



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.10.2024  
Kabul Tarihi : 17.11.2024

Received Date : 10.10.2024  
Accepted Date : 17.11.2024

## HİDROJEN: SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ İÇİN ÇOK YÖNLÜ ÇÖZÜM

### HYDROGEN: A VERSATILE SOLUTION FOR SUSTAINABLE ENERGY

Elif DAŞ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-3149-6016)  
Emine TEKE ÖNER<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0003-3365-7378)

<sup>1</sup> Atatürk Üniversitesi, Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Erzurum, Türkiye  
<sup>2\*</sup> Atatürk Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Emine TEKE ÖNER, [eemineteke@gmail.com](mailto:eemineteke@gmail.com)

### ÖZET

Fosil yakıtların büyük ölçüde tükenmesi, atmosferdeki karbondioksit seviyesinin artması ve buna bağlı olarak gelişen çevresel tehlikeler insanlık için giderek artan bir endişe kaynağıdır. Bu nedenle son yıllarda hidrojen ekosisteminin kurulmasına yönelik önemli çabalar sarf edilmektedir. Hidrojen, sıfır veya sıfıra yakın emisyonla üretilen, yüksek verimle enerji dönüşümü sağlayabilen bir enerji taşıyıcısıdır. Öte yandan, ulaşım, ısınma ve enerji üretimi gibi farklı alanlarda çok yönlü olarak kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Hidrojen, mavi, yeşil, gri gibi farklı üretim yöntemleriyle elde edilmektedir. Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiğinden çevre dostu bir seçenek sunmaktadır. Ancak, mevcut durumda hidrojen ekonomisinin gelişimi ve yaygın kullanımıyla ilgili birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklar arasında üretim maliyetleri, depolama ve taşıma teknolojilerinin geliştirilmesi, altyapı entegrasyonu ve güvenlik önlemleri gibi konular yer almaktadır. Bu bağlamda, Dünya genelinde birçok ülke hidrojenin enerji dönüşümündeki rolünü değerlendirerek kendi yol haritalarını oluşturmuşlardır. Bu yol haritalarıyla ülkeler, ulusal enerji bağımsızlığını, çevresel sürdürülebilirliği ve ekonomik büyümeyi desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu mini derleme kapsamında da sürdürülebilir bir enerji geleceği için hidrojenin rolü ele alınmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrojen ekonomisi, sıfır emisyon, sürdürülebilirlik, temiz enerji

### ABSTRACT

The massive depletion of fossil fuels, increasing level of carbon dioxide in the atmosphere and the associated environmental hazards are a growing concern for humanity. That is why significant efforts have been made in the last few decades to build a hydrogen ecosystem. Hydrogen is a highly efficient energy carrier that can lead to zero or near-zero emissions. On the other hand, it has the potential to be used versatilely in different areas such as transportation, heating and energy generation. Hydrogen is obtained through different production methods such as blue, green and grey. Green hydrogen offers an environmentally friendly option when produced from renewable energy sources. However, there are currently a number of challenges to the development and widespread use of the hydrogen economy. These challenges include production costs, development of storage and transportation technologies, infrastructure integration and security measures. In this context, many countries around the world have created their own roadmaps by assessing the role of hydrogen in the energy transition. With these roadmaps, countries aim to promote national energy independence, environmental sustainability and economic growth. This mini-review covers the role of hydrogen for a sustainable energy future.

**Keywords:** Hydrogen economy, zero emission, sustainability, clean energy

## GİRİŞ

Son yıllardaki nüfus artışı, ekonomik gelişme ve teknolojide geline son nokta küresel enerji tüketiminde istikrarlı bir artış ile sonuçlanmıştır. Günümüzde elektrik, ulaşım ve konut hizmetleri için birincil enerji kaynağı olarak petrol, doğal gaz ve kömür içeren fosil yakıtlar kullanılmaktadır (Vidas & Castro, 2021). Milyonlarca yıllık doğal süreçler sonucunda organik maddelerden elde edilen bu fosil yakıtlar, sosyal ve ekonomik kalkınmanın en temel girdilerinden biri olan enerji için büyük önem arz etmekte ve küresel kalkınmada oldukça etkili rol oynamaktadır. Bu yakıtların belirli rezervlerle sınırlı olması uzun vadede enerji güvenliğini tehdit etmektedir (Sarker vd., 2023). Biyokütle, rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklara kıyasla nispeten düşük maliyetleri nedeniyle kullanımları oldukça cazip görülse de (Sarker vd., 2023) fosil yakıtların yanması sonucu oluşan sera gazlarının atmosfere salınması çağımızın en büyük sorunları haline gelmiş küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi hayati önem arz eden çevre sorunlarına sebebiyet vermektedir (Hydrogen Insights, 2022). Birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülke bu alanda yapılan çalışmaları desteklemekte ve enerji verimliliğinin artması için yoğun çaba sarf etmektedir. Yapılan bilimsel araştırmalar enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyon oranının artarak devam edeceğini ve bu durumun dünya sıcaklığındaki öngörülen artış oranının üstünde bir değer ile sonuçlanacağını ortaya koymaktadır. Dünya sıcaklığında ortalama 2 °C'lik artış olması, milyonlarca insanı açlığa, sıtmaya, sel felaketlerine ve tatlı su kıtlığına maruz bırakacak çok ciddi bir sorundur. Dünya geleceğini tehdit eden bu durum karşısında atmosfere salınan sera gazlarının azaltılması için alınabilecek tedbirler arasında fosil kaynaklı enerji kullanımının azaltılması oldukça etkin bir yaklaşımdır (Öner, E. T., & Yurtcan, A. B., 2023). Bu nedenle, fosil yakıtların sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynakları veya yakıtlarıyla değiştirilmesi son yıllarda önemli bir hedef haline gelmiştir (European Commission, 2020; Ishaq & Dincer, 2021). Yenilenebilir enerji kaynakları, çevre üzerine olumsuz etkisi geleneksel enerji üretim yöntemlerine göre daha az olan ve karbon emisyonunun neredeyse sıfır olduğu temiz enerji kaynaklarıdır. Karbon içermeyen bir yakıt olarak, hidrojen, geleceğin enerjisi için en umut verici enerji taşıyıcısı haline gelmiştir. Hidrojenin kütle bazında mükemmel bir kalorifik değeri vardır bu da onu çeşitli alanlarda kullanılması için çekici bir yakıt haline getirmektedir. (Zhang vd., 2024).

Hidrojen elementi 1766'da İngiliz bilim adamı Henry Cavendish tarafından keşfedilmesine karşın, bu elemente "su oluşturu" anlamına gelen "hidrojen" adı 1783 yılında Fransız kimyacı Antoine Lavoiser tarafından verilmiştir (Dawood vd., 2023). Evrende en bol bulunan molekül olmasına rağmen metalik olmayan elementlerin çoğuyla kolayca bileşik oluşturduğundan Dünya'daki hidrojen büyük oranda su veya organik bileşiklerin yapısında moleküler formlarda bulunmaktadır (Elshafei & Mansour, 2023). 1874 yılında, Jules Verne'nin "su geleceğin kömürü olacaktır" ifadesi, günümüzde hidrojenin enerji anlamındaki önemini vurgulayan güçlü bir öngörü temsil etmektedir (Zohuri, 2016). Öyle ki, hidrojen, tarih boyunca çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir element olmuştur. Ayrıca sahip olduğu yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle diğer birçok yakıtta göre daha fazla enerji (birim kütle başına) taşımaktadır (Vidas & Castro, 2021; Osman vd., 2022). Bu nedenle, son yıllarda, temiz enerji taleplerini karşılamak, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmek ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için kritik öneme sahiptir (Dash vd., 2023; Ishaq & Dincer, 2020). Hidrojen, bilinenin aksine bir enerji kaynağı olmayıp herhangi bir birincil enerji kaynağından elde edilebilen ikincil bir enerji taşıyıcısıdır (Zohuri, 2016; Vidas & Castro, 2021). Sahip olduğu birçok özellik nedeniyle temiz ve sürdürülebilir enerji için önemli bir oyuncu olarak görülmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimine büyük ilgi gösterilmektedir (Acar & Dincer, 2019). Bu nedenle, hidrojen üretim yöntemlerinin etkinliği, çevresel etkileri ve ticarileşmesi üzerine yürütülen çalışmalar her geçen gün hızla artmaktadır.

Literatür incelendiğinde hidrojen bazlı enerji sistemlerini konu alan araştırmaların temel olarak, hidrojen üretimi, depolanması, güvenliği ve kullanımı üzerine dört temel kriterin değerlendirilmesi şeklinde olduğu görülmektedir (Sadeq vd., 2023). Bu çalışmada hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretim yöntemleri ve bu yöntemlerde karşılaşılan zorluklar, küresel ölçekte hidrojen ekonomisi, hidrojenin güvenilirliği ve Türkiye'nin hidrojen teknolojileri açısından ihtiyaçları ve bu ihtiyaçları karşılayacak teknolojik/destekleyici çözümler ele alınmaktadır.

