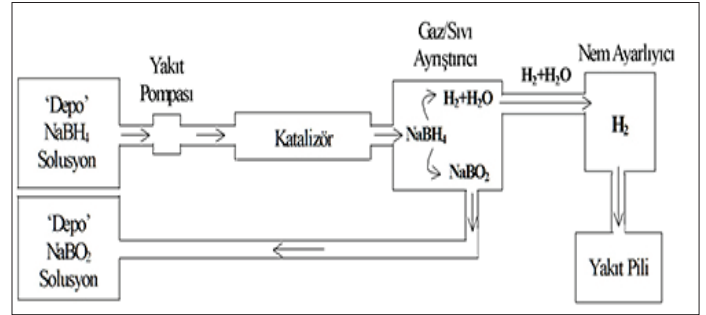
Sodyum bor hidrür ile su reaksiyona girdiğinde aşağıdaki ekzotermik reaksiyona uygun olarak hidrojenin ağırlıkça %10.8'i açığa çıkmakta ve yan ürün olarak sodyum metaborat ($NaBO_2$) üretilmektedir (Li, vd., 2003).

Katalizör



Görüldüğü gibi reaksiyon sonucu açığa çıkan hidrojen miktarı hidrür şeklinde bağlı olan hidrojenin iki katı olup, 4 mol H $NaBH_4$ 'den, 4 mol H ise H_2O 'dan gelmektedir. Reaksiyonun ekzotermik olması nedeniyle sistemden elde edilen hidrojen nemlidir ve kullanılacağı ortama bağlı olarak hidrojen gazının, nem miktarını düzenleyici bir sistemden geçirilmesi gerekmektedir.

Şekil 16. Otomotiv ve Benzer Uygulamalar İçin Sıvı Esaslı Sodyum Bor Hidrür Sistemindeki Akış Diyagramı



Kaynak: Güvendiren & Öztürk, 2003.

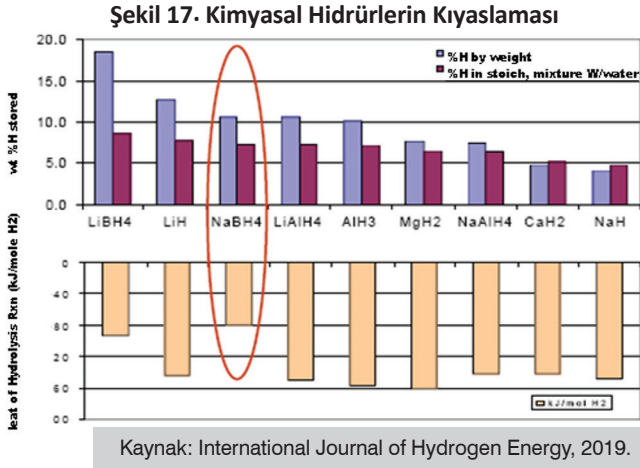
Sodyum bor hidrür kullanımının bazı avantajları şunlardır;

- Reaksiyonun kontrol edilebilirliği çok yüksektir (katalizörün ortamdaki uzaklaştırılması ile reaksiyon durmaktadır, Örn. Rutenyum, platin vb.).
- Reaksiyon oda sıcaklığı ve basıncında oluşmaktadır (hidrojenin serbest hale geçmesi için ek bir enerjiye gereksinim yoktur).
- Küçük miktardaki hidrojen üretimi için diğer yöntemlere göre çok daha basit ve ucuz bir yöntemdir.
- Reaksiyon hızı oldukça kararlı olup, H_2 üretimi yavaş ve kararlıdır. Katalizörler pek çok kez kullanılabilir.

Sodyum metaborat yeniden sodyum bor hidrür üretiminde kullanılabilir.

İçten yanmalı motorlarda yapılacak küçük bir değişiklik ile bu şekilde üretilen hidrojen gazı, araçlarda yakıt olarak kullanılabilir. Sodyum bor hidrür kullanılarak araçların yakıt sistemleri için gerekli olan sıvı esaslı sodyum bor hidrür sisteminin akış diyagramı Şekil 16'da şematik olarak gösterilmektedir.

Sodyum bor hidrür, $NaBH_4$, beyaz görünümü, toksik olmayan, kuru halde $300^\circ C$ 'ye kadar kararlı bir bileşiktir. Toz halinde, granül şeklinde veya $NaOH$ 'te %12'lik çözelti halinde bulunabilir. Sodyum



bor hidrür çözeltisinin raf ömrünü uzatmak için bu çözeltilere sodyum hidroksit (NaOH) eklenir. Normal saklama koşullarında, %12'lik NaOH'teki NaBH₄ çözeltisinin yıllık kaybı % 0.1'den daha azdır.

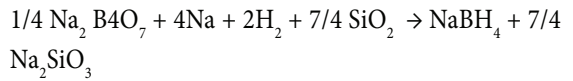
Sodyum bor hidrür, hidroskopik yapısı dolayısıyla havadaki nem ile temas ettiğinde yavaşça sodyum metaborat ve hidrojene bozunur. NaBH₄'den hızlı ve kontrollü biçimde hidrojen üretimi asidik bileşikler veya rutenyum, nikel, kobalt, platin gibi katalizör görevi gören metallerin ilavesiyle gerçekleştirilebilir. Sodyum bor hidrür çözeltisinin katalizör kullanılarak verdiği ekzotermik hidroliz reaksiyon sonucu 2.37 litre H₂/g NaBH₄ açığa çıkar. Açığa çıkan hidrojenin yarısı sodyum bor hidrürden, diğer yarısı da sudan gelmektedir. Bu nedenle konsantre sodyum bor hidrür çözeltisinden açığa çıkan hidrojen içeriği oldukça yüksektir ve ağırlık başına enerji içeriği bakımından diğer bilinen mobil hidrojen depolama teknolojileri ile rahatlıkla rekabet edebilir. Sodyum bor hidrürden hidrolizle üretilen teorik hidrojen kapasitesi ağırlıkça %10,8'dir.

Maddelerin kütle bazlı H-kapasiteleri, depolama kapasitesi ölçütü olarak kullanılmaktadır. NaBH₄ birçok hidrojen alaşımından daha fazla hidrojen depolama özelliğine sahiptir (Şekil 17). Ayrıca, araştırmalar sodyum bor hidrürün en yoğun

sıkıştırılmış hava tankından daha fazla hidrojen tutabilme özelliğine sahip olduğunu göstermiştir (Andersson & Grönkvist, 2019).

