



Süleyman Demirel Üniversitesi

YEKARUM e-DERGİ

(Journal of YEKARUM)



Cilt 8, Sayı 1, 20-31, 2023
E - ISSN:1309-9388

Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi

Halil MUTLUBAŞ^{1*}, Zafer Ömer ÖZDEMİR²

^{1*} Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Organik Kimya, İzmir, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-8079-5290), halil.mutlubas@hotmail.com

² Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Eczacılık Fakültesi, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-8362-3136), ozdemirz@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 25/05/2023 ve Kabul Tarihi 16/07/2023)

ÖZET:

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımı gelecekte önemli bir rol oynayabilir. Geleneksel yakıtların yerini alabilecek ve temiz enerji kaynaklarına yönelik bir alternatif olabilecek hidrojen, birçok sektörde kullanılabilir. Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilerek depolanabilir ve daha sonra enerji üretiminde kullanılabilir. Elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların depolanması ve taşınması için kullanılabilir. Hidrojenin kullanımı enerji sektöründe daha fazla temiz enerjiye erişimi sağlayabilir. Hidrojen ayrıca ulaşım sektöründe de kullanılabilir. Hidrojen yakıtlı araçlar, benzinli ve dizel araçlara alternatif olarak kullanılabilir. Bu araçlar, sıfır emisyonlu taşımacılık için bir seçenek olabilir. Bununla birlikte, hidrojenin depolanması, taşınması ve dağıtım gibi teknolojik zorluklar hala var ve bu zorlukların ele alınması gerekiyor. Hidrojenin enerji sektöründe kullanımı, aynı zamanda enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi çevresel faydalar da sağlayabilir. Hidrojen, fosil yakıtlara kıyasla daha az çevresel etkiye sahip olduğu için, enerji sektöründeki dönüşümün bir parçası olarak daha sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir rol oynayabilir. Sonuç olarak, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımı, temiz enerji kaynaklarına yönelik bir alternatif olarak gelecekte önemli bir rol oynayabilir. Ancak, hidrojenin potansiyelinden tam olarak yararlanmak için teknolojik zorlukların ele alınması ve hidrojenin daha yaygın olarak kullanımı için altyapının geliştirilmesi gerekiyor.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Hidrojen Ekonomisi, Yakıt Hücresi.

Uses of Hydrogen and Hydrogen Economy

ABSTRACT

The use of hydrogen as an energy carrier may play an important role in the future. Hydrogen, which can replace traditional fuels and be an alternative to clean energy sources, can be used in many sectors. Hydrogen can be produced from renewable energy sources and stored and then used in energy production. Hydrogen produced by electrolysis can be used to store and transport renewable resources such as solar and wind energy. The use of hydrogen could provide access to more clean energy in the energy sector. Hydrogen fueled vehicles can be used as an alternative to gasoline and diesel vehicles. These vehicles could be an option for zero emission transport. However, technological challenges such as the storage, transportation and distribution of hydrogen still exist and need to be addressed. The use of hydrogen in the energy sector can also provide environmental benefits such as energy efficiency and reduction of carbon emissions. As hydrogen has less environmental impact than fossil fuels, it can play an important role as part of the energy sector transformation for a more sustainable future. As a result, the use of hydrogen as an energy carrier may play an important role in the future as an alternative to clean energy

* Sorumlu yazar E-mail: halil.mutlubas@hotmail.com

sources. However, to fully exploit hydrogen's potential, technological challenges need to be addressed and the infrastructure developed for more widespread use of hydrogen.

Keywords: *Hydrogen, Hydrogen Economy, Fuel Cell.*

1. GİRİŞ

Enerji, yaşamın sürdürülebilirliği için gerekli olan bir unsurdur. Dünya genelinde nüfusun sürekli artması enerji tüketimini hızlandırmış ve enerjiye olan talebi arttırmıştır. Günümüzde ağırlıklı olarak kullanılan fosil kökenli yakıtların tükenebilir olması, CO₂ salımı yapması ve bölgesel kaynaklar olmasından dolayı yeni enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir kaynaklar kullanılmaya başlanmış ve yenilenebilir teknolojiler her geçen gün gelişmeye başlamıştır [1].

