



HİDROJEN EKOSİSTEMİ VE ÖNEMİ

Merve Öztürk¹, İbrahim Dinçer²

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarının geliştirilmesi ile fosil kaynaklara olan bağımlılık ve bu kaynakların kullanımını sonucu ortaya çıkan zararlı gaz salımları azaltılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, jeotermal, dalga, rüzgâr, gibi) yeniden kullanılabilme özellikleri ve daha düşük son kullanım gaz salımları ile fosil yakıtların sürdürülebilir seçenekleri olarak görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz doğası nedeniyle enerji depolama sistemlerine gereksinim duyulmaktadır. Bu kaynaklar, elektrik veya kimyasal (hidrojen gibi) enerji formlarında depolanabilmektedir. Elektrik enerjisi formunda depolama yaygın olarak kullanılmakta olup, bir enerji taşıyıcısı olan hidrojenin depolanmasına olan ilgi de gün geçtikçe artmaktadır. Çevreye zararlı salımların azaltılması ve sürdürülebilir enerji yönetimi için hidrojen ve elektriğin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi büyük önem taşır [1].

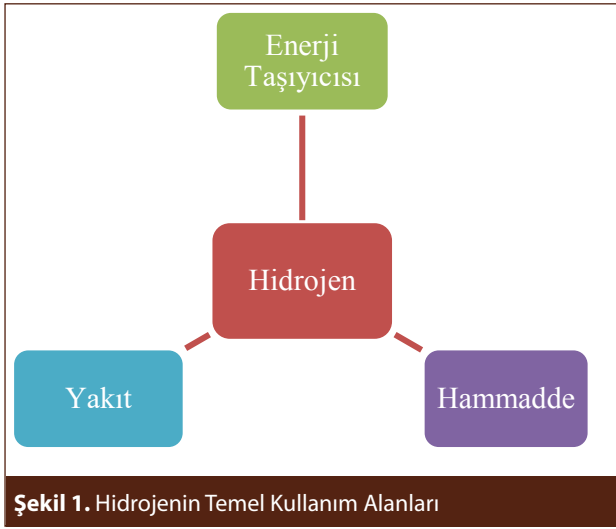
Hidrojen molekülü (H_2), gaz fazındaki iki hidrojen ato-

mundan oluşmaktadır. Kimyasal sembolü H olan hidrojen atomu, periyodik cetveldeki ilk elementtir. Büyük patlama sonrasında oluşan ilk element olan hidrojen evrende en çok bulunan maddedir. Standart atom ağırlığı 1,008 olup atom numarası 1'dir. Bir elektron ve bir protondan oluşur. Dünyada serbest halde bulunmayan hidrojen, birçok metalik olmayan element ile oluşturduğu ortak paylaşımlı (kovalent) bağlı bileşikler nedeniyle organik bileşikler veya su halinde bulunmaktadır. Karbon ile tepkimesi sonucu metanı (CH_4), petrolü ve kömürü oluştururken, oksijen ile tepkimesi sonucu suyu (H_2O) oluşturmaktadır. Ayrıca biyokütle gibi birçok maddenin de içeriğinde yer almaktadır [2]. Hidrojen, standart veya normal şartlarda kokusuz ve renksiz olup çevreye zarar vermeyen ve toksik olmayan bir gazdır [3]. Şekil 1'de gösterildiği üzere hidrojenin temel işlevleri üçlü sac ayağı şeklinde verilebilir. Bunlar enerji taşıyıcısı, hammadde (metanol, amonyak, dimetil eter, etanol gibi diğer kimyasallar ve alternatif yakıtlar için) ve yakıt olarak kullanabilme olasılığıdır.

Hidrojen; doğada yüksek oranda bulunması, çevreye za-

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü - merveoz@yildiz.edu.tr

² Prof. Dr., Ontario Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi ve Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü - Ibrahim.Dincer@ontariotechu.ca



Şekil 1. Hidrojenin Temel Kullanım Alanları

rarlı gaz salımı olmadan, sudan elektroliz yöntemiyle üretilmesi, yüksek dönüşüm verimine sahip olması, Tablo 1’de verildiği gibi diğer yakıtlardan yüksek üst ısıl değere (ÜİD) ve alt ısıl değere (AİD) sahip olması, farklı yöntemlerle depolanabilmesi ve kullanımı sırasında zararlı gaz salımı oluşturmaması nedenleriyle çok önemli bir enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir.