### ***Hidrojenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri***

İdeal bir alternatif yakıt, ucuz, kullanımı kolay, temiz ve daha düşük karbon içeriğine sahip olmalıdır. Mevcut alternatifler arasında hidrojen, ideal bir yakıt için gerekli kriterlerin çoğunu karşılayan en umut verici seçenek olarak öne çıkmaktadır (Coleman vd., 2020; Hanusch & Schad, 2021; Capurso vd., 2022). Hidrojen, sembolü H, atom numarası 1, moleküler ağırlığı 1,00794 olan periyodik tablodaki en hafif elementtir. Standart sıcaklık ve basınçta (STP), H<sub>2</sub> moleküler formülüne sahip, renksiz, kokusuz, tatsız, toksik olmayan ve yüksek derecede yanıcı diatomik

bir gazdır. Hidrojenin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmektedir (Hassan vd., 2023), (Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M., 2020).

**Tablo 1.** Hidrojenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Özellik	Açıklaması
Kimyasal sembolü	H
Fazı (STP’de)	Gaz
Katı, sıvı ve gaz hali için denklilikler (981 mbar ve 20°C’de)	1 kg=14, 104 l= 12, 126 m <sup>3</sup>
Moleküler ağırlığı	1,00794 g/mol
Atom numarası	1
Renk	Renksiz
Buhar basıncı (-252,8 ° C’de)	101,283 kPa
Gazın kaynama noktasındaki yoğunluğu (1 atm’de)	1,331 kg/m <sup>3</sup>
Gazın özgül ağırlığı (0 °C ve 1 atm’de)	0,0696
Gazın özgül hacmi (21,1 °C ve 1 atm’de)	11,99 m <sup>3</sup> /kg
Kaynama noktası (101,283 kPa)	-252,8 °C
Donma/Erime noktası (101,283 kPa)	-259,2 °C
Kritik sıcaklık	-239,9 °C
Kritik basınç	1296,212 kPa
Üçlü nokta	-259,3 °C, 7,042 kPa
Buharlaşma ısısı	(H <sup>2</sup> ) 0,904 kJ.mol <sup>-1</sup>
Molar ısı kapasitesi	(H <sup>2</sup> ) 28,836 J.mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
İyonlaşma potansiyeli	13,5984 eV
C <sub>p</sub> (sabit basınçta ısı sığası)	14,34 kJ/(kg) (°C)
C <sub>v</sub> (sabit hacimde ısı sığası)	10,12 kJ/(kg) (°C)
Ağırlık bazında alt ısıtma değeri	120 MJ/kg
Ağırlık bazında üst ısıtma değeri	141,8 MJ/kg
Hacim bazında alt ısıtma değeri ( 1 atm’de)	11 MJ/m <sup>3</sup>
Hacim bazında üst ısıtma değeri ( 1 atm’de)	13 MJ/m <sup>3</sup>
Maksimum alev sıcaklığı	1526,85 °C
Oksidasyon durumları	1, -1
Elektronegatiflik	2,20 (Pauling ölçeği)
Kovalent yarıçapı	31 ± 5 pm
Van der Waals yarıçapı	120 pm
Kristal yapısı	Altıgen
Termal iletkenlik	0,1805 W. M <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Eletriksel iletkenliği	Elektriği iyi iletmez ancak iyonlaştığında iletilebilir
Reaktivitesi	Birçok element ve bileşikle reaksiyona girer
Çözünürlüğü	Suda az çözünür
CAS* kayıt numarası	1333-74-0

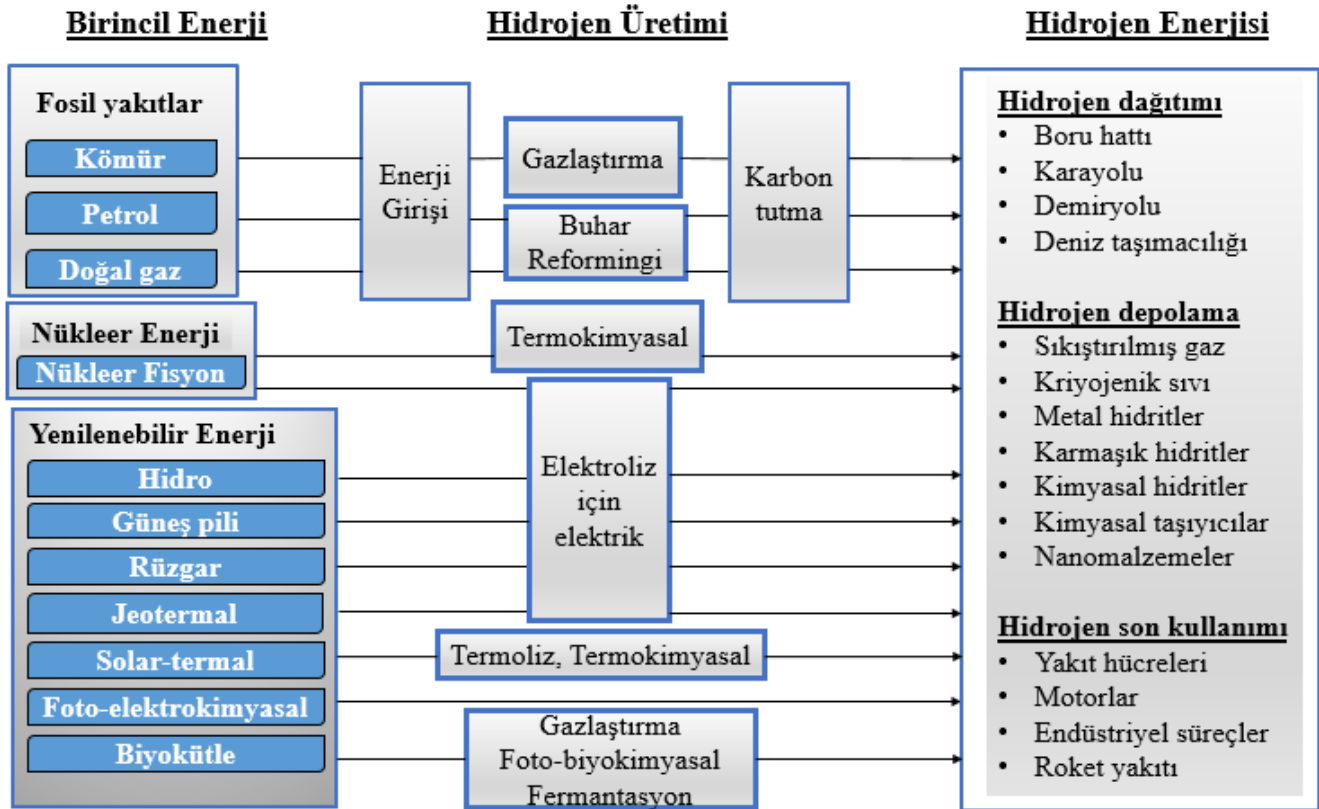
\*CAS: Kimyasal özetler servisi (Chemical abstracts service)

## Hidrojen Üretimi

Hidrojen üretim yöntemleri bu bölümde özet olarak derlenmiştir. Literatürde hidrojen üretimi konusunda birçok sınıflandırma şekli mevcuttur. Ancak temelde birincil enerji olarak kullanılacak kaynağın fosil yakıt, nükleer enerji ya da yenilenebilir enerji bazlı oluşuna göre kategorize edilmektedir. Seçilen enerji kaynaklarından hidrojen üretimi için gazlaştırma, buhar reformu, elektroliz, termoliz gibi farklı yöntemler sunulmaktadır. Literatürde üretim yönteminde kullanılan metot ve birincil enerji kaynağına göre hidrojen üretiminin mavi, mor, turkuaz, yeşil ve gri gibi farklı renklerle ilişkilendirildiği görülmektedir.