Sodyum Bor Hidrür Sentez ve Hidroliz Maliyetleri

Bayer prosesi sodyum bor hidrür sentezinde en çok kullanılan ticari prosestir. Bu proseste belirli miktarlardaki susuz boraks, sodyum metali ve kuartz, 3 atm hidrojen basıncı altında, 500°C'de karıştırıcı tipli otoklavda 2-4 saat ısıtılır. Reaksiyon ürününün amonyak ile ekstraksiyonundan ve amonyakın evaporasyonundan sonra yüksek bir verimle NaBH₄ elde edilir. İkincil ürün olarak da sodyum metasilikat oluşur. Reaksiyon aşağıda verilmiştir:



$$\Delta G^\circ (298) = -411.3 \text{ kJ/mol-NaBH}_4 \quad ; \quad \Delta H^\circ (298) = -541.348 \text{ kJ/mol NaBH}_4$$

Reaksiyona giren hammaddelerin ve reaksiyon ürünlerinin entalpileri reaksiyon sıcaklığında hesaplanarak reaksiyon için gereken enerji maliyeti 1kg sodyum bor hidrür üretimi için yaklaşık 2/ kg ABD Doları olarak hesaplanmıştır. Ancak bu hesaplamada ideal koşullar varsayımı yapılmış ve yan ürünün sistemden uzaklaştırılması için gereken enerji maliyeti de göz önüne alınmamıştır. Bayer prosesi için gerekli hammaddelerin maliyetleri ise 1 kg NaBH₄ üretimi için minimum \$10'dır.

Sodyum bor hidrürün hidroliz reaksiyonu için gerekli sodyum bor hidrür yukarıdaki gibi Bayer prosesi ile üretildikten sonra hidrolizde kullanılacak ise, 1 kg H₂ sentezi için gereken NaBH₄ maliyeti ideal şartlarda yaklaşık \$50'dır. Ancak bu reaksiyonda rutenyum gibi bir katalizör de kullanılmalıdır. Katalizör türüne göre, sodyum bor hidrürden 1 kg hidrojen eldesi maliyeti \$80/kg'ı bulmaktadır ve bu maliyet katalizör türüne

ve miktarına göre daha da yükselebilmektedir. Ancak şu da belirtilmelidir ki NaBH_4 sistem içinde Bayer prosesiyle üretilmeyip, \$47'dan satın alınırsa bunun maliyeti \$222'yi bulmaktadır ve buna katalizör maliyeti de ilave edilirse hidroliz reaksiyon maliyeti yaklaşık \$260'ı bulacaktır (Türe, vd., 2006).

Hidroliz sonucunda hidrojenin yanında açığa çıkan sodyum-metaboratın tekrar sodyum bor hidrüre dönüştürülerek sisteme verilmesi sistem döngüsünün devam etmesi bakımından önemlidir. Yapılan araştırmalar, NaBH_4 geri dönüşümünün MgH_2 kullanarak (Amendola vd., 2000) dinamik hidrürleme/dehidrürleme prosesi ile veya Mg_2Si kullanılarak gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmada Mg_2Si kullanılarak, NaBO_2 'den NaBH_4 'e geri dönüşüm reaksiyon maliyeti yaklaşık \$15/kg H_2 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, tüm bu maliyetler bir araya getirilerek, ideal şartlarda, sistem kayıpları dikkate alınmadan sodyum bor hidrürün sentezinden, hidrojen sentezi ve sodyum metaboratın sodyum bor hidrüre geri dönüşümü de hesaba alınarak bulunan toplam maliyet yaklaşık US\$ 110/kg H_2 olarak belirlenmiştir. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi sodyum bor hidrür sistem içinde üretilmeyip satın alındığı takdirde bu maliyet yaklaşık \$290/kg H_2 olacaktır (Türe, vd., 2006).

Hidrojen Enerjisi Uygulamaları

Bir yakıtın her yerde, örneğin sanayide, evlerde, taşıt araçlarında kullanılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yakıtlarla bakıldığında, bunların birçoğunun ancak belirli uygulamalar için kullanılabildiğini görmekteyiz. Kömürü, otomobillerde veya uçaklarda kullanmak pratik açıdan uygun değildir. Hidrojeni ise, hemen her yerde kolaylıkla kullanmak mümkündür. Evlerde, ısıtma amacı ile kalorifer, fırın ve şofbenlerde doğalgaz yerine rahatlıkla kullanılabilir. Hidrojen fosil

yakıtların aksine yalnız alevli yanma ile değil katalitik yanma, kimyasal, elektro-kimyasal yolla üretim gibi çok farklı çevrimlerle enerji verebilmektedir.

Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlar yanında yakıt pilleri ile elektrik üreterek araçlarda yüksek verimli kullanım sağlaması ile otobüs, kamyon, otomobil, traktör ile tarım makineleri gibi tüm taşıt araçlarında kullanılması mümkündür.

Hidrojenden elektrik üretimi için kullanılan yakıt pillerinin günümüzde ve gelecekte çok önemli bir yeri olduğundan bu konu daha ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir. Hidrojen, yakıt pillerinde veya taşıtlarda benzin yerine, evlerde kalorifer, fırın ve şofbenlerde doğalgaz yerine kullanılabilir. Günümüzde hidrojen artık cep telefonlarından uçaklara kadar hemen her yerde kullanılmaktadır. Yakıt pilleri ile yüksek verimde elektrik üretilebildiği için bu pillerin kullanım alanları çok geniştir. Şekil 18'de ise yakıt pilleri ile çalışan araç ve ürünlerden bazıları gösterilmiştir. Bunlar arasında; otomobilleri, otobüsleri, motosikletleri, bisikletleri, golf arabalarını, fork liftleri, hizmet araçlarını, elektrik