Yenilenebilir kaynakların kullanımı esnasında bazı kısıtlamalar bulunmakla birlikte, bu kısıtlamalar hidrojen kullanımı ile giderilebilmektedir. Hidrojen tek başına kullanılan bir kaynak değildir. Diğer enerji kaynakları ile kullanılan ve genellikle enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilen hidrojen; ulaşım alanında, güç tesislerinde, yakıt hücrelerinde, içten yanmalı motorlarda kullanılır [2].

Hidrojenin fiziksel özellikleri; renksiz, kokusuz ve tadı olmayan bir elementtir. Toksik özelliği bulunmaz. Ametaldir ve yanıcı bir gazdır. Hidrojen gazı 1 atm basınçta -252,77 °C sıvı forma geçer. Sıvı formda bulunan hidrojenin hacmi, gaz fazın 1/700 kat hacmine denk gelir. Hidrojenin kimyasal özellikleri ise; oksijen ile birleşerek yanıcı bir reaksiyon oluşur. Ürün olarak su meydana gelir. Birçok ametal ile kovalent bağ yaptığı için doğada moleküler yapıda bulunur [3].

Doğada en çok bulunan elementler arasında yer alan hidrojen çeşitli sektörlerde kullanılır. Bunlar arasında, endüstriyel üretim süreçleri, evlerde ve iş yerlerinde ısıtma, enerji depolama ve taşıma yer alır. Ayrıca, hidrojen yakıtlı araçlar, geleneksel benzinli ve dizel araçlara alternatif olarak kullanılabilir ve sıfır emisyonlu taşımacılık için bir seçenek olabilir [4].

Hidrojen, enerji depolama ve taşıma için bir seçenek olabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinin düzenli aralıklarla üretilebildiği ancak talep edilmediği zamanlarda depolanması gerekmektedir. Hidrojen, bu amaçla kullanılacak bir enerji depolama yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen, elektrik enerjisine dönüştürülebilir ve daha sonra hidrojen yakıt pilleri aracılığıyla elektrik enerjisi olarak geri dönüştürülebilir [5].

Ancak, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımını hala bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Hidrojenin üretimi, depolanması ve taşınması, teknolojik olarak zorlu bir süreçtir. Hidrojen, endüstriyel işlemler veya elektroliz yoluyla üretilir, ancak bu süreçlerin enerji yoğunluğu yüksektir ve genellikle fosil yakıtların kullanımını gerektirir [6]. Bu çalışmada hidrojen üretim yöntemlerinden, hidrojen yakıt hücrelerinden ve hidrojen ekonomisinden bahsedilecektir.

2. HİDROJEN ÜRETİMİ







Hidrojen, temiz enerji kaynaklarına yönelik alternatif bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bunun nedeni, hidrojenin yanma sonucu sadece su ve enerji üretmesidir. Hidrojen gazının üretimi, birçok farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, hidrojen gazının üretildiği kaynağa, üretim prosesi ve kullanılan enerji kaynağına bağlı olarak değişmektedir.

Hidrojen gazının üretim yöntemleri arasında, su elektrolizi, hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi, biyokütle gazlaştırma ve fotokatalitik hidrojen üretimi yer almaktadır. Su elektrolizi, elektrik enerjisi kullanarak sudan hidrojen gazı üretmektedir [7]. Hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi, doğal gaz, nafta veya LPG gibi hidrokarbon kaynaklarından hidrojen gazı üretmektedir [8]. Biyokütle gazlaştırma, organik atıkların yakılması sırasında hidrojen gazı üretmektedir [9], [10]. Fotokatalitik hidrojen üretimi ise güneş enerjisi kullanarak hidrojen gazı üretmektedir [11]. Su elektrolizi, hidrojen gazı üretimi için en yaygın kullanılan yöntemdir [12]. Ancak, su elektrolizi sırasında kullanılan elektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmadığı sürece hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak konumunu zayıflatmaktadır [13].

Hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi, hidrojen gazının sanayi ölçeğinde üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi sırasında CO₂ emisyonu meydana gelmektedir ve bu, hidrojenin çevre dostu bir enerji kaynağı olarak konumunu zayıflatmaktadır [14]. Biyokütle gazlaştırma yöntemi, organik atıkların yakılması sırasında hidrojen gazı üretir ve atık yönetimi sorunlarına çözüm olabilir. Fotokatalitik hidrojen üretimi ise yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisini kullanarak hidrojen gazı üretir ve çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkar [15].

Daha geniş tanımla, hidrojen üretiminde birincil enerji kaynağı gereklidir. Kullanılan kaynakların çeşidine göre hidrojenin üretim yöntemleri de farklılık gösterir. Şekil.1’de kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri gösterilmektedir. Hidrojen, yenilenebilir

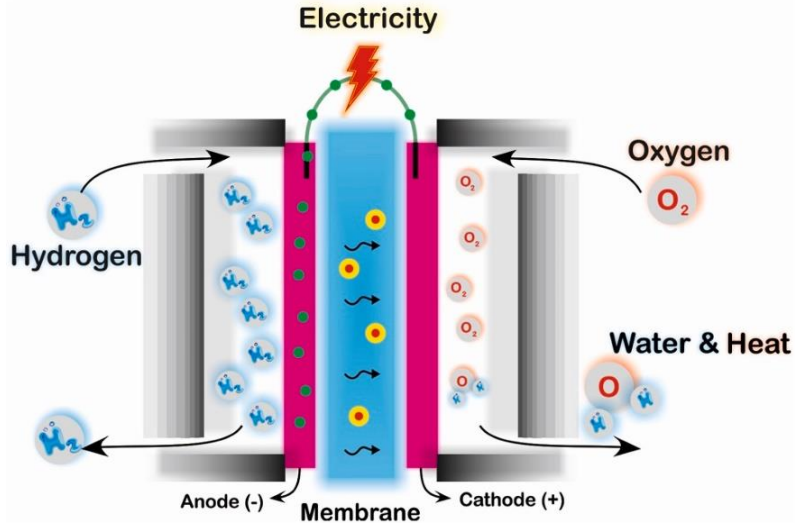
kaynaklardan elde edilirse “yeşil hidrojen” olarak tanımlanır [16]. Fosil kökenli yakıtların kullanımıyla CO₂ tutma sistemleriyle elde edilen hidrojene “mavi hidrojen” denir. Fosil kökenli yakıtlar kullanılarak CO₂ salımı olmadan elde edilen hidrojene ise “turkuaz hidrojen” denir. Nükleer kaynakların kullanımı ile üretilen hidrojen de “pembe hidrojen” olarak isimlendirilir. “Gri hidrojen” ise doğal gazın yeniden yapılandırılması (reformasyonu) sonucu elde edilir. Son olarak termokimyasal dönüşüm teknolojilerinden gazlaştırma yöntemiyle üretilen hidrojene ise “kahverengi hidrojen” denir [17].

Teknoloji	Birincil Enerji/Elektrik Kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO ₂ /kgH ₂)	Maliyeti (ABD doları/kgH ₂)
 Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
 Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
 Piroliz	Fosil yakıt	<3	1,25-2,20
 Buhar metan reformlama (karbon yakalama ile)	Doğal gaz, kömür	<4	1,5-3,00
 Buhar metan reformlama (karbon yakalamadan)	Doğal gaz	8-10	0,5-1,70
 Gazlaştırma	Kömür	>20	1,0-2,2

Şekil 1 Hidrojen üretim yöntemleri [18]

3. HİDROJEN YAKIT HÜCRESİ

Kimyasal enerjinin elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere yakıt hücreleri denir. Elektrolit membran, anot ve katot olmak üzere üç ana bileşenden oluşan yakıt hücreleri yüksek verimlilik ile çalışır. Anot ve katot kısımlarda gerçekleşen reaksiyonlar sonucu elektrik enerjisi oluşur [19]. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi iyon pillere benzer ancak sürekli olarak bir yakıtle beslemeye ihtiyaç duyarlar. Şekil.2’de yakıt hücresinin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2 Yakıt hücresinin yapısı [20]

Çalışma prensibi; anot bölgesinden hidrojen, katot bölgesinden oksijen girer. Hidrojen, yakıt hücresi katmanlarından geçerken proton ve elektronlara ayrılır. Elektrolit elektron geçişinin engeller ve sadece protonların katot bölgesine geçmesini sağlar. Elektronlar ise başka bir devre aracılığıyla elektrik akımı ve ısı üretir. Katot bölgesinde ise harici devreden gelen elektron ve hidrojenin protonları oksijen reaksiyona girerek su oluşturur.

Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi, çevre dostu bir enerji üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır [21]. Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi, düşük karbon salımı nedeniyle çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Hidrojen yakıt hücresinin avantajları arasında yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük işletme maliyetleri ve sıfır emisyon bulunmaktadır. Hidrojen yakıt hücresinin dezavantajları arasında yüksek üretim maliyeti, hidrojen gazının depolanması ve taşınması sırasında güvenlik sorunları bulunmaktadır [22].

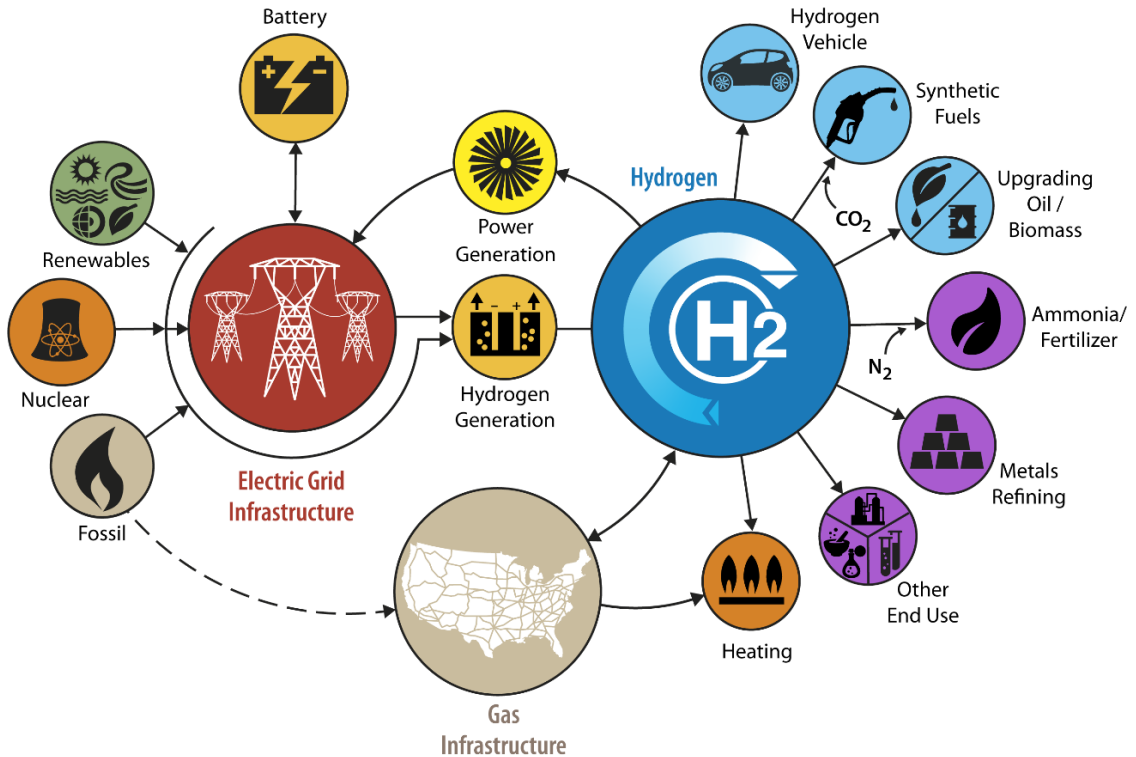
Hidrojen yakıt hücresi, farklı türlerde üretilebilmektedir. Bunlar arasında proton değişim membranlı (PEM), katı oksit (SOFC) ve karışık yakıt (MCFC) yakıt hücreleri yer almaktadır. PEM yakıt hücreleri, düşük işletme sıcaklığı nedeniyle özellikle taşıt uygulamaları için uygundur [23]. SOFC yakıt hücreleri, yüksek sıcaklıklarda işletilebilir ve çeşitli uygulamalar için kullanılabilir [24]. MCFC yakıt hücreleri, fosil yakıtların yanı sıra biyokütleyi de kullanarak hidrojen gazı üretebilir ve bu nedenle enerji kaynaklarının çeşitliliğine olanak tanır [25].