Mavi hidrojen, fosil yakıtlardan hidrojen üretmek için kullanılan mevcut süreçlerin, sera gazı (SG) emisyonlarının çoğunu azaltmak için karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojileriyle birleştirilebileceği fikrine dayanmaktadır. Mor hidrojen, birincil enerji kaynağı olarak nükleer enerjinin kullanıldığı ve nükleer reaktörün yüksek sıcaklıkları sayesinde termokimyasal süreçlerle üretilen hidrojendir. Turkuaz hidrojen, hidrokarbonların parçalanmasını içeren bir prosesle üretilen hidrojen türüdür. Başka bir ifadeyle, hidrojen ve karbon siyahının birlikte üretimi için metanın yüksek sıcaklıkta pirolizinden elde edilen hidrojen türüdür. Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretimini tanımlamak için kullanılan bir terimdir (Sukpancharoen & Phetyim, 2021). Yeşil hidrojen, suyun yenilenebilir enerji kaynakları veya düşük karbonlu güç kaynakları tarafından üretilen elektrikle elektrolize edilmesi yoluyla elde edilmektedir (Yu vd., 2021). Gri hidrojen terimi genellikle fosil yakıtlardan elde edilen hidrojeni ifade etmektedir. En yaygın gri hidrojen türü, buhar metan reformu (BMR) ve ototermal reformu (OR) gibi süreçler kullanılarak doğal gazdan elde edilmektedir (Elshafei & Mansour, 2023). Gri hidrojenin ana dezavantajı ise hidrojen sentezi sırasında üretilen ve yıllık 830 milyon ton (Mt) civarında olduğu tahmin edilen CO<sub>2</sub> emisyonlarıdır (Dash vd., 2023; Sarker vd., 2023).

Genel olarak hidrojen üretim yöntemleri, kullanılan birincil enerji kaynakları, hidrojen dağıtım şekilleri, depolanma şekilleri ve kullanım alanları Şekil 1'de derlenerek sunulmuştur.



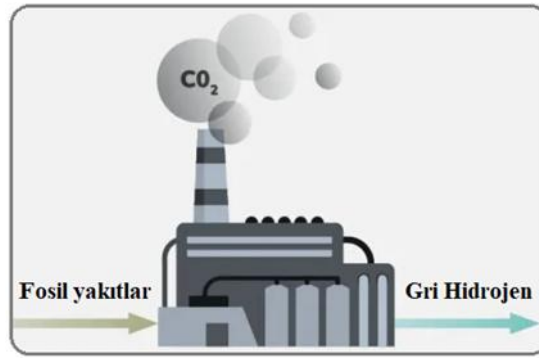
Şekil 1. Hidrojen Enerjisi Elde Etmek İçin Kullanılan Birincil Enerji Kaynakları ve Hidrojen Üretimi

Buhar reformu yöntemi, genellikle doğal gaz olmak üzere propan, benzin, etanol, dizel gibi fosil yakıtların da kullanılabilirdiği, hidrojen üretimi için oldukça yaygın ve bilinen bir yoldur. Bu teknolojide yüksek sıcaklık (700-1000 °C) ve basınç değerlerinde (3-25 bar) tutulan buhar, uygun bir katalizör varlığında metan (CH<sub>4</sub>) ile reaksiyona girerek hidrojen, karbondioksit ve karbonmonoksit üretir. Seçilen yakıtı göre belirlenecek en uygun katalizör ile üretim süreci tamamlanır. Bu teknik, ticari hidrojen üretiminde talepleri karşıladığı ve uygun maliyetli olduğu için çoğunlukla tercih edilmektedir. Ancak fosil yakıt miktarındaki azalma ve son yıllardaki SG emisyonundaki artış bu yöntemin en büyük dezavantajlarıdır (Song vd., 2015).

Hidrojen üretiminin bir diğer önemli yolu kömür gazlaştırma yöntemidir. Bu süreçte kömür, yüksek basınç altında hidrojen (H<sub>2</sub>), oksijen (O<sub>2</sub>) ve buharla reaksiyona girerek karbon monoksit ve hidrojen karışımı (sentez gazı) oluşturmaktadır. Karbon monoksit su-gaz kayması reaksiyonu yoluyla buharla reaksiyona girerek hidrojen ve karbon oluşumunu sağlar. Bu işlemten sonra saf hidrojen sistemden ayrılır ve karbon yakalanarak tutulur (Howaniec &

Smoliński, 2014). Bu sentez yönteminde de SG emisyonlarının sebep olduğu çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda prosesin çevre dostu hale getirilmesi ve bu şekilde yaygınlaşması için karbon yakalama ve birikme sorunlarının önüne geçilmesi gerekmektedir.

Fosil yakıt temelli hidrojen üretim sistemleri olan buhar reformu ve kömür gazlaştırma proseslerine karbon yakalama ünitesi entegre edilmeden üretilen hidrojen, literatürde karşımıza gri hidrojen olarak çıkmaktadır (Elshafei & Mansour, 2023). Şekil 2’de gri hidrojen üretim yöntemine ait şematik bir gösterim sunulmuştur. Kömür, dünyadaki fosil yakıtlar arasında en büyük rezerve sahip olduğundan kömür gazlaştırma yöntemi de sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle Çin, doğalgazın yüksek maliyeti ve kömür rezervlerinin bolluğu nedeniyle bu yöntem ile önemli miktarda hidrojen üretmektedir (Schneider vd., 2020) ve bugün hidrojenin çoğu Çin’de üretilmektedir (%30’dan fazlası) (IEA, 2022a). Çin hidrojen ittifakı, hidrojen pazarının yaklaşık 30 kat artarak, Çin’in hidrojen üretimindeki yeşil hidrojen payının 2019 yılındaki %1 değerinden 2030 yılında %10 değerine ulaşacağını ve bu durumun farklı iş fırsatları sunarak Çin’in hidrojen konusundaki rekabet avantajını artıracığını öngörmektedir (Huang vd., 2024).



Şekil 2. Gri Hidrojen Üretim Prosesi Şematik Gösterimi

Gri hidrojen üretimi ile oluşan çevresel tahribatın önüne geçmek ve bu durumu kontrol altına almak için sisteme karbon yakalama ünitesi entegre edilerek üretilen ve mavi hidrojen olarak bahsedilen sistemler, yeşil hidrojene geçmekten daha az maliyetli olarak görülmektedir. Ancak bu sistemlerde de KYD uygulaması ile ilgili yaşanabilecek teknik sorunlar ve üretilen hidrojenin gri yerine mavi olarak sınıflandırılabilmesi için gerekli olan CO<sub>2</sub> yakalama oranının standart bir değerinin belirlenmemiş olması sistemin dezavantajlarından. Literatürdeki bazı çalışmalarda, kullanılan teknolojiye ve CO<sub>2</sub> yakalama prosesinin uygulandığı aşamalara bağlı olarak %70 ile %95 aralığında maksimum yakalama oranları belirtilmiştir (Newborough, 2020). Doğal gazdan mavi hidrojen üretimini değerlendirirken, üretimin ilk aşamalarında metan sızıntısından kaynaklanan ek çevresel etkiyi de hesaba katmak çok önemlidir. Bu etkiyi tam olarak ölçmek zor olduğu için araştırma çalışmalarında sıklıkla göz ardı edilen bir faktördür. Mevcut gri hidrojen üretim altyapısından yararlanarak geliştirilip güçlendirilebilme imkânı sunduğu için yeni bir tesis kurulumuna göre mavi hidrojen üretimi nispeten avantajlı görülmektedir. Yani, tamamen yeni tesisler inşa etmek yerine, mevcut hidrojen üretim tesislerini modifiye ederek ve güçlendirerek (böylece karbon emisyonlarını azaltarak) gri hidrojen üretiminden mavi hidrojen üretimine geçiş sağlamak mümkündür (Yu vd., 2021). Ancak, CO<sub>2</sub>’nin etkili ve kalıcı bir şekilde depolanmasını sağlamak için belirli koşulların karşılanması gerekmektedir. Özel bir CO<sub>2</sub> altyapısı, toplam maliyeti önemli ölçüde artırabilir ve bu maliyetin büyüklüğü her tesis için farklılık göstereceğinden genelleştirmek pek mümkün değildir. Ayrıca, bir KYD sisteminin işletilmesi ile BMR sürecinin enerji verimliliğini %5 ile %14 arasında değişen bir düşüşe neden olacağı öngörülmektedir (Noussan vd., 2021). Yine de Kanada, İran, Norveç, Katar, Rusya ve Amerika gibi fosil yakıt üreticileri için sürdürülebilir bir perspektif sunmaktadır (Irena, 2019; Yu vd., 2021). Şekil 3’te mavi hidrojen üretim sistemine ait şematik bir gösterim verilmiştir.

