



10.33537/sobild.2024.15.2.6

### Makale Bilgisi

Gönderildiği tarih: 03.03.2024  
Kabul edildiği tarih: 02.07.2024

### Article Info

Date submitted: 03.03.2024  
Date accepted: 02.07.2024

## HİDROJEN ENERJİSİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ ÜZERİNE DEĞERLENDİRMELER

EVALUATIONS ON HYDROGEN ENERGY AND ITS ENVIROMENTAL EFFECTS

Ömer Faruk TUNÇBİLEK

Dr., Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK),  
Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü (TEMEN) Başkanı,  
omerfaruk.tuncbilek@tenmak.gov.tr

### Anahtar sözcükler

Temiz Enerji, Hidrojen, Çevre,  
İklim Değişikliği

### Keywords

Clean Energy, Hydrogen,  
Enviroment, Climate Change

### Öz

Tüm dünyada etkisini yıkıcı bir şekilde gösteren, lojistik zincirine ciddi zararlar veren Covid-19 salgının hemen ardından gerçekleşen ve hala sürmekte olan Ukrayna-Rusya Savaşı başta Avrupa ülkeleri olmak üzere tüm dünyada enerji arz güvenliğini tehdit eder bir hal almıştır. Bununla birlikte dünya genelinde karbondioksit emisyonlarının sebep olduğu bilinen küresel iklim değişiklikleri de gezegenimizi tehdit eden bir diğer unsur olarak kendisini göstermektedir. Bu iki majör sebep dünya ülkelerini bir taraftan arz güvenliğini sağlamaya iterken diğer taraftan da bu güvenliğin temiz ve yenilenebilir kaynaklar vasıtasıyla gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle geçmişi oldukça eskilere dayanan hidrojen enerjisi alternatif ve temiz bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada hidrojen enerjisi hakkında bilgiler verilirken, üretim yöntemleri, depolanması ve iletimi hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca hidrojen enerjisinin çevreye yönelik sebep olduğu olumlu ve olumsuz etkilerinden de bahsedilecektir. Bununla birlikte teknolojik gelişmelerde dikkate alınarak başarılı bir hidrojen ekosistemi oluşturmak ve doğru bir değer zinciriyle bu alternatif enerji kaynağının yaygınlaştırılması hakkında bilgi verilecektir.

### Abstract

The Ukraine-Russia War, which took place immediately after the Covid-19 pandemic, which had a devastating effect all over the world and caused serious damage to the logistics chain, and is still ongoing, has become a threat to energy supply security all over the world, especially in European countries. However, global climate changes, which are known to be caused by carbon dioxide emissions worldwide, also present themselves as another factor that threatens our planet. These two major reasons push the world's countries to ensure supply security on the one hand, and on the other hand, require this security to be achieved through clean and renewable resources. For this reason, hydrogen energy, which has a long history, emerges as an alternative and clean energy source. In this study, information about hydrogen energy will be given, as well as information about its production methods, storage and transmission. Additionally, the positive and negative effects of hydrogen energy on the environment will also be discussed. In addition, information will be given about creating a successful hydrogen ecosystem by taking technological developments into account and disseminating this alternative energy source with a correct value chain.

## 1. Giriş

Enerji arzının sürdürülebilir, maliyet etkin ve güvenli bir şekilde sağlanması ülkelerin ekonomik, sosyolojik, politik vb. gündemlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle her ülke ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlamak gayesiyle öncelikle kendi yerli doğal kaynaklarını etkin ve verimli şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Zira enerjide alanında dışa bağımlılık ülkelerin uluslararası ilişkilerinde alacağı kararları da önemli ölçüde etkilemektedir (Tunçbilek, 2021).

1973 yılında yaşanan Arap-İsrail Savaşıyla birlikte ortaya çıkan enerji krizinden sonra, batılı ülkeler özellikle Ortadoğu petrolüne olan bağımlılığın azaltılması için yeni arayışlar içerisine girmişlerdir. Bu arayış neticesinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmış ve bu kaynakların enerji üretimi içerisinde payları giderek artmıştır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle güneş ve rüzgarın süreksiz kaynaklar olması nedeniyle, sürdürülebilir enerji arzının sağlanması için farklı enerji depolama yöntemleri benimsenmiştir. Bu enerji depolama metotlarından birisi de eskiden beri bilinen ama hiçbir zaman arzu edilen seviyede kullanılmayan hidrojen enerjisidir (Önder ve Şahin, 2021).

Hidrojen enerjisinin üretimi ve kullanımı çok eski zamanlara dayanmasına rağmen, enerji üretiminde yahut depolamada diğer enerji kaynaklarına alternatif olarak değerlendirilememiştir. Ancak 2022 yılında patlak veren Rusya-Ukrayna Savaşı, Avrupa ülkelerini özellikle arz güvenliğini sağlamak için yeni arayışlara itmiştir. Bu noktada hidrojen enerjisi yeniden ön plana çıkmış ve hidrojene yönelik yatırımlar hız kazanmıştır.

Arz güvenliği konusuna ek olarak Paris İklim Anlaşmasının taraf olan ülkelere dayatmış olduğu 2050 net sıfır emisyon hedefi yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu hususta hidrojen önemli bir taşıma ve depolama aracı olarak tekrar ilgi odağı haline gelmiştir. Küresel iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması için emisyonu sadece su buharı olan hidrojenin kullanımının artırılması dünya genelinde önemli bir hedef haline gelmiştir.

