



## Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu

Mayıs 2021

### Hazırlayanlar

Burcu Bektaş - Escarus

Can Hakyemez – Ekonomik Araştırmalar

Damla Özçelik Yanık – Finansal Danışmanlık

Orçun Yıldızca – Mühendislik ve Teknik Danışmanlık

## İÇİNDEKİLER

Grafik Listesi.....	ii
Tablo Listesi .....	ii
Şekil Listesi.....	ii
Kısaltmalar .....	iii
1. Yönetici Özeti.....	1
2. Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi Nedir?.....	3
2.1.Hidrojen Enerjisinin Özellikleri.....	3
2.2.Hidrojen Enerjisi Kaynakları .....	5
2.2.1. Fosil Kaynaklar .....	5
2.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları .....	6
2.2.3. Nükleer Kaynaklar .....	8
3. Hidrojen Enerjisinin Gelişimi.....	9
3.1.Hidrojen Enerjisinin Geçmişi .....	9
3.2.Hidrojen Enerjisinin Mevcut Durumu .....	10
3.3.Hidrojen Enerjisinin Potansiyeli .....	13
4. Hidrojen Enerjisinin Küresel Uygulamaları.....	15
4.1.Başlıca Ülkelerin Hidrojen Girişimleri.....	15
4.2.Hidrojen Alanında Öne Çıkan Projeler ve Uygulamalar.....	17
5. Türkiye'deki Hidrojen Enerjisi Gelişmeleri .....	21
6. İklim Değişikliği İle Mücadelede Hidrojen Enerjisi.....	23

## Grafik Listesi

<b>Grafik 1.</b> Saf Hidrojen Talebi Gelişimi .....	11
<b>Grafik 2.</b> Dünya Genelinde Verilen Teşvikler ve Sayıları .....	17

## Tablo Listesi

<b>Tablo 1.</b> Kaynaklara Göre Hidrojen Üretim Maliyeti (2018) .....	12
<b>Tablo 2.</b> Doğal Gaz İle Hidrojen Üretimi Maliyeti (2018, USD/kilogram) .....	12

## Şekil Listesi

<b>Şekil 1.</b> Hidrojen Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Enerjisi Renkleri .....	4
<b>Şekil 2.</b> Kaynaklarına Göre Hidrojen Üretim Yöntemleri .....	5
<b>Şekil 3.</b> Suyun Elektrolizi .....	7
<b>Şekil 4.</b> Büyük Hidrojen Projeleri .....	13

## Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
CCUS	Karbon Tutma, Kullanma ve Depolama Sistemi
CH <sub>4</sub>	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FCEV	Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar
GAZBİR	Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
GAZMER	Doğal Gaz Teknik Merkezi
GW	Gigavat
HESC	Hidrojen Enerjisi Tedarik Zinciri
H <sub>2</sub>	Hidrojen
H <sub>2</sub> O	Su
ICHET	Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IMO	Uluslararası Denizcilik Örgütü
Kg	Kilogram
MJ	Megajul
MP <sub>a</sub>	Megapaskal
MW	Megavat
PEM	Polimer Elektrolit Membran
TANAP	Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı
TWh	Teravatsaat
UNIDO	Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü
WEC	Dünya Enerji Konseyi

## 1. Yönetici Özeti

Hidrojen, bir proton ve bir elektrondan oluşan, dünya üzerindeki en basit ve en yaygın olarak bulunan elementtir. Kararsız yapısından dolayı hidrojen dünya üzerinde serbest formda bulunmamakta, farklı bileşiklerin içinde yer almaktadır. Örneğin, su molekülü iki hidrojen atomu ve bir oksijen atomundan oluşmaktadır. Hidrokarbon olarak bilinen kömür, petrol ve gaz türevi organik bileşiklerin içerisinde de değişik sayılarda hidrojen atomları bulunmaktadır.

Hidrojen, bir yakıt hücresinde tüketildiğinde yalnızca su, elektrik ve ısı üreten temiz bir yakıt olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen ve yakıt hücreleri; ulaşım, sanayi ve konut başta olmak üzere neredeyse tüm sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanım potansiyeli ile enerji üretim alanında önemli bir role sahiptir.