Termokimyasal proses yönteminde yüksek sıcaklıkta (500–2000 °C) gerçekleşen kimyasal reaksiyon ile hidrojen üretilmektedir. Bu yöntemde ısı kaynağı nükleer reaktörler veya güneş yoğunlaştırıcılarıdır ve proste kimyasallar her döngüde yeniden kullanılarak hidrojen üretimi için yalnızca su tüketimiyle kapalı devre bir kimyasal reaksiyon oluşturulur. Termokimyasal su ayrıştırmada, suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için yüksek sıcaklıklarda bir dizi kimyasal reaksiyon gerçekleştirilir. Bu teknoloji de sıfır SG emisyonu ile temiz, saf, büyük ölçekli ve merkezi hidrojen üretimi için uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Ancak güneş yoğunlaştırıcılarının ve ısı transfer ortamının maliyetinin azaltılması, ayrıca düşük sıcaklıkta gerekli ısıyı sağlamak için nükleer reaktör teknolojisinin

geliştirilmesi gibi sorunların giderilmesi gerekmektedir. Literatürde nükleer enerji varlığında gerçekleşen bu proses mor hidrojen üretim sistemi olarak da karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3. Mavi Hidrojen Üretim Prosesi

Metan pirolizi ya da metan ayrışması olarak adlandırılan yöntemde, CH<sub>4</sub> gaz halindeki H<sub>2</sub> ve elementel karbona (C) ayrılır. Hidrojen ve karbon siyahının birlikte üretimi için metanın yüksek sıcaklıkta pirolizinden elde edilen bu hidrojen türü literatürde turkuaz hidrojen olarak da adlandırılmaktadır (Dash vd., 2023). Turkuaz hidrojenin temel avantajı, termodinamik açıdan su elektrolizi ve BMR ile karşılaştırıldığında çok daha az enerji yoğunluğunun olması ve mevcut doğal gaz altyapısından yararlanılmasıdır (Diab vd., 2022). Yapılan çalışmalarda birçok turkuaz hidrojen üretim yönteminin incelenmiş olduğu görülmektedir. Bunlar arasında, katalitik ve katalitik olmayan termal ayrışma/piroliz, erimiş metal veya tuz banyosu, konsantre güneş ve termal olmayan plazma gibi yöntemler bulunmaktadır (Diab vd., 2022).

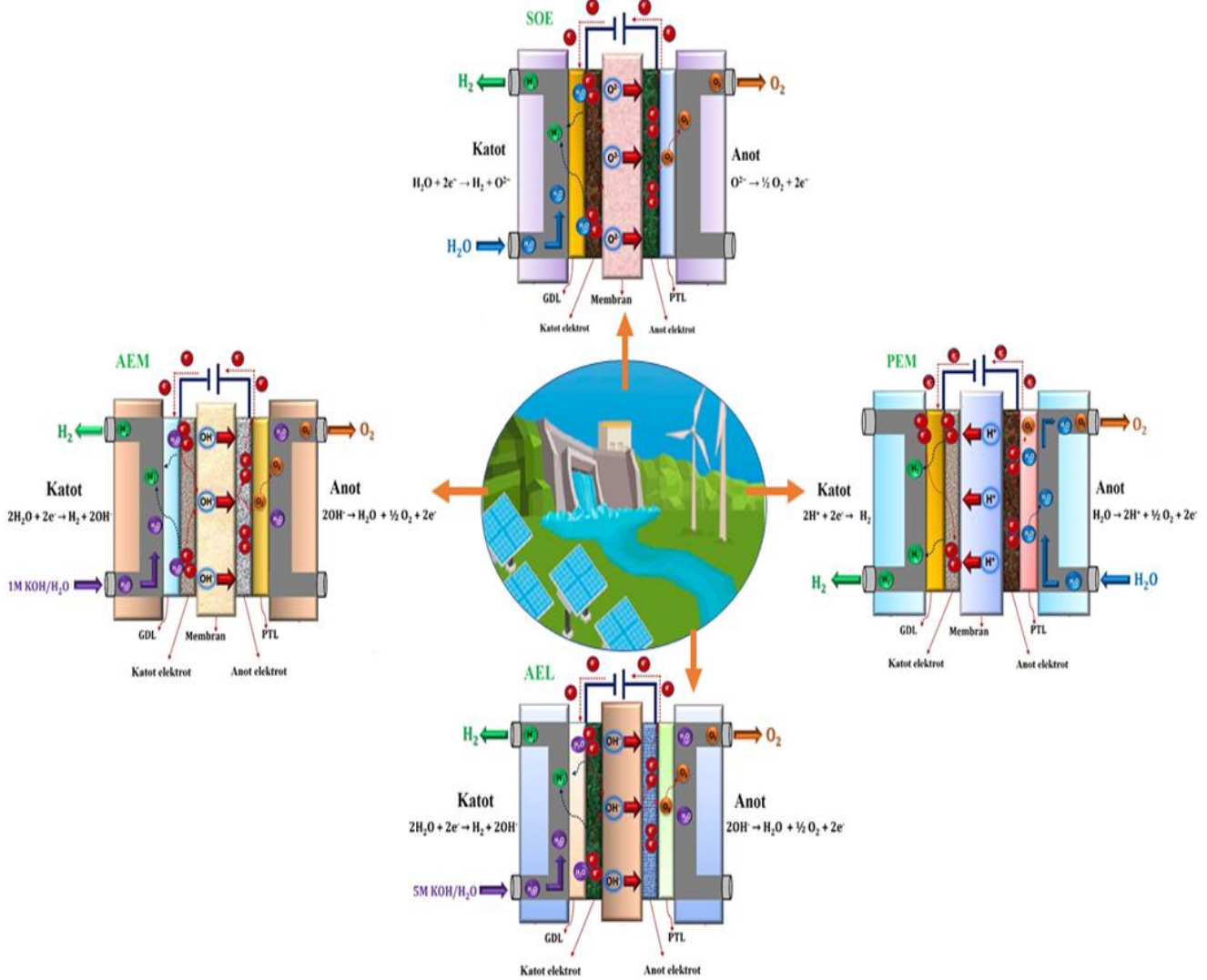
Son yıllarda hidrojen üretim yöntemleri üzerine yapılan çalışmalarda temiz enerji üretim sistemleri oldukça ilgi çeken bir araştırma konusudur. Yenilenebilir enerjiye dayalı hidrojen üretimini tanımlamak için yeşil hidrojen terimi sıklıkla kullanılmaktadır (Sukpancharoen & Phetyim, 2021). Yeşil hidrojen üretim sistemleri, suyun elektrolizi ile hidrojenin elde edildiği proseslerdir. Bu yöntemde elektroliz için gereken enerji yenilenebilir enerji kaynakları veya düşük karbonlu güç kaynakları tarafından üretilen elektrikle karşılanmaktadır (Yu vd., 2021). Elektroliz işleminde atmosfere zararlı emisyonlar salınmamakta ve su buharı dışında herhangi bir yan ürün oluşmamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, yeşil hidrojen üretimi iklim değişikliği ile mücadelede etkili bir çözüm olarak görülmekte ve enerji sektöründeki karbon ayak izini azaltmaya yönelik çabaları desteklemektedir (Abad & Dodds, 2020).

Yeşil hidrojen üretimi için en yaygın kullanılan elektrolizörler, alkali elektrolizör (AE), polimer elektrolit membranı (PEM), anyon değişim membranı (ADM) ve katı oksit elektrolizörüdür (KOE) (El-Emam & Özcan, 2019; Nicita vd., 2020; Dash vd., 2023). PEM elektrolizörleri, diğer elektrolizör teknolojilerine göre şu anda piyasada bulunmakla kalmayıp aynı zamanda hızla pazara yayılmaktadır (Nicita vd., 2020). Şekil 4'te su elektroliz yöntemlerine ilişkin bir görsel verilmiştir (Kumar & Lim, 2022). Elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi temiz ve çevreci bir yöntem olmasına rağmen, dünya çapındaki hidrojen üretiminin %5'inden azını temsil etmektedir (Han vd., 2021). Mevcut endüstriyel elektrolizörlerin elektrik tüketimi, elektrolizörün boyutuna, türüne ve dikkate alınan çıkış basıncına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. 10 ile 30 bar aralığındaki çıkış basınçları dikkate alındığında ortalama elektroliz verimliliği %65 ile %70 aralığında değişmektedir (Noussan vd., 2021). Ayrıca, gelecek 10 yıl içinde hidrojenin elektroliz ile üretim maliyetinin yaklaşık %70 oranında düşmesi beklenmektedir. Bu gelişme yeşil hidrojen üretim yöntemlerinin daha yaygın şekilde kabul görmesine ve kullanılmasına olanak sağlayacaktır (Osman vd., 2022).

Elektroliz yönteminde üzerinde durulması gereken diğer bir konu da su tüketimidir. Üretilen her bir kilogram hidrojen için elektroliz işleminde yaklaşık olarak 10 ile 15 litre su kullanılmaktadır (Al-Qahtani vd., 2021) ve kullanılan suyun deiyonize edilmesi gerekmektedir. Tatlı su kaynaklarının bulunmadığı durumlarda, deniz suyunun tuzdan arındırılması veya atık suyun geri kazandırılması gibi yöntemler düşünülmektedir. Deniz suyunun tuzdan arındırılması için halihazırda ticari olarak farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Bu sistemler enerji tüketiminde minimum bir artışla elektroliz ile birleştirilebilir.