Şekil 18. Hidrojenin Kullanım Alanları



Tablo 4. Yakıt Hücrelerinin Genel Ticari Kullanım Alanları

Yakıt Hücresi	Yakıt Türü	Elektrolit	İşletim Sıcaklığı (°C)	Transfer Molekülü	Kullanım Alanları
Polimer Elektrolit Zarlı (PEM)	H ₂	Polimer	60-100	H ⁺	Sabit, portatif ve hareket eden sistemler
Doğrudan Metanol (DMFC)	Metanol	Polimer	50-120	H ⁺	Portatif sistemler
Alkali (AFC)	H ₂	Potasyum hidroksit	50-100	OH ⁻	Sabit ve hareket eden sistemler
Fosforik asit (PAFC)	H ₂	Fosforik asit	175-200	H ⁺	Sabit sistemler
Ergimiş karbonat (MCFC)	Doğal gaz, LPG, dizel	Lityum – Potasyum karbonat	600-1,000	CO ₃ ⁻	Sabit sistemler
Katı oksitli (SOFC)	Doğal gaz, LPG	Zirkon	600-1,000	O ₂ ⁻	Sabit sistemler

Kaynak: Xiao, 2021.

yedek ünitelerini, uçakları, lokomotifleri, denizaltıları vb. araçları saymak mümkündür. Hidrojen sanayide ise margarin yapımından, metal işlemeye kadar çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri yüksek verimli elektrokimyasal enerji dönüşüm cihazları olarak tarif edilir ve temel olarak anot ve katot arasına yerleştirilmiş elektrolitten oluşur. Yakıt olarak kullanılan hidrojenin oksijen ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda elektrik üreten bu cihazlar geleceğin enerji üretim kaynağı olarak görülmektedir. Atık olarak saf su üretmesi, çevre kirliliğine, gürültüye neden olmaması ve hareketli parça içermemesi yakıt pilinin başlıca avantajları arasındadır. Yakıt pilleri genellikle hücrede kullanılan elektrolit türüne bağlı olarak polimer elektrolit (PEM), alkali, fosforik asit, ergimiş karbonat ve katı oksit yakıt pili olarak sınıflandırılmaktadır. PEM yakıt pili özellikle taşıtlarda kullanılmaktadır. Yakıt pilleri

otomobillerde kullanılan geleneksel içten yanmalı sistemlerden daha enerji etkindir ve kesinlikle çok daha az kirlilik oluşturmaktadır. Bununla birlikte, otomobil uygulamaları için sistem büyüklüğü, ağırlığı, işleme alma süresi, işletim ömrü ve fiyatı, iyileştirilmesi gereken önemli konulardır.

Yakıt hücresi, hidrojenin kullanımında önemli bir yer tutmaktadır. Yakıt hücresi sistemleri taşınabilir şekilde kullanılabilirdiği gibi, ulaşımda, hareketli sistemlerde ve sabit uygulamalarda da kullanılması mümkündür. Yakıt hücreleri genel olarak elektrik enerjisinin ihtiyaç duyulduğu her yerde kullanılabilmeyle beraber, genel olarak ticari kullanımı Tablo 4'teki gibidir (Xiao, 2021). Taşınabilir uygulamalara; cep telefonu, dizüstü bilgisayar, dijital fotoğraf makinesi, kamera bataryaları, sabit uygulamalara; jeneratörün ve kesintisiz güç kaynaklarının kullanıldığı hastaneler, iş yerleri, evler, bilgisayar ağları örnek gösterilebilir. Ulaşım sektöründe dünyanın önde gelen otomobil

üreticileri, yakıt hücresi ile çalışan otomobil, otobüs prototiplerinin üretimini tamamlamışlardır. 1MW'lık lokomotif için de 2003 yılı içinde beş yıllık bir proje başlatılmıştır. Ayrıca madencilikte emniyetli olması nedeniyle yakıt hücresi kullanımına başlanmıştır.

PEM (Proton Exchange Membrane-Polymer) Yakıt Pili

Proton Exchange Membrane veya PolymerElectrolite Membrane olarak da bilinen PEM Yakıt pilleri özellikle ABD, Japonya ve Almanya'da taşıtlarda kullanım için geliştirilmiş bir yakıt pili türüdür. İlk önemli uygulaması, GE tarafından 1 kW çıkışlı bir PEM yakıt pilinin Gemini uzay araçlarında kullanılmasıdır. Yan ürün olarak üretilen saf su da astronotlar tarafından içme suyu olarak kullanılmıştır. Son 5 yıldır PEM yakıt pillerinin hem maliyetinde hem de performansında iyileşme sağlayacak çalışmalarda büyük bir artış olmuştur (Wilkinson & Steck, 1997).

Komple yakıt pili sistemlerinin birçok taşıma uygulamaları (şehir içi toplu taşıma otobüsleri ve yolcu otobüsleri dahil olmak üzere) için kullanılabilirdiği gösterilmiştir. Son çalışmalar maliyet düşürme ve katalizör, membranlar ve bipolar plakaların büyük miktarlarda üretimi konularında yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar; güç yoğunluğunu artırma, su yönetimini iyileştirme, ortam koşullarında işletim, dönüştürülmüş yakıtta toleransı artırma ve modül ömrünü artırma konularındaki çalışmalarla da kesişmektedir. Örnek bir PEMYP hücresinin şeması Şekil 19'da gösterilmektedir.

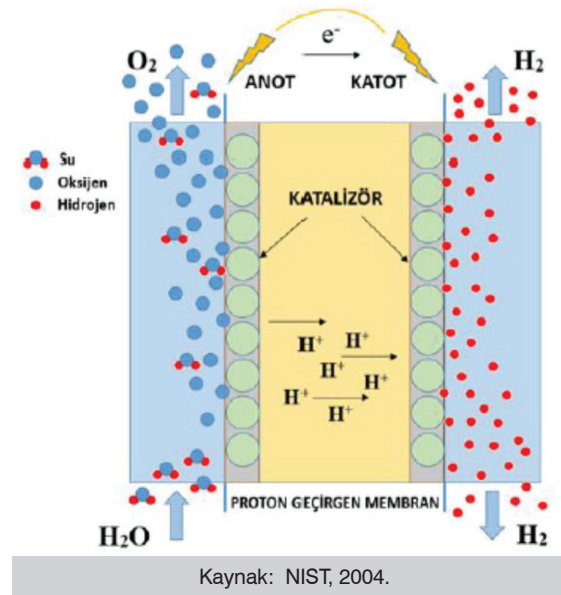
PEM'de diğer yakıt pillerinde olduğu gibi yakıt pil modülü, gaz geçirgenliği yüksek ve elektrolitle temasta olan iki elektroda sahip olup, gaz yakıt, anottan sürekli olarak beslenirken oksitleyici gaz da katottan sürekli olarak beslenmektedir. PEM elektrot reaksiyonlarında ise yakıttan gelen H_2 anotta H^+ 'ya

dönüştürülür. H^+ , polimer elektrolit membrandan geçerek katotta O_2 ile birleşir ve su üretilir. İşletim sıcaklığı $80^\circ C$ civarındadır.