Enerji dönüşümünün düşük emisyonla gerçekleştirilmesi amacıyla hidrojen enerjisinin yaygınlaşabilmesi için dünyada pek çok ar-ge faaliyeti gerçekleştirilmekte, proje üretilmekte ve çeşitli pilot tesisler kurulmaktadır. Özellikle Doğu Asya ve Avrupa ülkeleri bu hususta başat konumdadır. Son yıllarda Ortadoğu ülkelerinden BAE, Suudi Arabistan ve Mısır'da hidrojen üzerine önemli çalışmalar gerçekleştirilmekte olup Ar-Ge amaçlı küçük ölçekli projeler faaliyetleri bulunmaktadır. Arjantin'de kurulan hidrojen üretimine dayalı rüzgar türbinleri, Çin'de hidrojen üretmek amacıyla kurulan mikro hidroelektrik santraller, Hindistan ve Güney Kore'deki ulaşımda kullanılan hidrojen yakıtlı taşıtlar bu konuda gerçekleştirilen çalışmalara örnek teşkil etmektedir. Bunlara ek olarak,

coğrafi olarak uygunluğu dikkate alındığında Libya'da güneş enerji santralleriyle hidrojen üretiminin sağlanması amaçlanmakta, Kolombiya, Portekiz, İtalya ve Rusya gibi ülkelerde de hidrojen kullanımının yaygın hale getirilmesine yönelik faaliyetler gerçekleştirilmektedir (Mutlubaş ve Özdemir, 2019).

Türkiye'nin hidrojen enerjisi üretimi ve kullanımına yönelik çalışmaları henüz istenilen seviyede olmasa da devam etmektedir. Hidrojen tahrikli motorla çalışan otobüs ve Bozcaada'da yer alan rüzgar enerjisinden hidrojen üretimi gerçekleştiren projeler pilot tesis faaliyetleri arasındadır. ENERJİSA öncülüğünde Marmara Bölgesinde bir hidrojen vadisi çalışmaları devam etmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile ilgili kuruluşları başta olmak üzere pek çok kamu kurumu da bu konuda çalışmalar yürütmektedir. Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu Temiz Enerji Enstitü Başkanlığınca da hidrojen üzerine Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Hidrojen her ne kadar temiz enerji dönüşümünde önemli bir geçiş elemanı olsa da üretim ve kullanım konusunda bazı kısıtlıklar da söz konusudur. Hidrojen diğer yakıtlarla kıyaslandığında difüzyon mekanizması olarak adlandırılan ani salımlar sırasında ani tutuşmaya en yatkın olanıdır (Malkov, 2012). Hidrojen, metan propan gibi diğer yanıcı gazlarla karşılaştırıldığında hidrojen alevlerinin sönmülmeye tabi tutulması çok zor olduğundan iki paralel plaka arasından geçen bir alevin söndürülebileceği maksimum aralık olan sönmülmeye uzaklığı en düşük olan gazdır. Hidrojenin sönmülmeye uzaklığı 0,64 mm iken metan da bu mesafe 2.3 mm propan da ise 1.78 mm'dir (Green, 2005).

Hidrojen ekosisteminin Dünyada ve özellikle Türkiye'de yaşadığı en önemli sorunlar arasında standart ve mevzuatlardan bahsetmekte gerekir. Dünya'da hidrojene yönelik standart ve mevzuatlar yeni yeni oluşurken Türkiye'de henüz hidrojene özel bir üretim/iletim mevzuatı yahut standart oluşturulmamıştır. Lakin bu hususla ilgili olarak çeşitli kamu kurum ve kuruluşları çalışmaktadır.

Bu çalışmada hidrojen enerjisinden bahsedilerek renklerine göre üretim yöntemleri, depolanması, iletimi ile hidrojen enerjisinin çevreye olan etkilerinden bahsedilecektir.

## 2. Hidrojen Enerjisi ve Üretim Yöntemleri

Hidrojen dünyanın yapıtaşını meydana getiren temel elementlerden biridir. Hidrojen oksijenle suda ve birçok kimyasal bileşik için karbonla bağ yapmasından dolayı yer yüzeyinde en fazla bulunan elementlerden birisidir. Ancak hidrojen, doğada saf halde bulunmamaktadır.

Hidrojen, pozitif yüklü bir proton ve negatif yüklü bir elektrondan meydana gelmektedir. Elektrolizör vasıtasıyla sudan hidrojen edinilebilir olması bu elementin kullanımını kolay ve basit edinilebilir hale

getirmektedir. Hidrojen, hidrokarbonlarla ve birçok elementle bileşik halinde bulunabildiği gibi fosil yakıtlarda da bulunmaktadır.

Suyun elektrolizi veya ısıl işlemle parçalanması yahut petrol ve kömür gibi fosil ürünlerin parçalanması yöntemleriyle de üretilen hidrojen havadan 14.4 kat daha hafif, zehirsiz ve renksiz bir gaz olup dünyada en çok bulunan elementlerdendir (Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, 2023).

Hidrojen normal atmosfer basıncı altında eksi 252.77°C sıcaklıkta sıvı faza getirilip sıvı olarak depolanabilir. Hidrojen yakılması neticesinde su buharı haricinde etrafı kirletici bir salımı yoktur, bu sebeple de çevreci yönüyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir (Kılıç, 2023).

Üretimi ve kullanımı çok eskiye dayanan hidrojen ilk defa 16. yüzyılda İsviçreli simya ustası Paracelsus tarafından bazı metaller üzerinde asitlerin etkisini araştırırken elde edilmiştir. Hidrojen 1776 yılında Cavendish tarafından ayrı bir madde olarak tanımlanmasından yıllar önce çeşitli yollarla üretilmiştir (Polat, Yalçın, Şahin, 2012).