Tablo 1. Üretim Teknolojileri

Yakıt	ÜİD (kJ/g)	AİD (kJ/g)
Hidrojen	141,9	119,9
Metanol	20,0	18,1
Benzin	47,5	44,5
Dizel	44,8	42,5
Metan	55,5	50,0

2. HİDROJEN ÜRETİMİ, DEPOLANMASI VE KULLANIMI

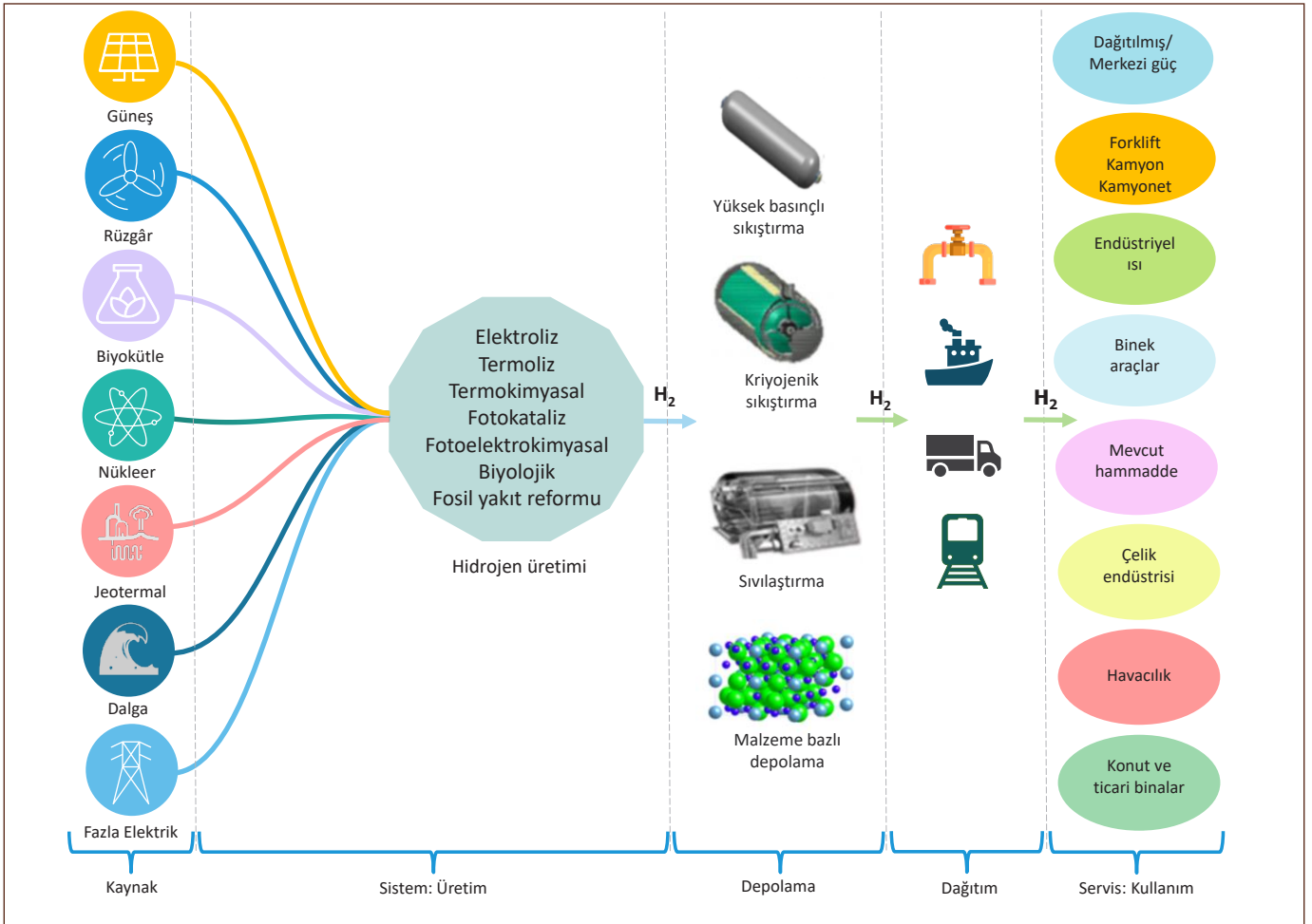
Fosil yakıtlar, su, hidrojen sülfür, biyokütle ve insanların yarattığı çevresel kirlilik sonucundaki (antropojenik) atıklar hidrojen içeren doğal kaynaklardır. Ayrıca insan kaynaklı atıklardan gübre gibi tarım atıkları, üre bulunduran kanalizasyon suları, geri dönüştürülmüş plastik, çöp gazı üreten diğer atıklar ve selülozik malzemeler, hidrojenin çıkarılabileceği diğer kaynaklardır. Fakat bu kaynaklardan hidrojen eldesi sırasında sürdürülebilir enerji kullanmak büyük önem taşır. Hidro, güneş, gelgit, biyokütle, rüzgâr, nükleer ve jeotermal gibi kaynaklar sürdürülebilir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar ile çevreye olan zararlı gaz salımlarını en aza indirerek ısı, elektrik ve radyasyon üretilebilir. Üretilen enerji ile fotokimyasal, elektrokimyasal ve