Yeşil hidrojen üretimi için çoğunlukla güneş ve rüzgâr teknolojileri kullanılmaktadır ve Şekil 5'te bu teknolojilere ait yeşil hidrojen üretim süreçleri özetlenmektedir (Benghanem vd., 2023). Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansının (UYEA (IRENA)) yayınlamış olduğu bir raporda yeşil hidrojen üretim maliyetinin 2019 yılı için kilogram başına 2,5-4,5 dolar aralığında olduğu ve 2050 yılına kadar bu miktarın 0,95 dolara kadar düşeceği tahmin edilmektedir (BloombergNEF, 2020; Noussan vd., 2021). Bu maliyete katkıda bulunan temel faktörler arasında elektrolizör için gerekli yatırım ve elektrik maliyeti yer almaktadır. Bunun yanı sıra, mevcut AE'lerin CAPEX

maliyetleri (sermaye harcamaları) 750 €/kW civarındadır, ancak 2025 yılına kadar 500 €/kW civarına düşmesi ön görülmektedir (Noussan vd., 2021). Ayrıca son yıllarda, tekil enerji kaynaklarıyla ilgili karşılaşılan zorlukların üstesinden gelebilmek için hibrit yenilenebilir enerji sistemleri (HYES) alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu konuda dünya çapında devam etmekte olan birçok araştırma projesiyle SG emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra hidrojen üretim maliyetlerinin de azaltılması hedeflenmektedir (Sarker vd., 2023).



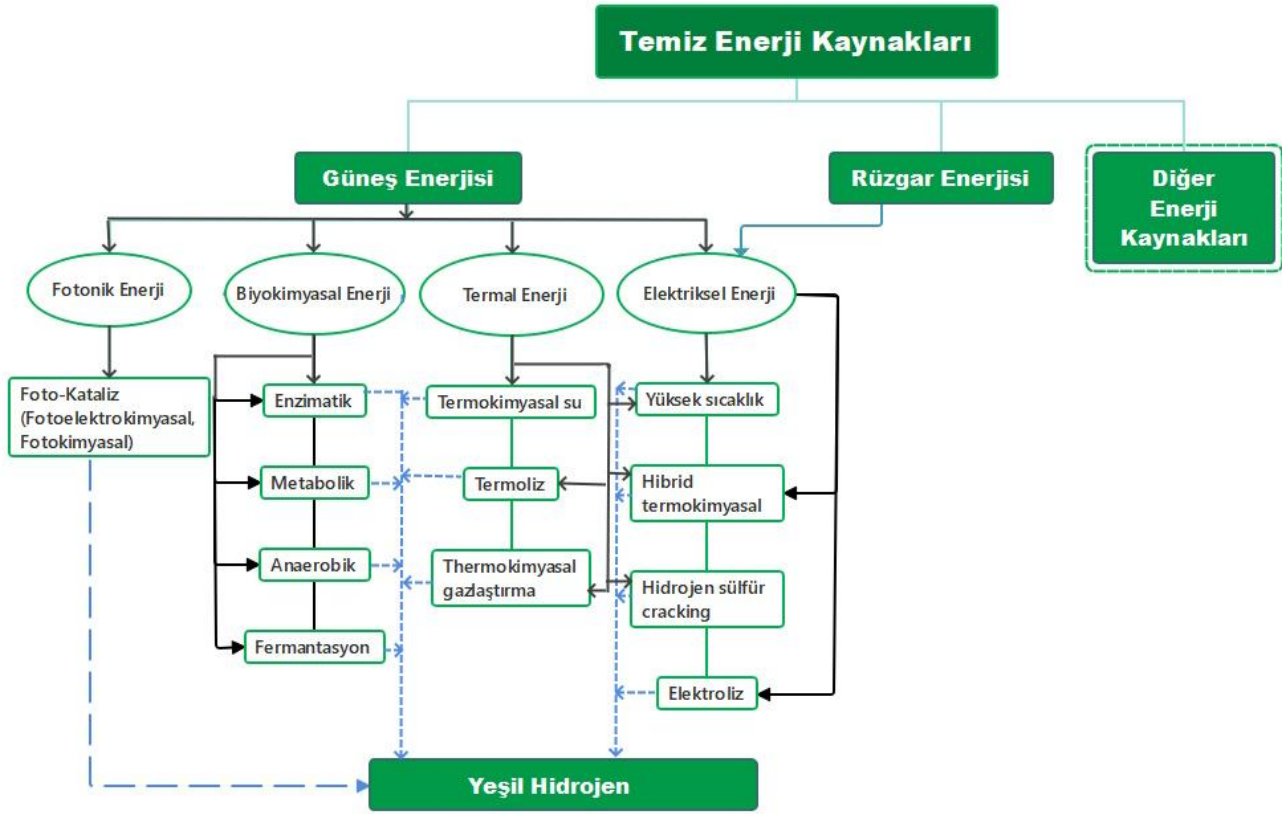
Şekil 4. Hidrojen Üretmek için Kullanılan Su Elektroliz Yöntemleri

(Creative Commons Attribution (CC-BY) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişim makalesine göre MDPI'den Ref. (Kumar & Lim., 2022) yeniden üretilmiştir.)

(Reproduced with some modification from Ref. (Kumar & Lim, 2022)) from the MDPI according to the open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### Hidrojen Üretim Yöntemlerindeki Zorluklar

Hidrojen birçok kullanım alanına sahip ve birçok farklı yöntemle üretilen önemli bir kimyasaldır. Ancak bir enerji vektörü olarak kabul görmesi için kimyasal kullanım amacıyla üretildiği maliyetten çok daha ucuza elde edilmesi gereklilik arz etmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde büyük hacimli bir endüstriyel üretimde son derece önemli olan maliyet tasarrufu kolay değildir. Özellikle yerel boyutlu küçük ölçekte kurulum maliyetleri daha yüksek düzeydedir. Ancak fosil kaynakların sınırlı oluşu ve kullanımları sonucu oluşan büyük çevresel tahribatlar hidrojen elde etmek için daha fizibil koşulların geliştirilmesini elzem kılmaktadır. Literatürde farklı teknikler sonucu üretilen ve mavi, mor, turkuaz, yeşil, gri renklerle bahsedilen üretim proseslerinde karşılaşılan genel zorluklar aşağıda sunulmaktadır



Şekil 5. Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Yoluyla Yeşil Hidrojen Üretimine Yönelik Süreçler

(Creative Commons Attribution (CC BY) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişim makalesine göre MDPI'den Ref. (Benghanem vd., 2023)) yeniden üretilmiştir.  
(Reproduced from Ref. (Benghanem vd., 2023)) from the MDPI according to the open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

#### **Mavi hidrojen:**

- Karbonsuzlaştırma maliyeti ve enerji verimliliği: KYD süreçleri oldukça maliyetli olup, enerji verimliliğini azaltabilmektedir.
- Altyapı ihtiyacı: KYD altyapısı gerektirmekte olup, bu da ilave yatırım maliyetlerini beraberinde getirmektedir (Yu vd., 2021).

#### **Mor hidrojen:**

- Nükleer güvenlik: Nükleer enerjinin kullanımı, güvenlik ve radyoaktif atık yönetimi gibi zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu durum, özellikle kamu güvenliği ve uzun vadeli atık depolama açısından riskler taşımaktadır.

#### **Turkuaz hidrojen:**

- Teknolojik olgunluk: Bu yöntem henüz deneysel aşamada olduğu için teknolojik olgunluğa ulaşması biraz daha zaman alabilir.

#### **Yeşil hidrojen:**

- Yüksek başlangıç maliyeti: Elektroliz ekipmanlarının ve yenilenebilir enerji tesislerinin yatırım maliyeti yüksektir (Liu vd., 2020). Özellikle, ilk kurulum yatırım maliyetleri fosil yakıt alternatiflerine kıyasla çok daha yüksektir.
- Elektroliz verimliliği: Elektroliz süreci enerji yoğun olabilir, bu da verimliliği etkileyebilir (Yu vd., 2021).