Hidrojenin ve oksijenin elektrolizör kullanılarak ilk üretimi, 1898 Linde prosesi vasıtasıyla hidrojenin sıvılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. 1902 yılında







Oerlikon tarafından ilk ticari elektrolizör alt yapısının kurulması, 1929 yılında saf para-hidrojen üretimi, 1931'de Döteryum izotopunun bulunması, 1935 yılında Fosforik asitin nötron bombardımanı yoluyla tiryum, ağır hidrojen elde edilmesi hidrojenin tarihindeki önemli kilometre taşlarındandır. Geçmişten günümüze hidrojen üzerine Ar-Ge çalışmaları özellikle depolama, sıvılaştırma ve iletim üzerine hala devam etmektedir (Polat vd, 2012).

Hidrojen birincil enerji kaynağı değildir, güneş doğalgaz, metan ve benzin gibi enerji kaynakları kullanılarak farklı yöntemlerle üretilir. Gaz olarak hidrojen, uzun mesafeler boyunca ucuz bir şekilde taşınabilir ve iletiği yerde elektriğe dönüştürülebilir yahut doğrudan da kullanılabilir (Johnston vd, 2005).

### 3. Hidrojenin Renkleri

Hidrojen üretim yöntemlerine göre farklılıklar göstermektedir. Temel ayrım üretim prosesinin yenilenebilir enerjiye dayalı mı yoksa fosil kaynaklar kullanılarak gerçekleştirildiğidir. Hidrojen, üretim sürecinde meydana gelen karbondioksit emisyonu ve çevreye olan etkisine göre çeşitli renk kodlarıyla belirtilmektedir. Karbondioksit salımının azaltılarak sera gazının etkisinin azaltılmasında da emisyonuz renkte üretimler önem arz etmektedir (Şekil 1).

Şekil 1: Üretim Metotlarına Göre Hidrojen Renkleri

Teknoloji	Birincil Enerji/Elektrik Kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Maliyeti (ABD doları/kgH <sub>2</sub> )
 Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
 Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
 Piroлиз	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

Kaynak: (Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, 2023)

a. Yeşil Hidrojen

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojen anlamına gelmektedir. Karbon emisyonu düşük temiz enerji kaynakları kullanıldığından Yeşil Hidrojen ismini almıştır. Elektrolizör vasıtasıyla hidrojen üretimi gerçekleştirilir. Üretilen hidrojen doğrudan kullanılabilir gibi depolanabilmektedir. Bu durum bazı yenilenebilir enerji santrallerinde oluşan süreksizlik ve kararsızlığın giderilmesi adına önemli bir imkan sağlamaktadır. Ancak yeşil hidrojen üretimi diğer metotlara kıyasla en pahalı olanıdır. Güncel 1 kg hidrojen üretim bedeli 4-9 ABD Doları arasında değişmektedir.

b. Pembe Hidrojen

Elektrolizör için ihtiyaç duyulan enerjinin nükleer enerji kullanılarak elde edilmesi sonucunda elde edilen hidrojenidir. Nükleer enerjinin bir temiz enerji kaynağı olduğundan bahisle üretim prosesi düşük sera gazı emisyonu ortaya çıkarır. Yeşil hidrojen üretimine kıyasla biraz daha ucuz bir metottur. 1 kg hidrojen üretim bedeli 3.5-7 ABD Doları arasında değişmektedir.

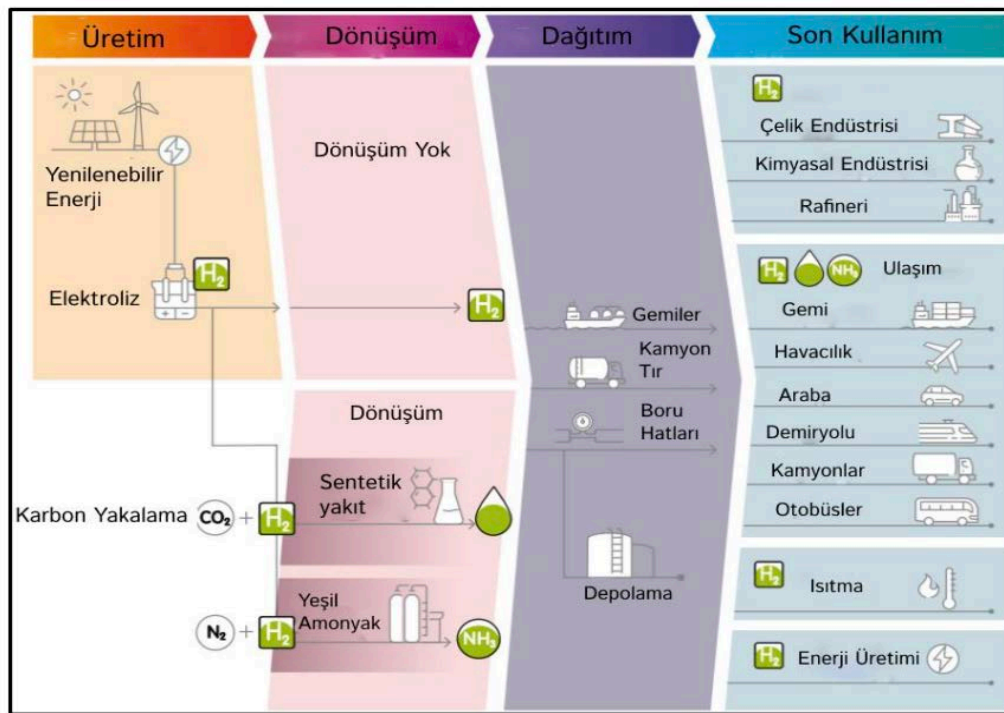
c. Turkuaz Hidrojen

Fosil yakıtlardan piroliz yöntemiyle elde edilen hidrojenidir. Karbondioksit emisyonu oldukça düşük bir hidrojen üretim metodudur. Bununla birlikte hidrojen üretim bedeli de oldukça uygundur. Güncel 1 kg hidrojen üretim bedeli 1.25-2 ABD Doları arasında değişmektedir.