Hidrojen, 16. yüzyılda keşfedilmiş ve 1766 yılında diğer yanıcı gazlardan ayırt edilebilmiştir. Hidrojenin yanmasıyla su oluşumu 1776'da gözlenmiş, hidrojen adı ise 1781'de Fransız kimyacı Antoine-Laurent Lavoisier tarafından önerilmiştir. Son elli yılda hidrojenin birkaç popüler dönemi olmuştur, ancak bu dönemler günümüze kadar pek de başarılı sonuçlar doğurmamıştır. Hidrojen enerjisi teknolojileri günümüz koşullarında üretim maliyeti, depolama zorlukları ve taşıma maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle endüstride yeterli düzeyde yer edinememiştir. Özellikle iklim krizinin küresel piyasalarda ön plana çıktığı, hava kirliliği ve küresel ısınmayı sınırlandırmak için temiz enerji kaynaklarının öncelikli görüldüğü bu dönemde, temiz hidrojen de ivme kazanmıştır. Son yıllarda çok sayıda uzman, çeşitli kaynaklardan hidrojen üretimi, taşınması ve depolanması ile emisyonuz nihai enerji arzı sağlaması için bu kaynağın kullanım potansiyelini araştırmaktadır.

Hidrojenin hidrokarbonlar gibi fosil yakıtlardan, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından ve nükleer kaynaklar gibi çok çeşitli kaynaklardan üretimi mümkündür. Mevcut durumda hidrojenin çoğu fosil yakıtlardan, özellikle de doğal gazdan üretilmektedir. Fosil yakıtlar dışında, yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretim teknolojileri de gelişmektedir.

Hidrojenin iki özelliği, yaygın kullanımına yönelik artan ilgiyi açıklayabilmektedir. Bu özellikler, hidrojenin doğrudan hava kirleticileri veya sera gazı emisyonları olmadan kullanılabilmesi ve düşük karbonlu enerji kaynaklarından üretilmesidir. Hidrojen; taşımacılık, petro-kimya ve demir-çelik gibi emisyonları azaltmanın zor olduğu sektörlerde dekarbonizasyonu sağlayabilecek yöntemler öneren bir kaynaktır. Ayrıca, hidrojen, hava kalitesini iyileştirmeye ve enerji güvenliğini artırmaya da yardımcı olabilmektedir.

Hidrojen politikalarının geliştirilmesi enerji sektöründe ön plana çıkan konular arasında yerini bulmuşken, ülkeler nezdinde bu yönde birçok ulusal strateji ve girişim oluşturulmuştur. Son yıllarda hidrojen temalı stratejilerin sayısı hızla artmaktadır. Ulusal seviyedeki gelişmelere paralel olarak özel sektördeki girişimlerin sayısı da artış göstermiştir.

Ülkeler özel hidrojen stratejilerini hazırlamakta ve üzerinde anlaşmaya varmaktadır. Ortaya çıkan bu hidrojen stratejileri, dinamik olarak büyüyen pazarı işaret etmektedir. Ulusal stratejiler, belirli ülke çıkarları ve ülkelerin endüstriyel güçlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, hidrojenin karbondan arındırılmış bir enerji sisteminin temel ve vazgeçilmez bir unsuru olduğu gerçeği evrensel olarak kabul görmektedir.

Enerji üretiminde ağırlıklı biçimde fosil kaynaklara bağlı olan Türkiye'nin 1990'lı yıllarda Prof. Dr. Veziroğlu ve UNIDO'nun girişimleriyle başlayan hidrojen enerjisi yolculuğuna, gündemde olan iklim politikaları çerçevesinde, başta AB olmak üzere diğer ülkelerin yaptığı çalışmaları da gözeterek ve özel sektörün desteğini alarak ulusal hidrojen stratejisinin ortaya konulması ile devam etmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Hidrojen alanındaki önemli gelişim süreci, AB'nin 2050 yılına kadar karbon nötr olmaya yönelik taahhüdü ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın ilan edilmesi ile birlikte başlamıştır. Temmuz 2020'de yayınlanan AB Hidrojen Stratejisi, hidrojeni Avrupa Yeşil Mutabakatı'na ulaşmak için kilit bir öncelik olarak tanımlamaktadır.