- Depolama ve Taşıma: Hidrojenin düşük yoğunluğu ve uçuculuğu nedeniyle depolama ve taşıma zorlukları bulunmaktadır (Vallejos-Romero vd., 2022).
- Maliyet ve talep belirsizliği: Yeşil hidrojenin maliyeti, diğer yakıtlara kıyasla halen oldukça yüksek olup, bu durum gelecekte yeşil hidrojene olan talebin sürdürülebilirliği konusunda belirsizlik yaratmaktadır (Farrell, 2023).
- Kaynak ve çevresel etkiler: Yeşil hidrojen projelerinin su tüketimi, tatlı suya erişim gibi doğal kaynaklar üzerindeki potansiyel etkileri çevresel sürdürülebilirlik açısından soru işaretleri doğurmaktadır. Özellikle su kıtlığı yaşanan bölgelerde elektroliz için gereken su miktarı önemli bir sorun olabilir (Du vd., 2024).
- Uluslararası düzenlemelerin eksikliği: Uluslararası hidrojen üretimi ve taşımacılığı için yeterli düzenleme ve standartların olmaması, yeşil hidrojen projelerinin gelişmesini zorlaştıran bir başka etkidir (Jayachandran vd., 2024).
- Düşük sistem verimliliği ve hammadde zorlukları: Elektrolizörlerde kullanılan pahalı katalizörler, yüksek saflıkta hammadde gerekliliği ve bu hammaddelerin saflaştırma zorlukları da önemli maliyet faktörleridir (Kumar vd., 2024).

### **Gri hidrojen:**

- Enerji verimliliği: Fosil yakıtlardan elde edilen gri hidrojenin üretim süreçlerinde enerji yoğunudur ve yüksek karbon emisyonlarına yol açarak çevresel ve ekonomik olumsuz etkilere neden olmaktadır (Ajanovic vd., 2022).

Bu zorluklara rağmen, hidrojen üretiminde maliyetlerin düşürülmesi, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla geniş çaplı Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Bu araştırmalar, hidrojenin sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir enerji kaynağı olarak ölçeklenebilir hale gelmesi için kritik öneme sahiptir.

### ***Hidrojen Ne Kadar Güvenlidir?***

Hidrojen havadan çok daha hafif ve toksik olmayan kimyasal bir elementtir. Hafif olması nedeniyle salındığında hızla dağılır, bu da sızıntı durumunda yakıtın hızlı bir şekilde dağılmasına sebep olmaktadır. Toksik olmadığı için sızıntı yapan diğer gazlara nispeten daha güvenli olarak değerlendirilmektedir. Ancak hidrojen kullanımında en temel güvenlik endişesi, sızıntının fark edilememesi durumunda gazın sıkışık bir alan içinde birikmesi ve nihayetinde ateş alarak bir patlamaya sebebiyet vermesidir (Li vd., 2022). Çünkü hidrojen son derece yanıcıdır ve kolaylıkla tutuşabilir. Bu bağlamda güvenli kullanım için depolanması, sızıntıların önlenmesi ve risklerin minimuma indirilmesi için özel ekipman ve prosedürler gerekmektedir. Depolama ve işleme alanında çalışacak personelin yeterli donanıma sahip olmaları da güvenlik açısından oldukça elzemdir. Hidrojenin hava içerisinde %4 -%75 gibi geniş bir yanıcı konsantrasyon aralığına sahip olması ve benzinin ateşlenmesi için gereken enerjinin onda biri kadar düşük bir ateşleme enerjisi ile alevlenmesi bu alandaki güvenlik tedbirlerinin önemini açıkça göstermektedir. Ayrıca nakliye güvenliği konusu da hidrojenin uzun mesafelerde güvenli bir şekilde taşınması, düşük enerji yoğunluğu ve özel konteynerlere veya boru hatlarına ihtiyaç duyulması nedeniyle çeşitli tedbirler gerektirmektedir. Hidrojenin metalleri gevrekletirebilir yapısı ekipman ve altyapının yapısal bütünlüğünde sorunlara neden olabilir ve ayrıca bir güvenlik riski oluşturabilir. Oluşabilecek olumsuz durumların önlenmesi için hem halkın hem de hidrojen endüstrisinde çalışanların konuyla ilişkili güvenlik risklerinin farkında olması ve uygun şekilde kullanımı konusunda eğitilmesi önemlidir.

Hidrojen enerji geleceği için umut verici bir yaklaşım olsa da endüstride geniş kabul görmesi ve başarısı için güvenlik sorunlarının etkin bir şekilde ele alınması kritik önem taşımaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek ve hidrojenin temiz bir enerji taşıyıcısı olarak tüm potansiyeli ile kullanımını gerçekleştirmek için hükümetler, endüstri ve araştırma enstitüleri arasındaki iş birliği zorunludur. Yeterli ve gerekli tedbirler alındığında, hidrojen de diğer yaygın kullanılan yakıtlar kadar güvenli bir enerji taşıyıcısı olabilir. Ayrıca, teknolojik gelişmeler ve deneyim arttıkça, hidrojen güvenliği konusundaki bilgi ve güven de artmaktadır.

### ***Hidrojenin Uygulamaları***

Hidrojen çoğunlukla petrol endüstrisinde ya petrol işleme ya da petrokimyasal üretim için bir reaktan olarak kullanılmaktadır. Petrol işleme için, hidrojen katalizör varlığında hidrokarbon ile reaksiyona sokulur, bu işlem hidroişlem (veya hydrocracking) olarak adlandırılır. Hidroişleme, ürünlerdeki sülfür ve azot bileşiklerinin kolayca

uzaklaştırılması için amonyak ve hidrojen sülfüre hidrojenize edilmesi amacıyla hidrojenin kullanıldığı bir süreçtir. Petrokimyasal üretimde ise hidrojen, yüksek basınç ve sıcaklıkta katalizör eşliğinde metanol üretmek için karbon monoksit ile reaksiyona sokulur. Bunun yanı sıra, hidrojenin reaktan olarak kullanıldığı bir diğer süreç ise gübre için amonyak üretimidir. Amonyak, gübre üretiminde kullanılan ana ham maddeler olduğundan dünya genelinde üretilen hidrojenin yaklaşık %50'sini tüketmektedir. Hidrojenin en önemli uygulamalarından bir diğeri de yakıt olarak kullanılabilmesidir. Bu anlamda ilk akla gelen kullanım alanı havacılık ve uzay endüstrisidir. Öte yandan, yakıt hücreleri aracılığıyla otomobillerde de kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Tablo 2'de hidrojenin farklı endüstrilerdeki kullanım alanları verilmektedir (Abdalla vd., 2018). Günümüzde hidrojenin yakıt olarak kullanımında karşılaşılan en büyük zorluk, diğer gazları işleme ve depolama maliyetlerine kıyasla, hidrojenin mevcut maliyetinin yüksek olmasıdır.

**Tablo 2.** Hidrojenin Farklı Endüstrilerdeki Kullanımı

Endüstri türü	Kullanımı
<b>Petrol</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Sülfür ve diğer safsızlıkların giderilmesi</li><li>✓ Büyük hidrokarbonların yakıt distilatlarına hidrokrankı</li></ul>
<b>Kimyasal</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Amonyak, metanol vb. sentezi</li></ul>
<b>Gıda</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Şekerlerin poliollere dönüşümü</li><li>✓ Yenilebilir yağların hızlı dönüşümü</li><li>✓ Don yağı veya gresin hayvan yemine dönüştürülmesi</li></ul>
<b>Plastik</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Naylon, poliüretan, poliester, poliolefin sentezi</li><li>✓ Geri dönüştürülebilir daha hafif moleküller üretmek için kullanılmış plastiklerin kırılması (cracking)</li></ul>
<b>Metaller</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ O<sub>2</sub> tutucu</li><li>✓ Demir, magnezyum, molibden vb. üretimi için indirgeyici</li><li>✓ Sünekliği ve işleme kalitesini iyileştirmek, gerilimi azaltmak, sertleştirmek, gerilme mukavemetini artırmak, manyetik veya elektriksel özellikleri değiştirmek için ısıtma işlemi</li></ul>
<b>Elektronik</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Polisilikonun "Epitaksiyel" büyümesi</li><li>✓ Vakum tüpleri imalatı</li><li>✓ Isıl bağlayıcı malzemeler</li></ul>
<b>Cam</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Yüksek sıcaklık kesme hamlacı</li><li>✓ Cam cilalama</li><li>✓ Optik fiberlerin ısıtma işlemleri</li><li>✓ Float-cam prosesi için indirgeyici ortam</li></ul>
<b>Elektrik enerjisi</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Büyük motor jeneratörleri için soğutma sıvısı</li><li>✓ Nükleer yakıt işleme</li></ul>

Hidrojen günümüzde endüstriyel olarak enerjiden ziyade kimyasal bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin enerji olarak kullanılabilmesi en önemli uygulama alanlarına hidrojenle çalışan otomobiller, otobüsler (Honda, Toyota ve BMW), denizaltıları ve gemiler (Hamburg, Almanya'daki feribotlar) örnek verilebilir (Abdalla vd., 2018; Das vd., 2021).