d. Mavi Hidrojen

Buhar metan reformlamayla yani karbon yakalama ve depolama yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Bu durum gri renkte olması öngörülen hidrojenin karbonun tutulmasıyla mavi olarak adlandırılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte buhar reformasyonu yoluyla da üretilmekte ve yine üretim prosesinde meydana gelen karbon tutulmakta ve depolanmaktadır. Üretim prosesi sonrasında düşük sera gazı emisyonu ortaya çıkar (Şekil 2). Güncel 1 kg hidrojen üretim bedeli 1.5-3 ABD Doları arasında değişmektedir.

Şekil 2: Yeşil ve Mavi Hidrojenin Üretimi, Dağıtımı ve Kullanımı



Kaynak: (IRENA, 2020)

e. Gri Hidrojen

Doğalgaz kullanılarak buhar metan reformasyonu yoluyla karbon yakalamadan üretilen hidrojenidir. Doğalgazın bir fosil yakıt olması nedeniyle üretim prosesi sonrasında yüksek sera gazı emisyonu ortaya çıkmaktadır. Halihazırda renk kodları verilen hidrojen türleri içerisinde çevreye olumsuz etkisi en yüksek olan hidrojen üretim yöntemidir. Ancak sanayide üretim maliyetleri diğerlerine göre daha düşük olduğundan en fazla tercih edilen hidrojenidir. Güncel 1

kg hidrojen üretim bedeli 0.5-1.7 ABD Doları arasında değişmektedir.

f. Kahverengi Hidrojen

Kömürün gazlaştırılması yöntemiyle elde edilen hidrojenidir. Karbondioksit emisyonu en yüksek olan hidrojen üretim metodudur. Ancak hidrojen üretim bedeli bir hayli uygundur. Güncel 1 kg hidrojen üretim bedeli 1-2.2 ABD Doları arasında değişmektedir.

#### 4. Hidrojenin Depolanması

Sıvı ve gaz olarak saf halde basınçlı tanklarda hidrojen depolanabileceği gibi, kimyasal olarak hidrür şeklinde veya fiziksel olarak nanotüplerde de depolanabilmektedir. Hidrür olarak depolama; sıvı halde sodyum bor bileşiminde olabileceği gibi katı halde metallerde de olabilmektedir (Şenaktaş, 2005).

Hidrojenin gaz olarak depolanması halinde düşük olan hacimsel yoğunluğunu artırmanın yolu söz konusu gazın daha düşük sıcaklıkta, örneğin azotun sıvı form sıcaklığında yahut daha fazla soğutulması ile -253°C sıcaklıkta sıvı hal olarak depolanmasıdır. Fakat burada dikkate alınması gereken önemli bir husus sıvılaştırma için gerekli enerjinin küçümsenmeyecek düzeyde olduğudur. Burada ihtiyaç duyulan enerji hidrojenin elde edilecek enerjinin yaklaşık 1/4'ü kadardır (Ewald, 1998). Bu durumda maliyeti yükselten bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bir diğer depolama yöntemi ise hidrojenin karbon nanotüplerde depolanmasıdır. Karbon nanotüpler literatürde grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş hali olarak tanımlanmaktadır. Çapları 10-20 nanometre seviyesinde, boyları ise mikron seviyesindedir. Nanotüpler çok-duvarlı olarak üretilebileceği gibi tek-duvarlı tüpler olarak da üretilebilmektedir. Farklı eklemelerle oluşturulan, örneğin alkali-ilaveli (Li-K), nanotüpler de depolama için kullanılabilir. Hidrojenin hacminin çok küçük olmasından dolayı nanotüpler avantajlı olarak karşımıza çıksa da çok küçük bir hacme ve yoğunluğa sahip olmasından dolayı depolanması oldukça güç bir hale gelmektedir.

Hidrojen kimyasal olarak alaşımlarda, metallerde ve ara metallerde hidrür formunda depolanabilmektedir. Reaksiyon;  $M + (x/2)H_2 = MH_x$  formülasyonu olarak bilinir. Bu reaksiyon, sıcaklığa ve basınca bağlı olarak yön değiştirmekle birlikte metalin özelliğine göre ekzotermik veya endotermik olabilmektedir. Metal hidrürlerin hidrojen depolama aracı olarak kullanılabileceği gibi, kendine özgü çeşitli uygulama alanları da mevcuttur. Bu alanlardan en bilineni reaksiyonun tersinir olma özelliğine ve ısısına dayalı soğutma-ısıtma termodinamik araç uygulamalarıdır. Bu ve benzeri uygulamalarda reaktör için ısı ve sıcaklık kontrolünün önem kazandığı bilinmektedir. (Kaplan, Veziroğlu 2003).