Yakıt pilleri genellikle taşıt uygulamalarında kullanılır. Otomotiv firmaları yakıt pilleri teknolojilerini geliştirmek için büyük yatırımlar yapmaktadır. Yakıt pilleri yüksek verimlilik ile çalışan, çevreyi kirlenmeyen ürünler oldukları için ulaşım sektörü için avantaj oluştururlar.

4. HİDROJENİN ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK ROLÜ

Hidrojen taşıyıcı olarak açık denizlerde elde edilen elektriğin depo edilmesi ve güvenli olarak iletilmesinde kullanılabilir. Okyanuslarda bulunan rüzgâr çiftlikleri ürettiği elektrik ve gelgit hareketiyle üretilen okyanus altındaki santrallerden üretilen elektrik, hidrojen ile güvenilir olarak taşınabilir. Açık denizlerde elde edilen elektriğin depolanması, elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen ile mümkün hale gelir. Elektroliz olayı, suyun hidrojen ve oksijene ayrışmasıdır. Bu ayrışmayla hidrojen gazı depolama tanklarında ya da iletim hatlarında taşınabilir [26].

Hidrojenin yüksek enerji yoğunluğu sayesinde uzun süre taşınabilir ve saklanabilir. Mevcut boru iletim hatları da hidrojenin taşınmasında kullanılabilir. Hidrojen yakıtlı araçlarda, endüstriyel uygulamalarda, ısıtmada, gübrelemede ve birçok sektörde kullanılabilir. Şekil.3'te hidrojenin üretim ve kullanım şekilleri gösterilmektedir [27]. Okyanuslarda üretilen elektriğin depo edilmesinde, iletilmesinde ve tüketilmesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını sağlamak için hidrojen kullanılır. Hidrojen enerji arzının dengeler. Hidrojen sistemlerinin alt yapısının iyileştirilmesi gerekmektedir. Hidrojen ekonomi modelleri oluşturularak alt yapı sistemleri desteklenebilir. Hidrojenin kullanımı karbon ayak izini azaltıp, enerji sektöründe sürdürülebilirlik sağlayabilir [28].



Şekil 3 Hidrojenin üretimi, kullanımı ve taşıyıcı olarak rolü [29]

4. HİDROJEN EKONOMİSİ

İklim krizi, yenilenen enerji güvenliği ve jeopolitik önemi ile ekonomik çıkarlar, hidrojen ekonomisine olan ilgiyi artırmaktadır. Henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen, mali ve siyasi taahhütler göz önüne alındığında, hidrojen ekonomisinin hızla gelişme potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte, birçok bilim insanı, hidrojen ekonomisi üzerine sosyal değerlendirmelerin önemli ölçüde eksik olduğunu belirtmiştir [30].

Ülkeler için enerji kaynaklarına sahip olmak ekonomik bağımsızlığın göstergesidir. Uluslararası ilişkiler enerji temini, arzı, güvenliği gibi politikalar üzerine kuruludur. Dünya genelinde kullanılan enerji kaynakları temel olarak üç sınıfa ayrılır. Bunlar; fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji kaynaklarıdır. Enerji türündeki çeşitlilik endüstride ve günlük kullanımda geniş yer kapladığı için ekonomik faaliyetlerin temelinde yer alır [31].

Enerji ekonomisi, var olan enerji kaynaklarının ekonomik faaliyetlerle olan etkileşimini inceler. Ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtların CO₂ salımı yapması, tükenbilir olması, sera gazı emisyonları oluşturması gibi sebeplerle karbon salımını, hava kirliliğini, asit yağmurlarını azaltacak enerji kaynaklarının kullanılması sağlanarak hidrojen ekonomisine geçiş yapılması hayati önem arz etmektedir [32].