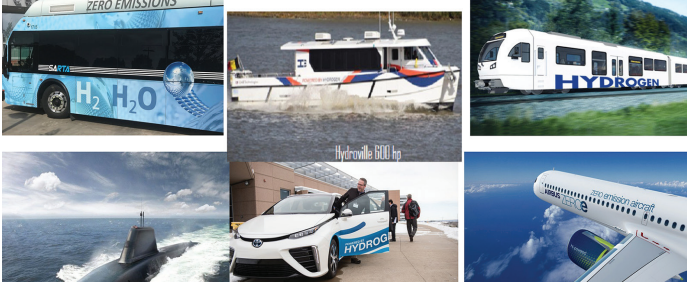
Membranın elektrolit olarak, anot ile katot arasındaki iyonik iletişimi sağlamak ve reaksiyona giren iki gazı ayırmak olmak üzere iki görevi bulunmaktadır. Günümüzde kullanılan standart elektrolit malzemesi DuPont tarafından 1960'ların ortasında uzay uygulamaları için üretilen teflon kökenli malzeme olan Nafion'dur.

PEM hücresi içinde kullanılan elektrotlar tipik gaz difüzyon elektrotlarıdır ve hidrojen gazını proton ve elektronlarına ayırır. Katalizör tabakası 5-50 m kalınlığındadır ve 2-4 nm çapında Pt mikro kristaller içerir. Günümüzde Pt hem anot hem de katot reaksiyonları için uygun katalizör olarak belirlenmiştir. Ancak pahalı olduğundan birçok yöntem kullanılarak minimum miktarda kullanılmaya çalışılmaktadır. PEM hücrelerin çoğunda, akım toplama ve dağıtma, gaz dağıtımı ve ısıl yönetim için karbon/grafit plakalar

Şekil 19. PEM Yakıt Pili Şeması



Şekil 20. Hidrojenle Çalışan Araçlar



kullanılmaktadır. Bu tabaka ~350 m kalınlığındadır ve bir tarafına katalizör tabakası tutturulmuştur.

Doğrudan Metanol Yakıt Pili

PEM yakıt pilinin bir çeşidi olarak da kabul edilen bu piller üzerindeki ilk çalışmalar 1960-70'li yıllarda Shell ve ESCO-Exon tarafından yapılmıştır. Doğrudan metanol kullanımının Pt-Ru katalizör üzerindeki olumsuz etkisi ve anottaki aşırı gerilimi nedeniyle düşük akım yoğunluğu elde etmişlerdir. 1990'lı yılların başlarında elde edilen verimin %25'in altında olması nedeniyle göz ardı edilen bu piller için araştırmalar sürdürülmektedir. Doğrudan Metanol Yakıt Pili çalışma ilkesi PEM piline benzemektedir. PEM'de olduğu gibi elektrolit olarak asidik katı polimer Nafion, elektrot olarak Pt-Pd bindirilmiş karbon kullanılmaktadır. Bu pilleri PEM'den ayıran en önemli özellik, yakıt metanol/etanolün yakıt dönüştürücü gereksizinden doğrudan kullanılabilmesi ve yakıt işleme birimi içermediğinden diğer türlere göre daha az karmaşık, daha hafif ve daha ucuz olmasıdır.

Alkali yakıt pili

Alkali yakıt pilinde düşük sıcaklık (120°C'de) uygulamalarında elektrolit olarak %35-50 KOH kullanılmaktadır. Uzay aracı Apollo'da kullanılan yüksek sıcaklık (250°C'de) alkali yakıt pilinde ise elektrolit olarak %85 KOH kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklı alkali sistemler oda sıcaklığında da

çalışabilir ve diğer tüm yakıt pili sistemleri arasında en yüksek voltaj verimine sahiptir. Hücre ve elektrotlar düşük maliyetle karbon ve plastiklerden üretilir. Birçok malzemeye iyi uyum sağlayabildiğinden 15,000 saat gibi uzun bir ömre sahiptir. Ayrıca bu yakıt pilleri için bulunabilecek Ni, Ag, metal oksitler gibi birçok katalizör seçeneği bulunmaktadır.

Fosforik asit yakıt pili

Eğer uzay uygulamalarında kullanılan alkali yakıt pili sayılmazsa günümüzde ticarileşmeye en yakın yakıt pili Fosforik Asit Yakıt Pildir. Elektrolit olarak %100'lük fosforik asidin kullanıldığı bu yakıt pili 150-220 °C'de çalışmaktadır. Elektrolit olarak görev yapan fosforik asit, elektrotlar arasında gözenekli bir tabakada sabitlenmiştir. Hem anot hem de katot gaz difüzyon elektrotlarıdır. Düşük sıcaklıklarda fosforik asidin kötü bir iletken olması nedeniyle bu yakıt pili yüksek sıcaklıklarda çalıştırılır. Bu dezavantajın yanı sıra fosforik asit bir elektrolit olarak birçok avantaj sağlamaktadır. Bunlar arasında, mükemmel ısıl, kimyasal ve elektrokimyasal kararlılığı ve 150°C'nin üzerinde diğer inorganik asitlerden göreceli olarak daha düşük uçuculuğa sahip olmasını saymak mümkündür.

Ergimiş karbonat yakıt pili

Ergimiş karbonat yakıt pili 600-650 °C gibi oldukça yüksek sıcaklıklarda çalışır ve son dönemlerde geliştirilen ikinci jenerasyon yakıt pillerindedir, bir başka deyişle, ticarileştirilmeden önce çok fazla geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Elektrolit olarak alkali karbonatların karışımı, örneğin (Na ve K) veya Li_2CO_3 - K_2CO_3 karışımı kullanılmaktadır. Bu elektrolit seramik bir matris yapısı içine tutturulmuştur. Hücrenin, kolay bulunabilen metal levhalardan baskı tekniği ile üretilmesi, hücre reaksiyonlarında pahalı olan değerli metal katalizörler yerine Ni katalizörün yeterli olması,

CO'in doğrudan kullanılabilirdiği bir yakıt türü olması, hücrede açığa çıkan buharın türbinlerinde veya kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilir kadar yüksek sıcaklıkta bulunması avantajları olarak sayılabilir. Ancak Ergimiş Karbonat yakıt pilinin, yüksek sıcaklıkta çalışması ile korozyona neden olması ve dolayısıyla hücre bileşenlerinin ömrünün azalması gibi dezavantajları vardır.