#### 5. Hidrojenin Taşınması

Hidrojenin kullanılabilirliğinin artırılması için üretildiği bölgeden, tüketim yerlerine taşınması önem arz etmektedir. Hidrojen deniz-kara-demir yollarında

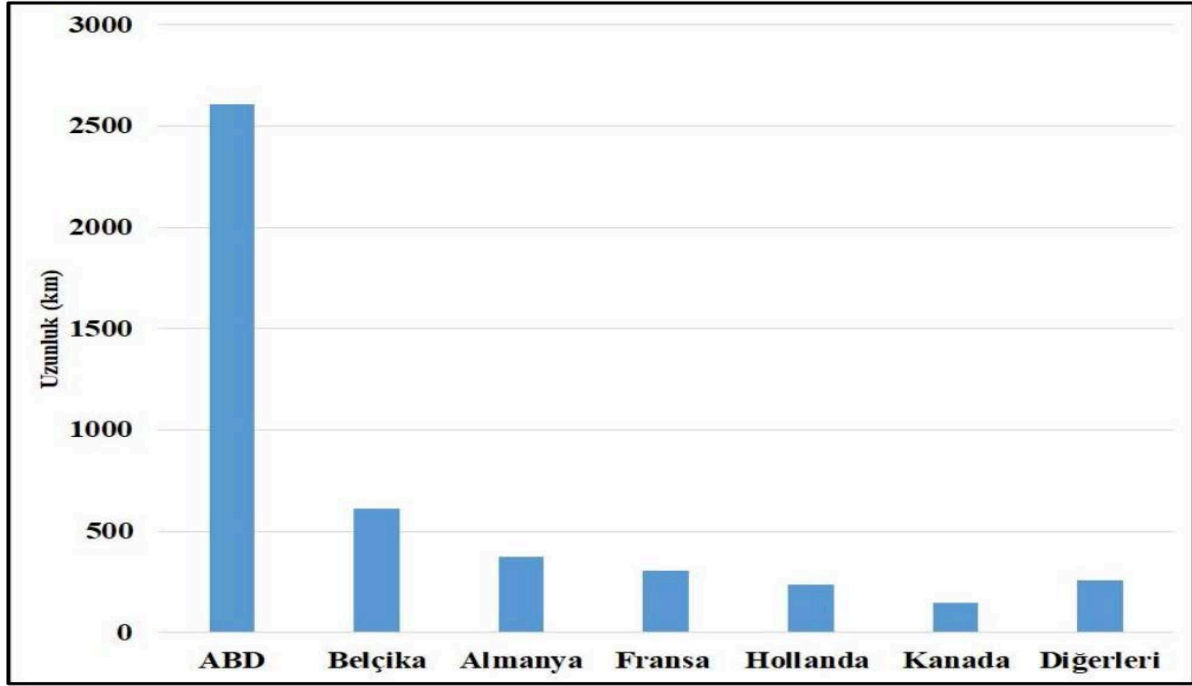
tanklarda yahut boru hatları ile taşınıp tüketicilerin kullanımına sunulabilmektedir. Yoğunluğunun düşük olmasından dolayı depolamada yaşanan sıkıntılara benzer şekilde hidrojenin taşınmasında da benzer sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Bu durum da hidrojenin taşınmasını diğer gazlara kıyasla maliyetli bir hale getirmektedir.

Doğal gaz iletimi için kurulan yer altı boru dağıtım ağının bazı teknik değişikliklerle hidrojen taşınması içinde kullanılması mümkündür. Boru hatları ile taşıma dışında hidrojen, basınçlandırılarak veya sıvılaştırarak tüplere konup tankerlerle de taşınabilir. Bu durum hidrojen gazının doğal gaz veya hava gazına benzer şekilde borular aracılığıyla her yere taşınabilmesi avantajı olarak değerlendirilmektedir.

Petrol tankerlerinden sızan veya patlama/kaza neticesinde denizlere saçılan binlerce ton ham petrol, geri dönüşü çok zor zararlara yol açmaktadır. Barajlarda veya enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin ihtiyaç duyulan yerlere iletilmesinde ve dağıtılmasında önemli ölçüde enerji kaybı oluşmaktadır. Gerçekleştirilen bir çalışmaya göre ülkemizde elektrik enerjisinin elektrik iletim hatları ile taşınması sırasında kayıp enerji miktarının Keban Barajında bir yılda üretilen elektrikten yaklaşık olarak bir buçuk kat fazla olduğu hesaplanmıştır (Kılıç, 2023). Bu durumlar dikkate alındığında hidrojenin ihtiyaç duyulan her yerde lokal olarak üretilebildiği için çok uzun iletim hatlarına gerek olmaması, daha kısa ulaşım hatlarıyla üretim merkezleri arasında kalacak şekilde taşınması gerçekleştirilmesi bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak boru hatlarının yüksek basınca ihtiyaç duyması ve boru hattındaki kullanılan malzemenin gevrekleşmesine karşı önlemler alınması gerektiğinden iletim maliyeti artmaktadır. Hidrojenin eş değer enerji miktarında doğalgaz kadar taşınabilmesi için mevcut doğalgaz boru hatlarının daha büyük çaptaki boru hatları ile değiştirilmesi gerekmektedir (Kılınc, 2008). Bu nedenle hidrojen belirli bir oranda doğalgaza katılarak taşınmaktadır.

Global ölçekte ekseriyeti hidrojen üreticileri tarafından işletilen yaklaşık 4500 km uzunluğunda hidrojen iletim hattı bulunmaktadır. ABD'de Teksas ve Louisiana arasında 2608 km uzunluğunda olan bu hattın, dünyanın en uzun hidrojen boru hattı olduğu bilinmektedir. Onu 615 km ile Belçika ve 380 km ile Almanya takip etmektedir. Dünya üzerinde bulunan hidrojen boru hattı uzunlukları verilmiştir (Şekil 3) (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021).