## 2. Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi Nedir?

Hidrojen, bir proton ve bir elektrondan oluşan, dünya üzerindeki en basit ve en yaygın olarak bulunan elementtir. Hidrojen kararsız yapısından dolayı dünya üzerinde serbest formda bulunmamakta, farklı bileşiklerin içinde yer almaktadır. Örneğin, su molekülü iki hidrojen atomu ve bir oksijen atomundan oluşmaktadır. Hidrokarbon olarak bilinen petrol türevi organik bileşiklerin içerisinde de değişik sayılarda hidrojen atomları bulunmaktadır.

Hidrojen enerjisi, hidrojenin saf halde ayrışmasının bir sonucu olarak moleküllerinde salınan kimyasal bir enerjidir. Bu enerji, çeşitli yöntemlerle ısı ve elektriksel biçimlere dönüştürülebilmektedir. Hidrojen enerjisi taşımacılıktan sanayiye, uzay roketlerinden petrol üretimine kadar birçok yerde kullanılmaktadır. Yüksek verimliliği ve çevre dostu bir kaynak olması nedeniyle hidrojen enerjisi üzerindeki araştırmalar 1970'li yıllarda yoğunlaşmıştır. 1974 yılında yapılan bir konferans ile dünya hidrojen enerjisi kavramı ile tanışmıştır.

### 2.1. Hidrojen Enerjisinin Özellikleri

Hidrojen hafif bir gazdır. Yoğunluğu havanın 1/14'ü kadar olan hidrojen atmosfer basıncında 253°C'de sıvı hale gelmektedir. Hidrojen gazının ısı değeri, metreküp başına yaklaşık 12 megajul (MJ) olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısı değeri ise, metreküp başına 8.400 MJ olmaktadır. Hidrojenin oksijenli yanması sonucunda ortaya çıkan sıcaklık yaklaşık 2.600°C'dir. Hidrojen moleküllerinin ayrıştırılması sonucunda oluşan hidrojen atomlarının tekrar birleşmesiyle ise 3.400 °C sıcaklık oluşmaktadır.<sup>1</sup>

21. yüzyılın enerji unsurlarından biri olarak değerlendirilen hidrojen için çeşitli Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmaktadır. Hidrojen, doğal bir yakıt kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji üretiminden faydalanılarak su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilerek bir enerji taşıyıcısı olarak depolanabilmekte ve böylelikle elektrik ve ısı üretmek için yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Hidrojen, bir yakıt hücresinde tüketildiğinde yalnızca su, elektrik ve ısı üreten temiz bir yakıt olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen ve yakıt hücreleri; ulaşım, sanayi ve konut başta olmak üzere neredeyse tüm sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanım potansiyeli ile enerji üretim alanında önemli bir role sahiptir. Hidrojen ve yakıt hücreleri ile ilgili olarak aşağıda sıralanan çeşitli sektörlerde veya sistemlerde uygulamalar mevcuttur.

- Dağınık veya birleşik ısı ve güç sistemleri;
- Yedek güç sistemleri;
- Yenilenebilir enerji depolama; ve
- Hava, kara ve deniz yolu taşıma araçları için yardımcı güç.

Hidrojen, metanın buhar reformasyonu ile hidrokarbon yakıtla reaksiyona girdiği yüksek sıcaklıktaki bir işlem ile üretilmektedir. Bir başka yaygın hidrojen üretim yöntemi elektroliz olarak adlandırılmaktadır. Bakteri veya mikroalg gibi mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik reaksiyonlar aracılığıyla da hidrojen

<sup>1</sup> Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, K. N., Akaryıldız, E. (2002). "Hidrojen Enerjisi Kullanımında Temel Kriterler." TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı: 72, ss.38-50.



üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tip biyolojik işlemlerde mikroorganizmalar bitkisel ürünleri tüketerek hidrojen gazı üretmektedir. Ayrıca, güneş ışığı kullanılarak da hidrojen üretimi yapılmaktadır. Bu üretim şekilleri fotobiyolojik, fotoelektrokimyasal, fotovoltaiik odaklı elektroliz ve termokimyasal yöntemlerle olabilmektedir. Dolayısıyla, hidrojenin üretim yöntemine göre hidrojen enerjisinin renk kodlarıyla sınıflandırılması yapılmaktadır (Şekil 1). Renk kodlamasında ayrıca üretim sürecinde oluşabilen sera gazı salımı da dikkate alınmaktadır. Farklı üretim yöntemlerine ilişkin bilgiler Bölüm 2.2’de detaylı olarak ele alınmaktadır.