Katı oksitli yakıt pili

Katı oksit elektrolit, bazı özel yararları nedeniyle endüstriyel uygulamalar için çekici olmaktadır. Elektrolit olarak gözeneksiz metal oksitler, %8-10 (mol) Y_2O_3 içeren ZrO_2 kullanılmaktadır. Saf zirkon yalıtkan olduğu halde Y_2O_3 ilavesiyle iletkenlik

özellği göstermektedir. ZrO_2 yerine CeO_2 kullanımı işletim sıcaklığını düşürebilecektir. Bu yakıt pilinde de diğer yakıt pillerinde olduğu gibi gözenekli gaz difüzyon elektrotları kullanılmaktadır. Anot ve katot olarak önceleri gözenekli Pt kullanılmaktayken son dönemlerde anot olarak $Ni-ZrO_2$ (Y_2O_3 içeren) veya $CO-ZrO_2$, katot olarak ise Sr yüklenmiş $LaMnO_3$ kullanılmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklara ($1000^\circ C$) çıkmak mümkün olduğundan, düşük sıcaklık uygulamalarındaki gibi pahalı katalizör kullanımına gerek kalmadan yakıt, doğrudan yakıt pilinde kullanılabilir. Gaz geçişi düşük, elektrolitin elektronik iletkenliği yüksek olduğu için bu piller açık devrede teorik voltajın en az % 96'sını verebilmektedir. Katı oksit yakıt pillerinin

Tablo 5. Yakıt Pillerinin Türleri ve Özellikleri

Yakıt Pili Cinsi	Elektrolit	İşletim sıcaklığı, [$^\circ C$]	Ort. Verim [%]	Uygulama Alanları
Alkali	Potasyum hidroksit	50-100	60	Uzay gemileri, kesintisiz güç kaynağı
Polimer Elektrolit Membranlı	Katı polimer	50-125	70	Uzay gemileri, taşıtlar, güç kaynağı
Fosforik Asit	Ortofosforik asit	180-210	55	Kojenerasyon sabit güç, taşıtlar
Ergimiş karbonat	Lityum-potasyum karbonat	630-650	50	Kojenerasyon sabit güç
Katı oksitli	Kararlı hale getirilmiş zirkon	900-1,000	65	Kojenerasyon sabit güç
Doğrudan Metanol	Sülfirik asit veya polimer	50-120	35	Düşük güçler, bilgisayar, cep telefonu vb.

Kaynak: Fuel Cell Today Industry Review, 2008.

avantajları arasında, katı elektrolitin çok kararlı olması nedeniyle hücrenin çalışma koşullarında diğer elektrolitler gibi sorun çıkarmaması, sıvı faz olmadığından ara yüzey sorunları, gözeneklerden su taşması, katalizörü ıslatmanın gerekliliği gibi problemler de bulunmaması sayılabilir. Genel bir karşılaştırma için Tablo 5'te yakıt pillerinin türleri ve özellikleri verilmiştir.

Hidrojen Enerjisinin Mevcut Kullanım Alanları

Enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin hemen her alandaki uygulamaları artık gayet iyi bilinmektedir. Bunların yakında daha da artması kaçınılmazdır.

Toyota tarafından geliştirilen H₂City Gold modeli otobüsün tavanına yerleştirilen ve toplam kapasitesi 37.5 kg olan 5 hidrojen tankı ile 400 km yol gidebilmektedir. Yakıt tankları 8 dakikadan kısa bir sürede doldurulabilen otobüs, sadece su buharı salarak çevreci kimliğini ortaya koymaktadır.

Günümüzde hemen tüm otomobil firmalarının hidrojen yakıtı ile çalışan araçları mevcut olup, önümüzdeki yıllarda üretimlerini hızla arttıracığı açıklanmıştır. Shell, BP gibi büyük petrol

şirketleri de hızla hidrojen dolum istasyonları açmaktadırlar (Şekil 21).

Hidrojenin Deniz Taşıtlarındaki Uygulamaları

Son yıllarda iklim değişikliği ve deniz kirlenmesi konularına artan farkındalık nedeniyle, özellikle İsveç, Norveç gibi kuzey ülkelerinin limanlarına artık petrol türevi yakıtlarla çalışan gemilere kısıtlama getirilmiş ve gemilerde hidrojen gibi temiz yakıt kullanılması teşvik edilmeye başlanmıştır. Hidrojenli deniz taşıtlarına örnekler Şekil 22'te gösterilmiştir.

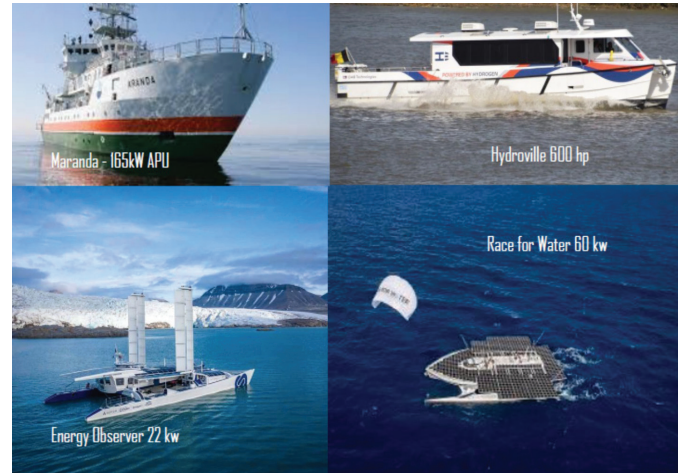
Türkiye'deki ticari gemi işletmecileri ve tersane sahipleri de bu bağlamda hidrojen yakıtı kullanımını için çalışma başlatmışlardır. Dünyada halen hidrojen yakıtı ile çalışan bir çok gemi bulunmakta ve bunların sayısı giderek artmaktadır. Aşağıda halen dolaşımda olan hidrojen yakıtlı gemiler gösterilmiştir.