Şekil 3: Dünya’da Kullanımda Olan Hidrojen Boru Hat Uzunlukları



Kaynak (Kılıç, 2023)

Hidrojenin bir diğer taşınma imkanı da amonyak formunda taşınmasıdır. Özellikle maliyet açısından deniz yoluyla hidrojenin amonyak formunda taşınması mümkündür. Amonyak uluslararası olarak ticareti yapılan bir üründür. Ancak amonyak zehirli bir kimyasal olduğundan dolayı güvenlik sorunu ortaya çıkarmakta olup bu durumda ek işletme maliyetlerini beraberinde getirmektedir (IEA, 2021).

### 6. Hidrojen Enerjisinin Çevresel Etkileri

Enerji dönüşümü ve elektrifikasyonun çevreci ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleşmesi için ilk olarak, elektrik üretiminin fosil yakıtlar yerine rüzgar, güneş, su vs. gibi yenilenebilir kaynaklar aracılığıyla gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ancak başarılı bir enerji dönüşümü için yalnızca yenilenebilir enerji kullanmak yeterli değildir. Bu kapsamda enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi de bu hususta atılacak bir diğer gerekli adımdır. Bununla birlikte bireysel ve toplu taşıma araçlarında kullanılan yakıtlar ile binaların ısıtma ve soğutma sistemlerinin de fosil yakıt kullanımı yerine yenilenebilir kaynaklarıyla elektrifikasyonun sağlanması gerektiği de yadsınamaz bir gerçektir. Bu noktada tüm bu faaliyetleri çevresel açıdan olumlu bir şekilde gerçekleştirmek için yeşil hidrojen akla gelmektedir. IRENA tarafından yayınlanan Hidrojen Raporuna göre, yeşil hidrojen, elektrifikasyonu zor olan demir, çelik, çimento gibi sektörler arasında önemli bir bağ kurabilir ve enerji dönüşümünün çevreci bir şekilde gerçekleştirilmesinde kolaylaştırıcı rol üstelenebilir (IRENA, 2021).

Çevresel etkileri açısından değerlendirildiğinde hidrojenin en olumlu yanı çevreye herhangi bir zararlı etki oluşturmadan yanması sonucunda su buharı üretmesidir. Atmosfere fosil yakıtlardan farklı olarak kükürt dioksit, karbondioksit, azot vs. gibi zararlı emisyon salımı gerçekleştirmediğinden alternatif bir enerji kaynağı olarak yaygınlaşması küresel iklim değişikliği hedeflerine ulaşmada katkı sağlayacaktır (Tunçbilek, 2022).

Hidrojen sanayiden ulaşıma, kimya sektöründen savunma sanayiine kadar pek çok amaç için kullanılabilen bir enerji kaynağıdır. Kullanımı uygun motorlar için temiz bir yakıt olarak, elektrik enerjisi ihtiyacının çevreci bir şekilde giderilmesinde ve buna benzer pek çok alanda güvenle kullanılabilir. Hidrojen enerjisinin diğer yakıtlara kıyasla daha verimli olması ve mevcut doğalgaz hatlarıyla birlikte taşınabilmesi de çevresel açıdan önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Güvenlik açısından düşünüldüğünde de, fiziksel olarak havadan hafif bir gaz olduğundan herhangi bir kaçak yahut sızıntı olması durumunda petrol ve türevleri gibi çevresel felakete yol açmaz, hızla yükselerek havaya karışır ve çok tehlikeli bir durum oluşturmaz (Evli, 2018).

Hidrojenin olumsuz etkilerinden bahsedecek olursak, elde edilirken su dışında farklı bir kaynak kullanılması durumunda ekosisteme zararlı gazlar oluşturabilmektedir. Hidrojenin alevli yanma yöntemiyle kullanılması durumunda, eser miktarda NOx oluşmaktadır. Az miktarda dahi olsa NO<sub>x</sub> gazı sera etkisi oluşturması nedeniyle küresel ısınmaya sebep olan gazlardan birisi olarak bilinmektedir. Bununla birlikte

biyolojik temelli kaynaklardan hidrojen üretilmesi halinde doğada serbest kalan çok sayıda farklı gaz çeşidi ortaya çıkmaktadır. Fosil ve biyolojik kaynaklı girdilerin yanması sonucunda salınan gazlardan birisi olan karbondioksitte benzer şekilde sera etkisi oluşturarak çevreye olumsuz etki oluşmasına sebep olan gazlardandır (Adıyaman, 2012).

Hidrojen kullanımının çok fazla yaygınlaşması halinde atmosfere yerleşerek ozon tabakası üzerinde belirgin hasar meydana getirebileceği, henüz yeterince bilimsel çalışma olmasa da hipotez aşamasında bir çalışmadır. Bulutların yeryüzüne alçalması ve yağmur bırakması neticesinde mikrobik hastalıkların çoğalarak ekolojik dengeyi bozma ihtimali de söz konusudur. Bununla birlikte hidrojen teknolojilerinin iklimler üzerindeki etkilerinin neler olabileceği de araştırmacılar tarafından incelenen ancak henüz yeterli bilimsel sonucun ortaya çıkmadığı bir konudur. Tüm bu nedenlerden ötürü hidrojen, kullanımında oldukça dikkatli olunması gereken ve yapılan akademik yahut Ar-Ge çalışmaları neticesiyle literatüre katkı sunulması elzem olan bir enerji kaynağıdır. Zira henüz bu hususların sonuçlarıyla ilgili bilinen belirgin bir çalışma yoktur.