### **Hidrojen Ekonomisi için Küresel Vizyon ve Hedefler**

Hidrojen ekonomisi, gelecekte hidrojenin birincil enerji taşıyıcısı haline geldiği varsayımsal bir ekonomik sistemi ifade etmektedir (Mosca vd., 2020; Megia vd., 2021). Bu öngörülen sistemde hidrojen, ulaşım, sanayi ve enerji üretimi gibi çeşitli sektörlerdeki enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli rol oynamaktadır (Megia vd., 2021). Ayrıca bu sistemde temiz ve çok yönlü bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin üretimi, dağıtımı ve kullanımı etraflıca değerlendirilmektedir. Bu anlamda, önde gelen ülkelerin vizyon ve hedefleri ele alındığında önemli projelerin ve yatırımların yürütülmekte olduğu görülmektedir (Suwidji vd., 2020). Örneğin, Mart 2022'de Avrupa Komisyonu üye ülkeleri, 2030 yılına kadar fosil yakıt kullanımını durdurmak için 10 milyon ton hidrojen üretimi ve 10 milyon ton

yeşil hidrojen ithalatını hedefleyen “REPowerEU Planı”nı yayınlamıştır. Bu plan kapsamında, Avrupa Birliği’nin (AB) hedefleri revize edilerek 2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasitesinin 65-80 GW’a çıkarılması planlanmaktadır. Bunun yanı sıra, AB’nin uzun vadeli planlarında, Avrupa’nın enerji tüketimindeki hidrojen payının 2050’ye kadar %13-14’e çıkarmayı hedeflediği görülmektedir. Tablo 3’te bazı ülkelerdeki yakın gelecek için belirledikleri elektrolizör kapasite hedefleri özetlenmektedir (ETKB, 2023).

**Tablo 3.** Bazı Ülkelerin Elektrolizör Kapasite Hedefleri

Ülkeler	Hedefler
Almanya	Elektrolizör kapasitesi hedefi 2030 yılı için 10 GW’tır. Bu elektrolizör kapasitesini desteklemek için 20 TWh yenilenebilir enerji kaynağına (çoğunlukla rüzgâr) ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, toplam 29 MW kurulu güce sahip 34 gazdan elektrik üreten (G-T) tesis bulunmaktadır.
İngiltere	Bu kapsamda 2030 yılına kadar 10 GW düşük karbonlu hidrojen üretimi hedefi belirlemiş olup, bunun en az yarısının elektrolit hidrojen olması planlanmaktadır.
İspanya	Elektrolizör kapasitesi hedefi 2030 yılı için 4 GW’tır.
Hollanda	2030 yılına kadar 3-4 GW’lık bir elektrolizör kapasitesi geliştirmeyi hedeflemektedir. Ayrıca 50 hidrojen dolum istasyonu kurmaya, 15000 yakıt hücreli otomobil ile 3000 yakıt hücreli kamyonu kullanıma sokmayı planlamaktadır.
Fransa	Elektrolizör kapasitesi hedefi 2030 yılı için 6,5 GW’tır. 2020 yılı itibarıyla gri hidrojene 44,6 €/tonCO <sub>2</sub> karbon vergisi uygulanmaktadır. Bu karbon vergisinin 2030 yılında 100 €/tonCO <sub>2</sub> ’ya çıkarılması öngörülmektedir.
Diğer Avrupa Ülkeleri	AB ülkelerinin 2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasitesi hedefi 65-80 GW’tır. Danimarka 4-6 GW, İtalya 5 GW, İsveç 5 GW, Portekiz 2-2,5 GW ve Polonya 2 GW elektrolizör kapasitesi hedefi belirlemiştir.
Avustralya	Planlanan projelere dayanarak 2030 yılına kadar yaklaşık 50 GW’lık bir elektrolizör kapasitesine ulaşılması beklenmektedir. Çin, Japonya, Güney Kore ve Singapur ile anlaşmalar yapılmış olup, ihracatın 2030 yılına kadar 3,8 Mt hidrojene (yaklaşık 9,5 milyar Avustralya doları) ulaşması planlanmaktadır.
Türkiye	Elektrolizör kapasitesinin 2035 yılına kadar 5 GW’a ulaşması hedeflenmektedir.

Türkiye, AB’nin altıncı büyük ticaret ortağı ve küresel yenilenebilir enerji arenasında dikkate değer bir oyuncu olması nedeniyle, bu tür hedeflerle başa çıkabilmesi için hidrojen teknolojileri alanında net bir ulusal strateji ortaya koymalı, bu teknolojilerde yetkinlik kazanmalı ve küresel düzeyde rekabetçi bir oyuncu olmalıdır. Bu anlamda, 4 Eylül 2022 tarihli 31943 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Orta Vadeli Program (2023-2025)” kapsamında verimli ve rekabetçi yeşil dönüşüm politikalarına uygun olarak 2053 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için tüm sektörlerde gerekli adımların atılacağı vurgulanmaktadır (ETKB, 2023).

### ***Türkiye’nin Hidrojen Teknolojileri Açısından İhtiyaçları ve Bu İhtiyaçları Karşılacak Teknolojik/Destekleyici Çözümler***

Türkiye, enerji üretimi alanında fosil yakıt ithalatına yüksek derecede bağımlı olsa da son on yılda hidroelektrik, güneş ve rüzgâr enerjisi temelli yenilenebilir elektrik üretimini iki katına çıkarmış bulunmaktadır. Türkiye’nin güneş ve rüzgâr enerjisindeki mevcut potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerjide daha fazla büyüme elde edeceği de açıktır. Dolayısıyla, bu yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla üretilecek yeşil hidrojen, enerji arz güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve yaşam kalitesinin artırılması yönünde belirlenen hedeflere ulaşmayı sağlayacaktır. Ancak, bu yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili olması nedeniyle enerji depolama konusu hem teknik hem de ekonomik nedenlerle zorunlu bir ihtiyaç olarak görülmektedir. Bu anlamda, bütüncül bir hidrojen ekosistemi kurulmasına yönelik ihtiyaçların belirlenmesi ve bu ihtiyaçları karşılayacak teknolojik/destekleyici çözümlerin geliştirilmesi güçlü bir Türkiye için hayati önem arz etmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından hazırlanan “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” raporunda bu ihtiyaç ve

teknolojik/destekleyici çözümler yirmi maddede kapsamlı olarak belirtilmektedir (ETKB, 2023). Bu yol haritasının hayata geçirilmesi, Türkiye'nin sürdürülebilir enerji alanında liderlik yapmasına olanak tanıyacak ve ülkeyi gelecekteki enerji zorluklarına karşı koruyacaktır.

## ÖNERİ VE SONUÇLAR

Hidrojen, küresel enerji ve endüstri sektörlerinin dekarbonizasyonunu desteklemek amacıyla ortaya çıkan bir enerji taşıyıcısıdır. Enerji sektöründeki önemi ve avantajları, temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceği için kilit bir rol oynamaktadır. Hidrojenin üretimi, özellikle yeşil hidrojen üretimi (yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektroliz yöntemleriyle) karbon emisyonlarını en aza indirerek çevre dostu bir seçenek sunmaktadır. Ancak, hidrojenin yaygın kullanımı ve entegrasyonu bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Depolama, taşıma ve kullanım altyapısını geliştirilmesi, ekonomik üretim yöntemlerinin bulunması ve güvenlik konuları gibi faktörler, hidrojenin küresel anlamda yaygın bir şekilde benimsenmesini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu bağlamda, ülkelerin kendi enerji dönüşüm yol haritalarını oluşturarak, hidrojenin entegrasyonunu teşvik etmeleri ve teknolojik gelişmelere yatırım yapmaları önemlidir. Yeşil hidrojenin üretim maliyetinin düşürülmesi, depolama ve taşıma altyapısının güçlendirilmesi, endüstriyel sektörlerde hidrojenin kullanımının teşvik edilmesi gibi adımlar, küresel ölçekte temiz enerji dönüşümüne katkı sağlayacaktır.

### *Yazar Katkısı*

Çalışmanın tamamı yazarlar tarafından eşit katkı sağlanarak yapılmıştır.