Hidrojen/oksijen yakıt hücreleri (özellikle PEMFC gibi düşük sıcaklık yakıt hücreleri) denizaltılarını çalıştırmak için ideal özelliklere sahiptir. Havaya ihtiyaçları yoktur, yakıt (hidrojen) ve oksit (oksijen) depolanması durumunda deniz altında işleyebilir. Su dışında

Şekil 21- Hidrojen Dolum İstasyonları



Şekil 22- Hidrojenli Deniz Taşıtları



hiçbir emme ya da atık madde üretmezler, bu sebeple de sıfır kaldırma gücünü korurlar. Hareket eden parçaları olmadığından, sonar (deniz radarı) işaretini azaltarak sessizce işlerler. Düşük sıcaklıkta ısı salarlar ve de böylelikle çok az miktarda termal izler üretirler. Çok verimlidirler. Uzun deniz gezileri ve az zaman kaybı sağlarlar.

Hidrojenle Çalışan Uçaklar

Sıvı hidrojenin, ticari subsonik ve süpersonik uçaklarda yakıt olarak birçok avantajı vardır. Sıvı hidrojenin en önemli avantajı, geleneksel jet yakıtlarının enerji içeriğinden 2.8 kat daha fazla olan yüksek enerji içeriğidir (142 MJ/kg). Bu sebeple, sıvı hidrojenle çalışan bir uçak, geleneksel uçağın kütesinin üçte biri kadar daha az yakıt taşımak durumundadır. Hidrojenle çalışan bir subsonik yolcu uçağı, normal bir uçakla karşılaştırıldığında aynı uçuşu tamamlamak için ortalama %16 daha az yakıt (enerji açısından) ihtiyaç duyar. Bu avantaj, süpersonik bir uçakta daha da yüksek olacaktır (%28). Airbus ve Boeing firmaları hidrojen yakıtlı uçaklar üzerinde yoğun çalışma yapmaktadırlar.

Genel düşünceye rağmen hidrojen, hava taşımacılığı için daha güvenli bir yakıttır ve şu anda da jet yakıtı olarak kullanılmaktadır. Sıvı H₂ yakıtlı bir uçak çarpışmasındaki zarar ve zıyan, standart yakıtlı bir uçak çarpışmasına göre daha az olacaktır. 1988 Nisan'ında, ticari bir hava yolunun uçağının (Tupolev 155), sıvı hidrojenle çalışan üç turbofan motorundan birisinin Sovyetler Birliği'nde demonstrasyonu yapılmıştır. 19 Haziran 1988'de Amerikan pilotu, William H. Conrad, tamamen sıvı hidrojen ile çalışan bir uçağı (Grumman-American "Cheetah") çalıştıran ilk kişi olmuştur (Maniaci, 2008).

Binalarda Hidrojen Uygulamaları

Hidrojen bir alanın ısıtılmasında veya soğutulmasında kullanılabilir. Aynı şekilde, ufak modifikasyonlarla doğalgazın günümüzde kullanıldığı gibi su ısıtmasında da uygundur. Ek olarak, alev yanma yerine, hidrojen, doğrudan ısıtarak ve havayı nemlendirerek katalitik yakıcılarda da kullanılabilir. Daha başka emisyonlar üretilmediğinden bu yakıcılar kapalı mekanlarda da güvenle kullanılabilir. Alan ısıtma ve soğutmasında, dondurucularda, hidrojen kullanımı, hidrojen/hidrojen bileşkesi soğutma sistemleri şeklinde olacaktır.

Ya alev yanma ya da katalitik yakıcılar yemek pişirmekte kullanılabilir. Yakıcı kapların, hidrojen/hava hızının her zaman hidrojen/hava karışımlarındaki alev yayılma hızından daha fazla olacak şekilde tasarlanması, geri alev yayılmasını engellemek açısından çok önemlidir.

Sonuç ve Öneriler

Hidrojen her açıdan güvenli, temiz ve sonsuz bir yakıt olup, zararlı hiçbir yanı bulunmamaktadır. Bugün için dezavantaj sayılabilecek tek nokta ise henüz yaygın ticari kullanımı olmadığı için fiyatının pahalı olmasıdır ki bu da her yeni teknolojik ürün için geçerlidir. Örneğin cep telefonları veya hesap makineleri gibi teknolojik ürünlerin piyasaya ilk çıktıklarındaki fiyatlarının, şu andaki fiyatlarının onlarca katı olduğu iyi bilinmektedir. Ayrıca petrolün bulunmasından bugüne kadar geçen süre içinde bu sektöre yapılan yatırımın tahmini 160 trilyon (160,000 milyar) Dolar olduğu hesaplanmıştır. Hidrojenin yaygın kullanımı için petrol dolum istasyonlarında hidrojen pompaları kurulması ve tabii büyük miktarda hidrojen üretilmesi gerekmektedir. Bu alandaki çalışmalar birçok ülkede başlamıştır. Örneğin, Nisan 2004 de


Kaliforniya Valisi Arnold Schwarzenegger ‘‘Hidrojen Otoyolları’’ projesi çerçevesinde halen 12 adet olan hidrojen dolun istasyonu sayısını önümüzdeki 6 yılda 200’e çıkartmak için çalışma başlatmış ve bundan böyle her 30 km’de hidrojenli arabalar için dolun istasyonları bulunacağı müjdesini vermiştir (Türe, 2020).

Hidrojen gazı, doğalgaz veya hava gazına benzer şekilde boru hatları vasıtasıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Hidrojenin boru ile taşınmasına, Texas’ta petrol endüstrisi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğa sahip boru şebekesi ile Almanya’da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve halen 15 atmosfer basınç altında hidrojen taşımaya devam eden, 204 km’lik boru hattını örnek olarak göstermek mümkündür.