Doğada bir hayli bol olduğu bilinmesine rağmen enerji üretmek için kullanılan hidrojenin saf olması çok önemlidir. Saf hidrojen üretiminin maliyeti petrol ve doğalgaza kıyasla oldukça fazladır. Ek olarak, hidrojen ile çalışan yakıt hücreleri içten yanmalı motorlarla kıyaslandığında oldukça pahalıdır (Şenaktaş, 2005). Üstelik bu teknolojilerin üretiminde oluşan karbon ayak izinin günümüzde bir hayli yüksek olduğu bilinmektedir.

Hidrojen enerjisinden faydalanırken uygulamada bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Hidrojen petrole kıyasla dört kat fazla hacme sahiptir. Bu nedenle hidrojenin depolandığı tanklar ile yakıt hücreleri hacmi oldukça geniş bir yer kaplamaktadır. Hidrojenin kapladığı hacmi azaltmak için hidrojeni sıvı halde depolamak gerekmektedir. Bunun içinde yüksek basınç ile soğutma işlemine ihtiyaç vardır. Bu durumda yine çevresel açıdan risk oluşturabilecek bir husustur.

Hidrojen kullanımıyla ilgili bir diğer olumsuz durum ise yakıt hücresi ile çalışan araçların yakıt takviyesi yapmak istedikleri zaman ortaya çıkacağı değerlendirilmektedir. İstasyonlarda yakıt hücreleri için yeterli hidrojen bulmak bir sorun olabileceği gibi bu ve benzer enerji kaynaklarına yatırım yapmanın yeterli kullanıcı olmaması yatırımcı açısından ölü yatırım olma gibi riskler oluşturmaktadır. Bu durumda kullanılmayan teknolojinin zamanla çevresel atık oluşturma riski ortaya çıkmaktadır. Bu ve benzeri sorunların çözümü, belirli bir ekonomik teşvik ihtiyacı ortaya çıkarır ve zaman gerektirir.

Hidrojen çevresel açıdan fosil enerji kaynaklarına göre avantajlı görünse de, bir yatırım ya da proje gerçekleştirilmesi durumunda öncelikle uçtan uca tüm değer zincirinin oluşturulması elzemdir. Bu durum sağlıklı bir hidrojen ekosistemi için olmazsa olmazdır. Aksi halde süreç içerisinde beklenmeyen çevresel sorunlar ve mali belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir.

## 7. Sonuç ve Değerlendirme

Teknolojinin ve sanayinin gelişmesiyle birlikte enerjiye olan ihtiyaçta doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Ancak dünyanın bir önceki yüzyılda olduğu gibi sanayileşmede fosile dayalı enerji kaynaklarını kullanabilme lüksü yoktur. Küresel ısınma ve iklim değişikliği sinsi bir düşman gibi tüm dünyayı etkisi altına almış ve etkilerini giderek artırmaktadır. Paris İklim Anlaşmasıyla birlikte dünya ülkelerine önemli görev ve sorumluluklar düşmektedir. Ülkeler tarafından taahhüt edilen bu rolleri yerine getirmekte temiz enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimi çok önemli bir konumda yer almaktadır. Küresel salgın sonrasında yaşanan enerji krizi ve lojistik aksamalar yeni enerji üretim modellerine olan ihtiyacı artırmıştır. Üretimi bir hayli eskilere dayanan ancak iletim, depolama ve güvenlik gibi sorunlar nedeniyle hiçbir zaman istenilen seviyede kullanımı gerçekleşmeyen hidrojen enerjisi de bu yeni dönemde önemli bir aktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisi üretmek amacıyla, depolanabilir ve taşınabilir özelliğe sahip hidrojen, aynı zamanda bir yakıt olarak kullanılmakta ve mevcut içten yanmalı motor endüstrisine alternatif oluşturabilecek yakıt hücreleri (pilleri) sayesinde, ulaşımda geniş bir kullanım alanına sahip olacağı değerlendirilmektedir.

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, yeşil hidrojen üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı çevreci bir model olarak karşımıza çıkmaktadır. Yakıt hücrelerinde kullanımı sonrasında emisyon olarak sadece su buharı oluşması önemli bir avantaj olarak görülmekte ve genel itibarıyla çevreye yönelik olumlu bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Diğer renkteki hidrojen üretim metotları da doğru planlama ve fizibilite ile daha çevreci hale getirilebilmektedir.

Hidrojen enerjisinin üretim maliyetinin, diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak enerji yatırımları hibrit olarak düşünüldüğünde ve hidrojenin enerji depolama aracı yahut yatırımın bir yan ürünü olarak değerlendirilmesi durumunda maliyetlerin düşebileceği hesaplanmaktadır.

Hidrojen, Avrupa Birliği tarafından geleceğin enerjisi olarak nitelendirilmekte ve tüm dünyada hidrojene yönelik araştırma ve yatırımlar artan ivmeyle devam etmektedir. Türkiye'de de benzer şekilde çalışmalar yürütülmekte ve 2021 yılında Paris Anlaşması'na taraf olduğu durumu dikkate alındığında, hidrojen bu taahhütlerin yerine getirilmesinde önemli ayrıcalıklar sağlayacak bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel ısınma

parametrelerine ek olarak yaşanmakta olan enerji krizi tüm dünya ülkelerini olduğu gibi Türkiye'ye de enerji arz güvenliğinin ne kadar önemli olduğunu hatırlatmıştır. Bu amaçla enerjide dışa olan bağımlılığı azaltan ve iklim değişikliğinin engellenmesine katkı sunacak olan her husus özenle incelenmeli ve ekosisteme bir değer olarak katılmalıdır.