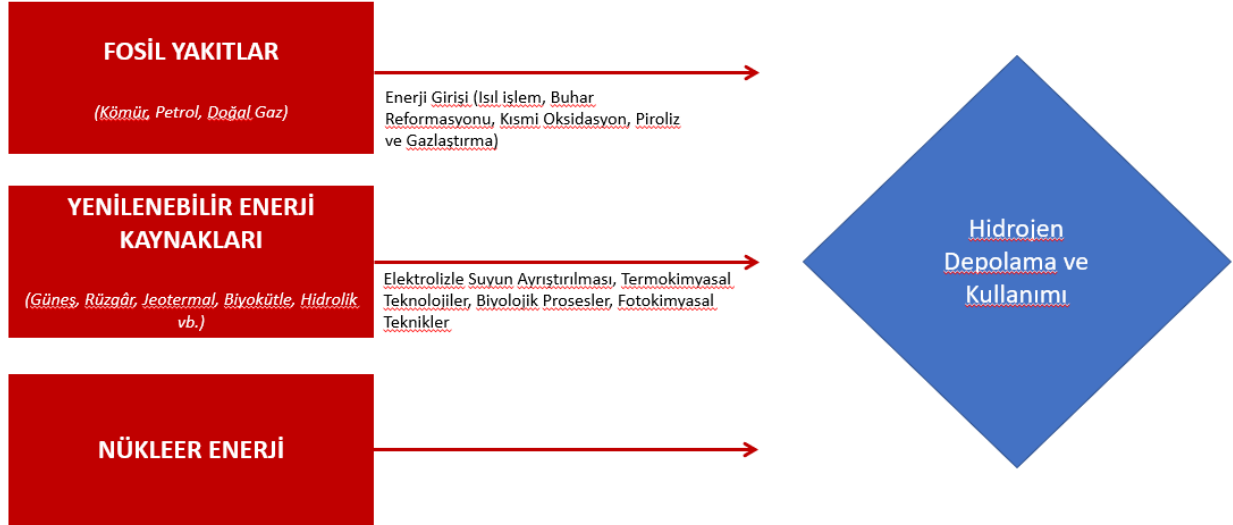
**Şekil 1.** Hidrojen Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Enerjisi Renkleri  
**Kaynak:** Scita, R. vd., 2020<sup>2</sup>

Hidrojenin üretimi sonrasında depolanması ve taşınması (veya iletimi) için de çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Taşınma işlemi, hidrojenin gaz formunda sıkıştırılması veya basınçlı ortamda sıvı forma dönüştürülmesi ve sonrasında tankerlere yüklenmesiyle yapılmaktadır. Ancak, ilerleyen yıllarda artacak hidrojen ihtiyacından ötürü, hidrojenin mevcut doğal gaz boru hatları vasıtasıyla da taşınması mümkündür. Zira, özellikle ülkeler arası boru hatlarının kapasiteleri hidrojenin taşınmasına yetecek durumdadır. Depolama için ise öncelik, taşımaya olanak tanıyan yöntemlerde yoğunlaşmaktadır. Hidrojenin depolanması için taşımayı önceliklendiren yöntemler; sıvı hidrojen, gaz hidrojen, metal hidrit ve kimyasal depolamadır.

<sup>2</sup> Scita, R., Raimondi, P., Noussan, M. (2020). “Green Hydrogen: the Holy Grail of Decarbonisation? An analysis of the technical and geopolitical implications of the future hydrogen economy”, Çalışma Belgesi, 013.2020, FEEM, İtalya.

## 2.2. Hidrojen Enerjisi Kaynakları

Hidrojenin hidrokarbonlar gibi fosil yakıtlardan, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından ve nükleer kaynaklar gibi çok çeşitli kaynaklardan üretimi mümkündür. Mevcut durumda hidrojenin çoğu fosil yakıtlardan, özellikle de doğal gazdan üretilmektedir. Fosil yakıtlar dışında, yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretim teknolojileri de gelişmektedir.