Bir operasyonel hidrojen ekonomisinin gerçekleştirilmesi, teknik altyapı ve halk desteği gerektirir. Hidrojen ekonomisine toplumun kabul edilmesini değerlendirmek, halkın desteğini anlamak ve sonuç olarak hidrojen teknolojisi ve altyapı uygulamalarına karşı isteksizlikleri önlemek önemlidir [33], [34]. Hidrojen, enerji taşıyıcısı olarak işlev gören bir bileşiktir ve üretimi, depolanması, taşınması ve enerji ağı içinde dağıtımını gibi çeşitli süreçler gerektirir [35]. Halkın algısı ve kabulü, hidrojen tedarik zincirindeki her bir adımdan etkilenebilir çünkü hidrojen üretmek ve depolamak için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu nedenle, halkın hidrojeni bir sistem perspektifinden algılamasını ve kabul etmesini değerlendiren ulusal çalışmalarda bir eksiklik mevcuttur [36], [37].

Türkiye’de yapılan bir çalışmada, “fen öğretmeni adaylarının hidrojeni geleceğin enerji taşıyıcısı olarak görüşleri” konulu yapılan bir araştırmada, fen öğretmeni adaylarının hidrojenle ilgili yeterli bilgiye sahip olmadıkları görülmektedir. Hiçbiri “hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olduğu, kaynak olmadığı” veya “hidrojenin elektrige benzediği” gibi ifadelerden bahsetmemiştir. Bu nedenle, ilkökul öğrencilerinin ilham almasında öğretmenlerin büyük etkisi olduğu düşünüldüğünde, öğretmen yetiştiren eğitim fakülteleri, donanımlı bir şekilde mezun olan öğretmenleri yetiştirmekle sorumludur. On ilkökul fen öğretmeni adayıyla yapılan nitel

analiz sonuçlarına göre, deney grubundaki adayların kontrol grubundaki adaylara göre hidrojen konusunda daha bilinçli oldukları görülmüştür [38].

5. SONUÇ

Son yıllarda artan küresel ısınma, sera gazı emisyonları ve çevre kirliliğinin temelinde fosil yakıtların kullanımı yatar. Çevresel problemleri çözmek ve enerji bağımlılığı azaltabilmek için enerji taşıyıcı olarak, yakıt olarak kullanılabilen hidrojen ekonomisine geçiş sağlamak için atılımlar yapılmalıdır. Ekonomik bağımsızlık için hidrojenin yakıt olarak kullanımı sağlanmalıdır. Üretim-dağıtım-depolama sistemleri geliştirilmelidir. Yeni iş sahaları oluşturularak istihdam artırılabilir. Elde edilen sonuçlara göre hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak kullanımı, gelecekte için umut vericidir. Hidrojenin üretimi, depolanması ve taşınması konusunda yaşanan zorluklar, yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesiyle birlikte çözülmeye başlamıştır. Günümüzde, hidrojenin üretimi için fotokatalitik yöntemler, biyokütle gazlaştırma, elektroliz ve hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi gibi farklı teknolojiler kullanılmaktadır.

Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi de çevre dostu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük işletme maliyetleri ve sıfır emisyon gibi avantajlarıyla hidrojen yakıt hücresi, farklı türlerde üretilen PEM, SOFC ve MCFC gibi yakıt hücreleriyle birlikte, gelecekte enerji sektöründe daha fazla kullanılmaya başlanabilir.

Hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak konumunu güçlendirmek için, teknolojik gelişmelerin yanı sıra politik ve ekonomik faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Hidrojen ekonomisini toplumun benimsemesi, halkın desteği ve hidrojen teknolojisi ve altyapı uygulamalarına karşı olumsuz tavırlara karşı gerekli girişimlerde bulunmak önemlidir. Bu nedenle, hidrojen ekonomisi konusunda dünya genelindeki ülkelerin iş birliği yaparak ortak bir strateji geliştirmeleri ve bu alanda yatırım yapmaları gerekmektedir.