2023 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" Raporunda Türkiye hidrojen enerjisine yönelik önemli hedefler koymuştur. Bu hedefler doğrultusunda mevcut mevzuat ve standartların hidrojene uygun hale getirilmesi ve teşviklerin artırılması gerekmektedir. Yeşil hidrojen üretiminde ve depolanmasında başta bor maden ve türevleri olmak üzere yerli kaynakların değerlendirilmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilen yatırımların ihracat odaklı olması, coğrafi olarak çok uygun bir bölgede olduğundan dolayı bu teknolojide başat ülke konumuna gelmek için çaba gösterilmesi gereklidir. Özellikle depolama ve iletimde amonyak, metin alkol vs. gibi üretim teknolojilerine yatırım yapılarak ihracatın artırılması hedeflenmelidir.

Hidrojen enerjisi özellikle Dünyanın Net Sıfır hedeflerine ulaşmasında küresel ısınmanın arzu edilen değerler arasında tutularak iklim değişikliğinin önlenmesi hususunda önemli bir temiz enerji geçiş aparatı konumundadır. Çelik, çimento, kömür, gübre vs. gibi karbon emisyonu yoğun sektörlerin karbonsuzlaştırılması için önemli bir temiz üretim aracıdır. Üretilen elektriğin depolanmasını sağlayarak arz güvenliğine katkı sunması hidrojeni önemli bir konuma getirmektedir. Bunların dışında, savunma sanayiinde çok farklı uygulamaları ve verimli kullanımları mevcuttur. Özellikle sessiz bir enerji üretimi sağlıyor olması, hava/kara/deniz pek çok platformda silahlı kuvvetlere fayda sağlayabilecek bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Hidrojen enerjisinin iklim değişikliği, enerji arz güvenliği ve diğer konulardaki avantajlarına ek olarak yeni iş istihdamı oluşturacak alanlar oluşturması da beklenmektedir. Üretilmesinden son tüketiciye ulaşana kadar bir ekosistem olarak değerlendirilmektedir. Hidrojen üretimi, hidrojenin depolanması, hidrojenin taşınması, hidrojen enerji sistemlerine yönelik teknolojilerinin üretimi, yakıt hücreli araçların üretimi, bunların bakımı, idamesi gibi birçok alanda istihdam oluşabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca üniversitelerde ve kamu kurumlarında hidrojen sistemleri için nitelikli insan kaynağı ve uzman kişileri yetiştirmek amaçlı istihdam faaliyetleri gerçekleştirilebilmesi önem arz etmektedir. Ancak tüm bu ekosistemin sağlıklı bir şekilde yol alması için devletlerin bu alana desteği ve kararlılığı oldukça önemlidir.

## 8. Kaynakça

- Adıyaman Ç. (2012). Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Politikaları, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi-2012.
- Evli, S.,(2018), Türkiye'de Sürdürülebilir Kalkınma ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Çalışma İktisadi Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Ewald, R. (1998). Requirements for Advanced Mobile Storage Systems, Int. J Hydrogen Energy, Vol.23, 9, s 803-814.
- Green, M.A. (2005). Hydrogen Safety Issues Compared to Safety Issues with Methane and Propane. 2005 Cryogenic Engineering Conference, KeystoneCO, United States.
- IEA., (2021). Global Hydrogen Review., International Energy Agency.,sf.55
- IRENA. (2020). Green Hydrogen A Guide To Policy Making, Abu Dabi, International Renewable Energy Agency, sf.55.
- IRENA Hidrojen Raporu, 2021, <https://irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>
- Hidrojen Teknolojileri Derneği. (2021). Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası., İstanbul, Hidrojen Teknolojileri Derneği, sf.39.
- Johnston B., Mayo M.C., Khare A. (2005), Hydrogen: The Energy Source For The 21st Century, Technovation, 25(6), 569-585. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2003.11.005> .
- Kaplan Y., Veziroğlu N. (2003). Mathematical Modelling of Hydrogen Storage in a LaNi<sub>5</sub> Hydride Bed, International Journal of Energy Research 27(11), sf 1027-1038.
- Kılıç F.(2023). Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye'de Hidrojen Enerjisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Coğrafya ABD.
- Kılınç, N. (2008)., Hidrojen Enerjisinin ve Hidrojen Teknolojilerinin Ekonomideki Yeri Pazar Gelişimi ve Pazar Payı Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Malkov, V. (2012). Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering, [E-book].bookboon.com.
- Mutlubaş, H., Özdemir, Z. Ö. (2019). Hydrogen as an energy carrier and hydrogen production methods, Bartın Üniversitesi Uluslararası Fen Bilimleri Dergisi, 2(1), sf. 16-34.



- Önder F., Şahin R.(2021). Türkiye’de Hidrojen Enerjisi ve Geleceği, 5. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu, Zonguldak.
- Polat T., Yalçın H., Şahin M. (2012). Hidrojenin Nükleer Enerji ile Üretim Yollarının İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 15 (2), sf. 46-69.
- Şenaktaş, B., (2005). Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.
- Tunçbilek, Ö.F., (2021). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri ve Sosyal Kabul, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Tunçbilek, Ö.F. (2023), Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri Üzerine Bir Değerlendirme, Sağlık ve Çevre Ekonomisi Alanında Akademik Araştırmalar, Ekin Yayınevi.
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Strateji ve Yol Haritası Belgesi (2023), Enerji ve Tabii Kaynaklar 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).