### *Etik Beyanı*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### *Çıkar Çatışması Beyanı*

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abad, A. V., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenge. *Energy Policy*, 138, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>
- Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., & Azad, A. K. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 165, 602-627. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>
- Acar, C., & Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production*, 218, 835-849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.046>
- Ajanovic, A., Sayer, M., Haas, R. (2022). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 5, 24136-24154. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>
- Al-Qahtani, A., Parkinson, B., Hellgardt, K., Shah, N., & Guillen-Gosalbez, G. (2021). Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Applied Energy*, 281, 115958. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115958>
- Benghanem, M., Mellit, A., Almohamadi, H., Haddad, S., Chettibi, N., Alanazi, A. M., Dasalla, D., & Alzahrani, A. (2023). Hydrogen Production Methods Based on Solar and Wind Energy: A Review. *Energies*, 16(2), 757. <https://doi.org/10.3390/en16020757>
- BloombergNEF. (2020). Hydrogen Economy Outlook. Key messages March 30. <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf> Available online:19/11/2023.
- Capurso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M., & Camporeale, S.M. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*, 251, 114898. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898>

- Coleman, D., Kopp, M., Wagner, T., & Scheppat B. (2020). The value chain of green hydrogen for fuel cell buses – a case study for the Rhine-Main area in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(8), 5122-5133. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.163>
- Das, E., Gürsel, S.A., & Yurtcan, A. B. (2021). Simultaneously deposited Pt-alloy nanoparticles over graphene nanoplatelets via supercritical carbon dioxide deposition for PEM fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 874, 159919. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159919>
- Dash, S. K., Chakraborty, S., & Elangovan, D. (2023). A brief review of hydrogen production methods and their challenges. *Energies*, 16, 1141. <https://doi.org/10.3390/en16031141>
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2023). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3847-3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Diab, J., Fulcheri, L., Hessel, V., Rohani, V., & Frenklach, M. (2022). Why turquoise hydrogen will be a game changer for the energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(61), 25831-25848. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.299>
- Du, L., Yang, Y., Bai, X., Xu, S., Lin, L., & Liu, M. (2024). Water scarcity footprint and water saving potential for large-scale green hydrogen generation: Evidence from coal-to-hydrogen substitution in China. *Science of The Total Environment*, 940, 173589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173589>
- El-Emam, R., & Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 220, 593-609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.309>
- Elshafei, A. M., & Mansour, R. (2023). Green hydrogen as a potential solution for reducing carbon emission: A review. *Journal of Energy Research and Reviews*, 13(2), 1-10. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i2257>
- ETKB. (2023). Türkiye hidrojen teknolojileri stratejisi ve yol haritası. T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı. [https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal\\_Politikalar/HSP/ETKB\\_Hidrojen\\_Stratejik\\_Plan2023.pdf](https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf)
- European Commission. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe 2020.
- Farrell, N. (2023). Policy design for green hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113216>
- Han W-B et al (2021). Directly sputtered nickel electrodes for alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta*, 386, 138458. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138458>
- Hanusch, F., & Schad, M. (2021). Hydrogen research: Technology first, society second? *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 30, 82. Erişim tarihi: 19/11/2023
- Howaniec, N., & Smoliński, A. (2014). Effect of fuel blend composition on the efficiency of hydrogen-rich gas production in co-gasification of coal and biomass. *Fuel*, 128, 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.036>
- Huang, Y., Zhou, Y., Zhong, R., Wei, C., & Zhu, B. (2024). Hydrogen energy development in China: Potential assessment and policy implications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 659-669. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.176>
- Hydrogen Insights 2022: An updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale, Hydrogen Council and McKinsey & Company, 2022. Erişim tarihi: 19/11/2023
- IEA. (2022a). Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China. International Energy Agency, Paris. Erişim tarihi: 19/11/2023
- IEA. (2022b). Global Hydrogen Review, IEA, Paris. Erişim tarihi: 19/11/2023
- Irena. (2019). Hydrogen: a renewable energy perspective. Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf)

- Ishaq, H., & Dincer, I. (2020). The role of hydrogen in the global transition to 100% renewable energy. In *Accelerating the Transition to a 100% Renewable Energy Era* (pp. 275-307). Springer Nature Switzerland AG. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40738-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40738-4_13)
- Ishaq, H., & Dincer, I. (2021). Comparative assessment of renewable energy-based hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110192>
- Ishaq, H., Dincer, I., & Crawford, C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238-26264. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>
- Jayachandran, M., Gatla, R. K., Flah, A., A., Milyani, A. H., Milyani, H. M., Blazek, V., ... Kraiem, H. (2024). Challenges and Opportunities in Green Hydrogen Adoption for Decarbonizing Hard-to-Abate Industries: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, 12, 23363-23388. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3363869>
- Kumar, R., Singh, R., & Dutta, S. (2024). Review and Outlook of Hydrogen Production through Catalytic Processes. *Energy Fuels*, 34 (4), 2601-2629. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04026>
- Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, 8, 13793-13813. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>
- Li, H., Cao, X., Liu, Y., Shao, Y., Nan, Z., Teng, L., Peng, W., & Bian, J. (2022). Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges. *Energy Reports*, 8, 6258-6269. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.067>
- Liu, B., Liu, S., Guo, S., & Zhang, S. (2020). Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1385-1398. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.056>
- Megia, P. J., Vizcaino, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy Fuels*, 35, 16403-16415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
- Mosca, L., Jimenez, J. A. M., Wassie, S. A., Gallucci, F., Palo, E., Colozzi, M., Taraschi, S., & Galdieri, G. (2020). Process design for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(12), 7266-7277. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.206>
- Newborough, M., & Cooley, G. (2020). Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bulletin*, 2020, 16-22. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0)
- Nicita, A., Maggio, G., Andaloro, A. P. F., & Squadrito, G. (2020). Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(20), 11395-11408. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.062>
- Noussan, M., Raimondi, P.P., Scita, R., & Hafner, M. (2021). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition: A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13, 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- Osman, A.I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Hinai, A. A., Muhtaseb A. A., & Roney, D. W. (2022). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 153-188. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
- Öner, E. T., & Yurtcan, A. B. (2023). Clean and Efficient Transportation with Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. In *Hydrogen Fuel Cell Technology for Mobile Applications* (pp. 32-58). IGI Global.
- Pinsky, R., Sabharwall, P., Hartvigsen, J., & O'Brien, J. (2020). Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. *Progress in Nuclear Energy*, 123, 103317. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103317>
- Q. Hassan, I.S. Abdulrahman, H.M. Salman, O.T. Olapade, & M. Jaszczur. (2023). Techno-economic assessment of green hydrogen production by an off-grid photovoltaic energy system. *Energies*, 16(2), 744. <https://doi.org/10.3390/en16020744>

- Sadeq, A. M., Homod, R. Z., Hussein, A. K., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H. F., ... & Moghaddam, A. H. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of The Total Environment*, 173622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622>
- Sarker, A.K., Azad, A.K., Rasul, M.G., & Doppalapudi, A.T. (2023). Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review. *Energies*, 16, 1556. <https://doi.org/10.3390/en16031556>
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., & Kolb, T. (2020). State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *Chemical and Biological Engineering Reviews*, 7, 150–158. <https://doi.org/10.1002/cben.202000014>
- Song, C., Liu, Q., Ji, N., Kansha, Y., & Tsutsumi, A. (2015). Optimization of steam methane reforming coupled with pressure swing adsorption hydrogen production process by heat integration. *Applied energy*, 154, 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.038>
- Sukpancharoen, S., & Phetyim, N. (2021). Green hydrogen and electrical power production through the integration of CO<sub>2</sub> capturing from biogas: Process optimization and dynamic control. *Energy Reports*, 7(Supplement 3), 293-307. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.048>
- Suwidji, P., Chung, H. Y., & Ng, Y. H. (2020). Progress in practical hydrogen production and utilization in East Asia. *The Hong Kong Institution of Engineers*, 28(2), 88-101. <https://doi.org/10.33430/V28N2THIE-2020-0047>
- Vallejos-Romero, A., Cordoves-Sanchez, M., Cisternas, C., Saez-Ardura, F., Rodriguez, I., Aledo, A., Boso, A., Prades, J., & Alvarez, B. (2022). Green Hydrogen and Social Sciences: Issues, Problems, and Future Challenges. *Sustainability*, 15(1), 303. <https://doi.org/10.3390/su15010303>
- Vidas, L., & Castro, R. (2021). Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis. *Applied Sciences*, 11, 11363. <https://doi.org/10.3390/app112311363>
- Wu, N., Lan, K., & Yao, Y. (2023). An Integrated Techno-Economic and Environmental Assessment for Carbon Capture in Hydrogen Production by Biomass Gasification. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106693>
- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21261-21273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- Zhang, L., Jia, C., Bai, F., Wang, W., An, S., Zhao, K., ... & Sun, H. (2024). A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies. *Fuel*, 355, 129455. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129455>
- Zhiznin, S.Z., Timokhov, V.M., & Gusev, A.L. (2020). Economic aspects of nuclear and hydrogen energy in the world and Russia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 31353–31366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.260>
- Zohuri, B. (2016). *Hydrogen Energy: Challenges and Solutions for a Cleaner Future*. Springer Book. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93461-7>.