Günümüzde hidrojen depolama ve taşıma ortamı olarak büyük bir önem kazanmış olan sodyum bor hidrür, özel bor kimyasalları içinde de önemli bir potansiyele sahiptir. Sodyum bor hidrürün benzer amaçlı diğer bileşiklere oranla daha fazla hidrojen depolayabilmesi, yanıcı ve patlayıcı olmaması, kolay kontrol edilebilir bir reaksiyon ile hidrojenini verebilmesi gibi özellikleri, yeni ve temiz enerji politikaları ile birlikte değerlendirildiğinde ülkemizin zengin bor kaynakları için yaygın ve kalıcı bir tüketim alanı yaratabilecektir. Teknolojik yenilenmesini ve endüstriyel üretim sürecini hızlandırmak zorunda olan Türkiye ilk on yılda hidrojen enerjisine geçiş için bütün yasal ve hukuki zeminleri hazırlamalı ve bu ikincil enerji kaynağını temin edeceği birincil sistemleri kurmalıdır. Daha sonraki aşamada ise bu yakıtın daha verimli depolanabilmesi ve taşınabilmesi için alternatif olarak önerilen hidrür üretim sistemlerini geliştirmeli ve bor’lu yakıt çözeltilerini piyasaya sunacak teknolojiyi hazırlamalıdır. Bu teknolojiler ise elektrik enerjisine dönüşüm için gerekli

yakıt hücre sistemleri ile entegre olmalı ve dışa bağımlılıktan kurtulmak için, pahalı bir yöntem olan teknoloji transferi yerine üreten bir ülke olmalıdır.

Türkiye bugüne kadar hızla gelişen teknolojiyi yakalamakta geç kalmış ve devamlı teknoloji ithal eden bir ülke konumuna gelmiştir. Hiç olmazsa enerji alanında bu konumdan çıkma şansı Türkiye’nin önündedir. Türkiye hidrojen enerjisi uygulamaları açısından önemli bir konuma sahiptir. Rüzgâr, güneş, jeotermal, su gibi temiz enerji kaynaklarından hidrojen üretim yöntemleri, bu kaynaklar açısından zengin olan ülkemizde kolaylıkla uygulanabilir. Ancak, öncelikle bu teknolojilerin geliştirilip, uygun maliyetli hale getirilmesi gerekmektedir.

Türkiye’nin enerji alanında dışa bağımlılıktan kurtulması, gelişmiş bir ülke konumuna gelmesi için hidrojen enerjisi fırsatını iyi değerlendirmesi gerekmektedir. Türk toplumunun ilkokuldan başlayarak hidrojen konusunda bilgilendirilmesi, Türkiye’deki bilim adamlarının çalışmalarını hidrojene yönlendirmesi, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretimi çok önemli konulardır. Türkiye’nin sahip olduğu bor minerallerinden sodyum bor hidrürün hidrojenin depolanmasında kullanımı ile ilgili teknolojilerin geliştirilmesi, devletin hidrojen enerjisi çalışmalarına destek olması, hidrojen enerjisi alanında teşvikler vermesi bu teknolojinin bir an önce ülkemizde uygulanmasını sağlayacaktır. 

Kaynakça

- Adamson, K. A. (2008). Fuel Cell Today Industry Review 2008. *Platinum Metals*, 52(2), 123.
- Amendola, S. C., Sharp-Goldman, S. L., Janjua, M. S., Spencer, N. C., Kelly, M. T., Petillo, P. J., & Binder, M. (2000). A safe, portable, hydrogen gas generator using aqueous borohydride solution and Ru catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(10), 969-975.
- Andersson, J., & Grönkvist, S. (2019). Large-Scale Storage of Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901-11919.
- Bilici, U. (2004). Enerji Taşıyıcısı Hidrojen, Hidrojen Taşıyıcısı Sodyum Borhidrür. *Madencilik Bülteni, Maden Mühendisleri Odası*, 67, 43-47.
- CAB Direct. (2019). Solar Thermal Electrochemical Process (STEP) action to biomass: solar thermo-coupled electrochemical synergy for efficient breaking of biomass to biofuels and hydrogen. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193075874> adresinden alındı.