Sonuç olarak, hidrojen, temiz bir enerji kaynağı olarak gelecekte enerji sektöründe daha fazla kullanılabilir hale gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesi ve teknolojik gelişmelerin yanı sıra politik ve ekonomik faktörlerin de dikkate alınması, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi için önemlidir. Bu sayede, fosil yakıtların yerine temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan hidrojenin kullanımını artabilir ve dünyamızın geleceği için daha iyi bir çevre sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, and D. Hissel, “Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111180, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111180.
- [2] A. Zahedi, H. A. Z. AL-bonsrulah, and M. Tafavogh, “Conceptual design and simulation of a stand-alone Wind/PEM fuel Cell/Hydrogen storage energy system for off-grid regions, a case study in Kuhin, Iran,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103142, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103142.
- [3] T. Yusaf *et al.*, “Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review,” *Int J Hydrogen Energy*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.02.086.
- [4] M. D. Scovell, “Explaining hydrogen energy technology acceptance: A critical review,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 19, pp. 10441–10459, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.099.
- [5] A. V. Vorontsov and P. G. Smirniotis, “Advancements in hydrogen energy research with the assistance of computational chemistry,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 40, pp. 14978–14999, May 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.12.356.
- [6] S. Salahshoor and S. Afzal, “Subsurface technologies for hydrogen production from fossil fuel resources: A review and techno-economic analysis,” *Int J Hydrogen Energy*, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.08.202.
- [7] S. Z. Zhiznin, N. N. Shvets, V. M. Timokhov, and A. L. Gusev, “Economics of hydrogen energy of green transition in the world and Russia.Part I,” *Int J Hydrogen Energy*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.069.
- [8] Y. Woo, J. M. Park, J. W. Bae, and M. J. Park, “Kinetic modeling of the steam reforming of light hydrocarbon mixture from waste resources: Effects of gas composition on hydrogen production,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 41, pp. 15383–15391, May 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.01.050.
- [9] İ. Üçgül and G. Akgül, “Biyokütle Teknolojisi,” *YEKARUM DERGİ*, vol. 1, no. 1, pp. 3–11, 2010.
- [10] M. M. Soltani, P. Ahmadi, and M. Ashjaee, “Techno-economic optimization of a biomass gasification energy system with Supercritical CO₂ cycle for hydrogen fuel and electricity production,” *Fuel*, vol. 333, p. 126264, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.FUEL.2022.126264.
- [11] W. Shi *et al.*, “Realization of photocatalytic hydrogen production by optimizing energy band structure and promoting charges separation over the S-doped CoFe₂O₄ microrods,” *Mater Today Commun*, vol. 35, p. 105588, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2023.105588.

- [12] D. Li, J. Tu, Y. Lu, and B. Zhang, “Recent advances in hybrid water electrolysis for energy-saving hydrogen production,” *Green Chemical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 17–29, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.GCE.2022.11.001.
- [13] S. F. Ahmed *et al.*, “Sustainable hydrogen production: Technological advancements and economic analysis,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 88, pp. 37227–37255, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.12.029.
- [14] R. El Mrabet and A. Berrada, “Hydrogen production and derivatives from renewable energy systems for a best valorization of sustainable resources,” *Hybrid Energy System Models*, pp. 343–363, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-821403-9.00010-X.
- [15] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, “Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 850–866, May 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.112.
- [16] Q. Hassan, A. Z. Sameen, H. M. Salman, M. Jaszczur, M. Al-Hitmi, and M. Alghoul, “Energy futures and green hydrogen production: Is Saudi Arabia trend?,” *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101165, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101165.
- [17] F. Pruvost, S. Cloete, C. Arnaiz del Pozo, and A. Zaabout, “Blue, green, and turquoise pathways for minimizing hydrogen production costs from steam methane reforming with CO₂ capture,” *Energy Convers Manag*, vol. 274, p. 116458, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116458.
- [18] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası,” 2023.
- [19] N. A. Al-Mufachi and N. Shah, “The role of hydrogen and fuel cell technology in providing security for the UK energy system,” *Energy Policy*, vol. 171, p. 113286, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.ENPOL.2022.113286.
- [20] P. Ahmadi, M. Raeesi, S. Changizian, A. Teimouri, and A. Khoshnevisan, “Lifecycle assessment of diesel, diesel-electric and hydrogen fuel cell transit buses with fuel cell degradation and battery aging using machine learning techniques,” *Energy*, vol. 259, p. 125003, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.125003.
- [21] Y. Lee, M. C. Lee, and Y. J. Kim, “Barriers and strategies of hydrogen fuel cell power generation based on expert survey in South Korea,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 9, pp. 5709–5719, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.212.
- [22] Z. Fu *et al.*, “Fuel cell and hydrogen in maritime application: A review on aspects of technology, cost and regulations,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103181, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103181.
- [23] M. Atif Mahmood *et al.*, “Sensitivity analysis of performance and thermal impacts of a single hydrogen fueled solid oxide fuel cell to optimize the operational and design