termokimyasal gibi farklı yöntemler ile de hidrojen elde edilebilir.

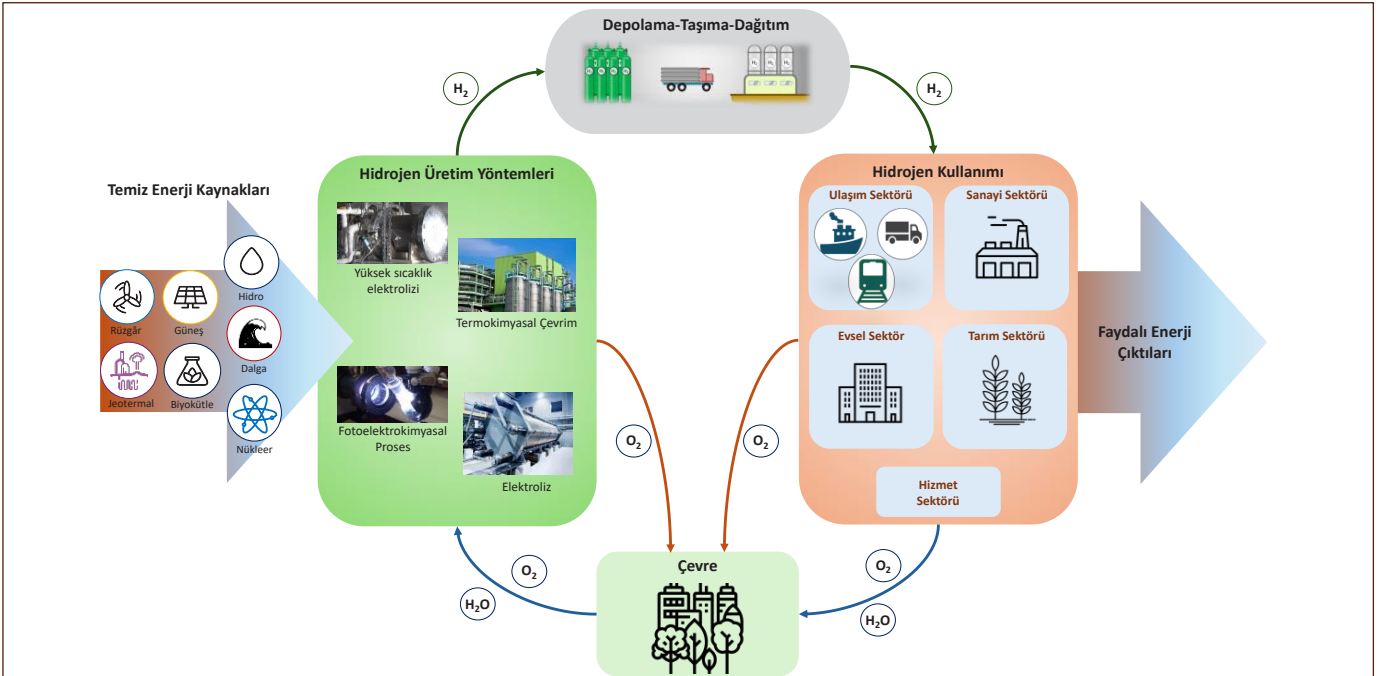
Hidrojen üretiminin amacı; temiz, sürdürülebilir, güvenilir ve uygun maliyetli enerji sistemlerine geçiş yapmaktır. Bu nedenle, fosil yakıtlar yerine temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojenin üretilmesi gerekmektedir. Sürdürülebilir hidrojen eldesi için araştırmada öncelikli alanlar; sistem verimlilikleri, üretim maliyetleri, çevresel etki ve genel sistem güvenilirlikleridir. Karbon içermeyen enerji sistemlerini gerçekleştirmenin hidrojen enerji sistemleri olmadan olası olmadığı çok iyi bilinmektedir. Bu nedenle, olası en yüksek verimlilik ile en düşük üretim maliyeti, sosyal ve çevresel olumlu etkileri olan hidrojen üretim yöntemleri araştırılmalıdır. Hidrojenin fazla elektrik ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi, depolanması, dağıtımı ve kullanım alanları Şekil 2’de gösterilmektedir.