- Chen, Z., Jaramillo, T. F., Deutsch, T. G., Kleiman-Shwarcstein, A., Forman, A. J., Gaillard, N., Garland, R., Takanabe, K., Heske, C., Sunkara, M., McFarland, E. W., Domen, K., Miller, E. L., Turner, J. A., & Dinh, H. N. (2010). Accelerating Materials Development for Photoelectrochemical Hydrogen Production: Standards For Methods, Definitions, And Reporting Protocols. *Journal Of Materials Research*, 25(1), 3-16. <https://doi.org/10.1557/JMR.2010.0020>
- COSIA. (2017). Hydrogen from Hydrogen Sulphide. <https://cosia.ca/sites/default/files/attachments/COSIA%20Hydrogen%20from%20Hydrogen%20Sulphide.pdf> adresinden alındı.
- Degens, E. T., & Ross, D. A. (1974). The Black Sea—Geology, Chemistry, and Biology. *American Association of Petroleum Geologists*. <https://doi.org/10.1306/M20377>
- Dimitrov, P., & Dimitrov, D. (2004). The Black Sea, The Flood And The Ancient Myths. "Slavena", Varna. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18954.16327>
- Ewald, R. (1998). Requirements for advanced mobile storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(9), 803-814.
- Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, 238(5358), 37-38.
- Greenpeace. (2020). New research: Air pollution from fossil fuels costs the world \$8 billion every day. <https://www.greenpeace.org/usa/news/new-research-air-pollution-from-fossil-fuels-costs-the-world-8-billion-every-day/> adresinden alındı.
- Güvendiren, M., & Öztürk, T. (2003). Enerji kaynağı olarak hid rojen ve hidrojen depolama. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 523.
- Güvendiren, M., Akyıldız, H., & Öztürk, T. (2003). Hydrogen Storage In Magnesium With Graphite And Sulfur Addition, 569-573.
- Güvendiren, M., Baybörü, E., & Öztürk, T. (2004). Effects Of Additives On Mechanical Milling and Hydrogenation of Magnesium Powders. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(5), 491-496.
- Hisatomi, T., Kubota, J., & Domen, K. (2014). Recent advances in semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting. *Chem. Soc. Rev.*, 43(22), 7520-7535. <https://doi.org/10.1039/C4CS60378D>
- Irena. (2020). Green Hydrogen Cost Reduction. https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf adresinden alındı.
- Kamran, M. F. & Rayyan, M. (2021). Fundamentals Of Renewable Energy Systems: Technologies, design and operation. Elsevier Academic Press. ISBN: 978-0-12-823538-6
- Kudo, A., & Miseki, Y. (2009). Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chem. Soc. Rev.*, 38(1), 253. <https://doi.org/10.1039/B800489G>
- Lein A.,Y., & Ivanov M., V. (1990). Hydrogen Sulfide Production In Shelf Sediments And Its Balance In The Black Sea. *Microbiology*, 59 (5) : 921-8.
- Li, Z. P., Morigazaki, N., Liu, B. H., & Suda, S. (2003). Preparation of sodium borohydride by the reaction of MgH₂ with dehydrated borax through ball milling at room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 349(1-2), 232-236.
- Library. (2022). Development of a New Hybrid Photochemical/ Electrocatalytic Water Splitting Reactor for Hydrogen Production: Design, Analysis and Experiments. https://ir.library.dcuoit.ca/bitstream/10155/871/1/Baniasadi_Ehsan.pdf adresinden alındı.
- Maniaci, D. (2008). Relative Performance of a Liquid Hydrogen-Fueled Commercial Transport. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada.
- Mat, M. D., & Kaplan, Y. (2001). Numerical study of hydrogen absorption in an Lm– Ni5 hydride reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(9), 957-963.
- Naman, S., Türe, I., & Veziroglu, T. (2008). Industrial extraction pilot plant for stripping H₂S gas from Black Sea water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(22), 6577-6585. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.113>
- National Institute of Standards and Technology (NIST). (2004). PEM Fuel Cells. <https://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pem/FuelCells.html> adresinden alındı.
- Nature. (2013). Hydrogen production by Tuning the Photonic Band Gap with the Electronic Band Gap of TiO₂. <https://www.nature.com/articles/srep02849> adresinden alındı.
- Nelly Hydrogen. (2022). Alkaline water electrolysis. <https://nelhydrogen.com/glossary/alkaline-water-electrolysis/> adresinden alındı.
- Nozik, A. J. (1978). Photoelectrochemistry: Applications to Solar Energy Conversion. *Annual Review of Physical Chemistry*, 29(1), 189-222.
- Online Library. (2017). Recent Progress in Energy-Driven Water Splitting. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adv.201600337> adresinden alındı.
- Ortega, J. V., Wu, Y., Amendola, S. C., & Kelly, M. T. (2003). U.S. Patent No. 6,586,563. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Parsons, M. (2020). Getting Back to Work...At Work (The HYPER Guide to Returning to the Lab Safely). Washington State University. <https://hydrogen.wsu.edu/2020/06/12/getting-back-to-work-at-work-the-hyper-guide-to-returning-to-the-lab-safely/> adresinden alındı.
- Protank. (2018). Sodium Hydroxide Storage Tanks & Specifications. <https://www.protank.com/sodium-hydroxide-adresinden> alındı.
- Rubright, S. L. M., Pearce, L. L., & Peterson, J. (2017). Environmental toxicology of hydrogen sulfide. *Nitric Oxide: Biology and Chemistry*, 71, 1.
- Ruth, J. D., Hayes, L. M., Martin, D. R., & Hatipoglu, K. (2017). An overview of photoelectrochemical cells (PEC): Mimicking nature to produce hydrogen for fuel cells. *SoutheastCon 2017*, 1-6.
- Schulz, R., Huot, J., Liang, G., Boily, S., Lalande, G., Denis, M. C., & Dodelet, J. P. (1999). Recent Developments In The Applications of Nanocrystalline Materials To Hydrogen Technologies. *Materials Science and Engineering: A*, 267(2), 240-245.
- Science Direct. (2019). Biological And Biochemical Hydrogen Production. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080227139500148> adresinden alındı.
- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science For Energy Technologies*, 2(3), 442-454. [Doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002).
- Statista. (2021). Hydrogen production costs worldwide as of 2018, based on production source. <https://www.statista.com/statistics/1132774/global-hydrogen-production-cost-based-on-source/> adresinden alındı.
- Tee, S. Y., Win, K. Y., Teo, W. S., Koh, L. D., Liu, S., Teng, C. P., & Han, M. Y. (2017). Recent progress in energy-driven water splitting. *Advanced science*, 4(5), 1600337.
- The Geography of Transport Systems. (2022). The spatial organization of transportation and mobility. *Energy Density of some Combustibles (in MJ/kg)*. <https://transportgeography.org/contents/chapter4/transportation-and-%20%20energy/combustibles-%20energy-content/> adresinden alındı.
- Tucker, M. (2020). Progress in metal-supported solid oxide electrolysis cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 24203-24218.
- Türe, İ. E. (2021). Deniz Taşıtlarında Temiz ve Tükenmez Yakıt. <https://www.virahaber.com/prof-dr-engin-ture-yazdi-de-niz-tasitlarinda-temiz-ve-tukenmez-yakit-hidrojen-60174h.htm> adresinden alındı.
- Türe, İ. E., Tabakoğlu, F. Ö., & Kurtuluş, G. (2006). Economical aspects of sodium borohydride for hydrogen storage. *İstanbul Üniversitesi Dergisi*, 1(2), 23-62.
- Türe, İ. E. (2001). Hidrojen Enerjisi. Temiz Enerji Vakfı. TÜBİTAK. ISBN-975-8547-00-3.
- Türe, İ. E., (2005). Hydrogen Energy Potential of the Black Sea. World Hydrogen Energy Conference, WHEC Yokohama, Japan.
- U.S Department of Energy. (2020). Hydrogen Strategy. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/17/USDOE_FE_Hydrogen_%20Strategy_July2020.pdf adresinden alındı.
- United States Department of Energy. (2022) Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting> adresinden alındı.
- Weber, A., Riess, W., Wenzhoefer, F., & Jørgensen, B. B. (2001). Sulfate Reduction In Black Sea Sediments: In Situ And Laboratory Radiotracer Measurements From The Shelf To 2000m Depth. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(9), 2073-2096. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00006-1)
- Wilkinson, D. P., & Steck, A. E. (1997). General progress in the research of solid polymer fuel cell technology at Ballard.
- Yuan, X. Z., Nayoze-Coynel, C., Shaigan, N., Fisher, D., Zhao, N., Zamel, N., Gazdzicki, P., Ulsh, M., Friedrich, K. A., Girard, F., & Groos, U. (2021). A review of functions, attributes, properties and measurements for the quality control of proton exchange membrane fuel cell components. *Journal of Power Sources*, 491, 229540.
- Zheng, Y., Chen, Z., & Zhang, J. (2021). Solid Oxide Electrolysis of H₂O and CO₂ to Produce Hydrogen and Low-Carbon Fuels. *Electrochemical Energy Reviews*, 4(3), 508-517. [doi: 10.1007/s41918-021-00097-4](https://doi.org/10.1007/s41918-021-00097-4).