- parameters,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103241, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103241.
- [24] T. Hai *et al.*, “Comparison analysis of hydrogen addition into both anode and afterburner of fuel cell incorporated with hybrid renewable energy driven SOFC: An application of techno-environmental horizon and multi-objective optimization,” *Int J Hydrogen Energy*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.02.016.
- [25] Q. Ding, M. Zhang, and H. Huang, “Biomass-derived carbon immobilized ultrafine Pt nanoparticle as a highly efficient catalyst for hydrogen fuel cell,” *Mater Lett*, vol. 333, p. 133675, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.MATLET.2022.133675.
- [26] D. Berstad, S. Gardarsdottir, S. Roussanaly, M. Voldsund, Y. Ishimoto, and P. Nekså, “Liquid hydrogen as prospective energy carrier: A brief review and discussion of underlying assumptions applied in value chain analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, p. 111772, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111772.
- [27] F. Scheller, S. Wald, H. Kondziella, P. A. Gunkel, T. Bruckner, and D. Keles, “Future role and economic benefits of hydrogen and synthetic energy carriers in Germany: a review of long-term energy scenarios,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103037, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103037.
- [28] C. Chu, K. Wu, B. Luo, Q. Cao, and H. Zhang, “Hydrogen storage by liquid organic hydrogen carriers: Catalyst, renewable carrier, and technology - A review,” *Carbon Resources Conversion*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.CRCON.2023.03.007.
- [29] K. Epstein, “Hydrogen: The Energy Carrier of the Future,” May 23, 2023. <https://eta.lbl.gov/news/hydrogen-energy-carrier-future> (accessed May 23, 2023).
- [30] K. J. Dillman and J. Heinonen, “A ‘just’ hydrogen economy: A normative energy justice assessment of the hydrogen economy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112648.
- [31] M. I. Khan and S. G. Al-Ghamdi, “Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: A SWOT analysis considering current situation, challenges, and prospects,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 28, pp. 10315–10344, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.12.033.
- [32] J. D. Hunt *et al.*, “Solid air hydrogen liquefaction, the missing link of the hydrogen economy,” *Int J Hydrogen Energy*, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.405.
- [33] M. Ricci, P. Bellaby, and R. Flynn, “What do we know about public perceptions and acceptance of hydrogen? A critical review and new case study evidence,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 21, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.106.

- [34] M. D. Scovell, “Explaining hydrogen energy technology acceptance: A critical review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 19. 2022. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.01.099.
- [35] IEA, “Offshore Wind Outlook 2019,” 2019.
- [36] K. Itaoka, A. Saito, and K. Sasaki, “Public perception on hydrogen infrastructure in Japan: Influence of rollout of commercial fuel cell vehicles,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 11, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.123.
- [37] J. Yap and B. McLellan, “Evaluating the attitudes of Japanese society towards the hydrogen economy: A comparative study of recent and past community surveys,” *Int J Hydrogen Energy*, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.05.174.
- [38] Y. E. Yüksel, “Elementary science teacher candidates’ views on hydrogen as future energy carrier,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 20, pp. 9817–9822, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.009.