Hidrojen üretiminin genel sorunu, yüksek maliyettir. Amerika Birleşik Devletleri Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojileri Ofisi, temiz hidrojen maliyetinin %80 oranında düşürerek, 1 on yıl içinde 1 kilogram başına 1 ABD doları (“1 1 1”) olmasını amaçlayan “Hydrogen Energy Earthshot” hedefini desteklemektedir. Bu doğrultuda, net sıfır karbon hedefi doğrultusunda 2026 yılına kadar 2 ABD doları/kg ve 2031 yılına kadar 1 ABD doları/kg düzeyinde hidrojen üretebilecek teknolojiler geliştirmeye odaklanmıştır [8].

Şekil 3’te hidrojen enerji ekosistemi gösterilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının süresiz olması ve enerji depolama seçeneklerine gereksinim duyması nedeniyle yenilenebilir kaynaklardan üretilen fazla elektrik, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretiminde kullanılarak depolanabilir [7]. Hidrojen, elektriğe göre daha uzun sürelerde büyük oranlarda depolanabilme özelliğine sahiptir. Hidrojen depolama yöntemleri fiziksel ve malzeme bazlı depolama olmak üzere ikiye ayrılır. Ticari olarak en gelişmiş teknolojiye sahip olan depolama yöntemleri; yüksek basınçlarda sıkıştırma, sıvılaştırma ve bunların beraber uygulandığı hibrit fiziksel depolama yöntemleridir. Günümüzde, 350 ila 700 bar arasında değişen basınçlara dayanıklı yüksek basınçlı hidrojen depolama tankları ticari olarak kullanılmaktadır. Daha yüksek bir yoğunluk değeri elde etmek için ise hidrojen sıvılaştırılarak depolanabilir fakat sıvılaştırma işlemi çok düşük sıcaklıklarda gerçekleşeceği için (-253 °C) enerji tüketimi yüksektir. Malzeme tabanlı yeni hidrojen depolama teknolojileri ise; kimyasal hidrojen depolama malzemeleri (hidrojen taşıyıcı sıvı organikler gibi), sorbentler (karbon nanotüp-



Şekil 2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi, Depolanması, Dağıtımı ve Kullanım Alanları (Kaynak [6]'dan uyarlanmıştır.)



Şekil 3. Hidrojen Enerji Ekosisteminin Genel Görüntüsü

ler, zeolitler ve metalik organik çerçeveler gibi) veya metal hidritlerdir [3].

Hidrojenin kullanım alanı büyük bir çeşitlilik göstermektedir. Bunlar arasında; güç üretimi, ulaşım sektöründe yakıt olarak, doğal gaz hatlarına beslenerek evsel uygulamalarda ve metanol gibi alternatif yakıtların üretilmesinde hammadde olarak kullanımı sayılabilir. Aralarında Hyundai ve Toyota'nın da bulunduğu üreticiler, şu anda başta Kaliforniya olmak üzere hidrojen yakıtının bulunduğu pazarlarda müşterilere satış veya kiralama için yakıt hücreli elektrikli araçları sunmaktadır. 2023 yılında ABD'de 59 hidrojen dolmuş istasyonu bulunmakta olup, bunların çoğunluğu Kaliforniya'da yoğunlaşmış durumdadır. Otobüsler ve malzeme taşıma donanımları için de hidrojen altyapısının geliştirilmesi sürdürülmektedir [9].

3. HİDROJEN ARAŞTIRMA MERKEZİ

Yıldız Teknik Üniversitesi Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü yapısı Şekil 4'te fotoğrafı verilen Hidrojen Araştırma Merkezi kurulmuştur. Bu merkezde, yeşil hidrojen ve diğer seçenek olarak kullanılacak yakıtların üretimi, depolanması, taşınması ve dağıtımı çalışılacak olup; konut, ulaşım ve sanayi gibi sektörlerde hammadde, yakıt ve enerji depolama amaçlı kullanımına yönelik araştırma, yenilikçilik ve ticarileştirme çalışmaları yürütülmektedir. Merkez çalışmaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü araştırmacılarının yer aldığı "Temiz Hidrojen Enerji Teknolojilerinin Geliştirilmesi" adlı

proje ile başlamıştır. Bu proje kapsamında sürdürülebilir sistemlerle bütünleştirilebilecek hidrojen bazlı üretim, depolama ve uygulama teknolojilerinin geliştirilmesi çalışmalarları gerçekleştirilmektedir.

Bu merkezde, hidrojenin fotoelektrokimyasal, fotokatalitik ve fotovoltaik gibi yenilikçi fotoliz yöntemleri ile üretimi konusunda, güneş ışığını simüle edecek bir solar simülatör ile çalışılmaktadır. Suyun ayrıştırılması temel alınarak fotokatalizör geliştirilmesi ve karakterizasyonu ile fotokatalitik hidrojen üretim testleri gerçekleştirilmektedir. Üretilen temiz hidrojenin yüksek basınçlı ve metal hidrür tanklarda depolanması gibi farklı depolama yöntemlerinin kullanımı araştırılmaktadır. Hidrojenin kullanımı amacıyla farklı kapasitelerde hücre ve yığın oluşturulması, karbon korozyonunun azaltılması, yakıt hücresinin çalışma süresinin artırılması, iki boyutlu malzemeler ile katkılanmış yenilikçi anot ve katot sentezi çalışmaları sürdürmektedir. Ayrıca hidrojenin doğal gaz ile karıştırılarak evsel cihazlarda kullanımına yönelik testler de yapılmakta olup, hidrojenin yanma verimine ve çevreye olan zararlı salımlara etkisi araştırılmaktadır (Şekil 5).

Üniversite-sanayi iş birliklerinin kurulması ile, araştırmalar sonucunda elde edilen çıktıların faydalı ürünlere dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Ulusal gereksinimleri göz önüne alarak, temiz enerji kaynakları ve teknolojileri gibi çok disiplinli ve bu alanda ulusal ve uluslararası düzeyde lisansüstü eğitim-öğretim, bilimsel ve uygulamalı araştırmalarıyla, yenilikçilik ve ticarileştirme çalışmaları



Şekil 4. Yıldız Teknik Üniversitesi Yapısı İçinde Kurulan Hidrojen Araştırma Merkezi



Şekil 5. Hidrojen Araştırma Merkezinde Hidrojen ve Doğal Gaz Karışımının Eysel Ocaklarda Test Edilmesi

yapmak, bilimsel, endüstriyel ve sosyal iş birliğini sağlamak, sürdürülebilir eşgüdümü geliştirmek gibi çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Ulusal ve uluslararası bilimsel kuruluşlar, endüstriyel kuruluşlar, kamu kurumları, sivil toplum kurumları, ticari kuruluşlar, araştırma merkezleri, eğitim-öğretim kurumları ve enstitüler gibi farklı kurum ve kuruluşlar ile eğitim, öğretim, araştırma, geliştirme, yenilikçilik, üretim, uygulama ve ticarileştirme hizmetleri gibi konularda iş birliği yaparak hidrojen enerjisi alanında ülkemizin T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" adlı raporunda [10] belirlenen hedefler doğrultusunda yerli teknoloji üretim yeteneğinin geliştirilmesi ve enerjide dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir.

4. SONUÇ

Dünyada artan enerji gereksinimi ve enerji kaynaklarının dünya üzerinde eşit olmayan bir dağılımda olması, ülkeleri yeni sürdürülebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Ayrıca fosil yakıtların sera gazı salımlarına neden olması, bu yakıtların karbonsuzlaştırılması çabalarını da artırmıştır. Bu nedenle hidrojen, çevreye zararlı salımları olmayan bir yakıt ve enerji taşıyıcısı olarak, sürdürülebilir enerjiye geçişte anahtar rol oynamaktadır. Günümüzde hidrojen üretim yöntemlerinin büyük çoğunluğu (%90'dan fazla) fosil yakıt temelli ürünlere ve fosil yakıt temelli enerji girişini kullanmaktadır. Bu oranın fosil yakıt temelli sera gazı salımlarını azaltmak için düşürülmesi hedeflenmektedir. Dünyada en büyük hidrojen enerjisi kullanan sektör, amonyak üretimi sektörüdür. Bunun yanında rafineriler

ve kimya endüstrisi de büyük oranlarda hidrojen tüketimi gerçekleştirmektedir. Hidrojen ekonomisinin gelişmesiyle hidrojen, enerji sektöründe büyük bir pay elde edecektir. Ülkemizde 2023 yılında yayınlanan "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" adlı raporda hidrojen üretim, depolama, dağıtım ve kullanım teknolojileri ile ilgili 2053 yılı hedefleri belirtilmiştir. Bu hedefler, elektrolizör kurulu güç kapasitesini 2030, 2035 ve 2053 yıllarına kadar sırasıyla 2 GW, 5 GW ve 70 GW'a çıkarmak

ve yeşil hidrojen üretim maliyetini 2035 yılında 2,4 ABD doları/kg hidrojen ve 2053 yılına kadar 1,2 ABD doları/kg hidrojen altına düşürmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Acar, C., Dincer, I.** 2014. "Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources", International Journal of Hydrogen Energy, cilt 39, sayı 1, s. 1-12. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.060.
2. Hydrogen Europe. <https://hydrogeneurope.eu/in-a-nutshell/>, son erişim tarihi: 16 Ocak 2024.
3. **Adolf, J. vd.** 2017. "Shell Hydrogen Study. Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂", Shell, Hamburg.
4. **Dincer, I.** 2012. "Green methods for hydrogen production", International Journal of Hydrogen Energy, cilt 37, sayı 2, s. 2. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.173.
5. **Acar, C., Dincer, I.** 2018. "Hydrogen Energy. Comprehensive Energy Systems", Elsevier, s. 568-605.
6. **Dincer, I., Eroğlu, İ., Öztürk, M.** 2021. "Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritası". <https://www.hidrojenteknolojileri.org/blog/turkiye-icin-hidrojen-teknolojileri-yol-haritasi/>, son erişim tarihi: 18 Ocak 2024.
7. IEA, "World Energy Outlook 2016". <https://webstore.iea.org/download/direct/202>, son erişim tarihi: 7 Ocak 2024.
8. U.S. Department of Energy (DOE). <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>, son erişim tarihi: 21 Ocak 2024.
9. U.S. Department of Energy (DOE). https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_stations.html, son erişim tarihi: 21 Ocak 2024.
10. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf, son erişim tarihi: 21 Ocak 2024.