Şekil 2. Kaynaklarına Göre Hidrojen Üretim Yöntemleri

Kaynak: Çimen T., 2006<sup>3</sup>

Hidrojen üretimi için kimyasal, elektrokimyasal, termokimyasal, fotokimyasal gibi teknolojilerin yanı sıra biyolojik yöntemler veya bu yöntemlerin farklı kombinasyonları hibrit olarak kullanılabilir.

### 2.2.1. Fosil Kaynaklar

Fosil yakıtlardan hidrojen elde edilmesi için kullanılan teknikler arasında reformasyon, kısmi oksidasyon, piroliz ve gazlaştırma gibi üretim teknolojileri öne çıkmaktadır. Fosil yakıtları oluşturan hidrokarbon molekülleri reformasyon işlemi ile yeniden biçimlendirilerek hidrojenin serbest bırakılması sağlanmaktadır. Reformasyon, reaksiyona giren gazların reaksiyon sonunda yeniden düzenlenmesi olarak özetlenebilir.

Katı formda olmayan, akışkan fosil yakıtlardan (örn. doğal gaz) buhar reformasyonu prosesi gelişmiş ve yaygın bir hidrojen üretim teknolojisidir. Bugün hidrojen üretiminde en çok kullanılan tekniktir. Buhar reformasyonunda doğal gaz vb. akışkan yakıtlar yaklaşık 700-1.000°C sıcaklıkta katalizör varlığında reaksiyona sokularak hidrojen (H<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO) ve karbondioksitten (CO<sub>2</sub>) oluşan sentez gazı üretilir. Buhar (H<sub>2</sub>O) reformu endotermik bir reaksiyondur ve reaksiyonun ilerlemesi için prosese ısı sağlanması gerekir. Sentez gazı üretimi ardından bir gaz su dönüşüm reaksiyonu devam eder. Bu işlemde, karbon monoksit ve buhar, karbon dioksit ve daha fazla hidrojen üretmek için bir katalizör kullanılarak

<sup>3</sup> Çimen, T. (2006). Sıvı Hidrojen Tanklarının Isıl Analizi ve Optimal Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.

reaksiyona sokulur. Son işlem adımında ise, karbondioksit ve diğer safsızlıklar gaz akışından çıkarılır. Buhar reformasyonu, etanol, propan ve hatta benzin gibi diğer yakıtlardan hidrojen üretmek için de kullanılabilir.

*Kısmi oksidasyon* az miktarda oksijen kullanılarak hidrokarbon bileşiğinden hidrojenin ayrıştırılması için kullanılan tekniktir. Bu teknikte ısı kontrollü yanma ile yüksek sıcaklıklarda (1.300-1.500°C) ve uygun basınç (3-8 megapaskal (MP<sub>a</sub>)) altında gazlaştırma gerçekleştirilir. Reaksiyonun gerçekleşmesi için katalizör gerekli değildir. Kısmi oksidasyonla oluşan gaz karışımı karbonmonoksit, karbondioksit, su, hidrojen, metan (CH<sub>4</sub>) gibi gazlar içerir.

*Piroliz*, oksijensiz ortamda 0.1-0.5 MP<sub>a</sub>'da yüksek sıcaklıklarda biyokütlenin ısıtılarak katı organik kömür, sıvı yağ ve gaz içerikli bileşiklere dönüştürülmesi işlemidir. Piroliz düşük piroliz ve hızlı piroliz olarak iki şekilde sınıflandırılır. Genellikle ürünler organik kömür olduğu için düşük piroliz fazla tercih edilmemektedir. Hızlı piroliz ise yüksek sıcaklıkta gerçekleşir. Hızlı piroliz süreçlerinde ürünler katı, sıvı ve gaz halde bulunabilir. Hidrojen enerjisi üretimini artırabilmek için suyun gaza dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir.

*Gazlaştırma* katı fosil yakıtların yüksek basınç ve sıcaklıkta az oksijenli ortamda buharla işleme sokularak gerçekleşen tepkime sonucunda tepkimenin ürünü metan, hidrojen, karbon monoksit, karbon dioksit ve azot (N<sub>x</sub>) içeren sentez gazının elde edildiği bir üretim tekniğidir. Gazlaştırma tekniğinde genellikle katı veya ağır sıvı (örn. ham petrol) fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Söz konusu teknik, sabit yataklı veya akışkan yataklı farklı reaktörlerde uygulanabilmektedir.

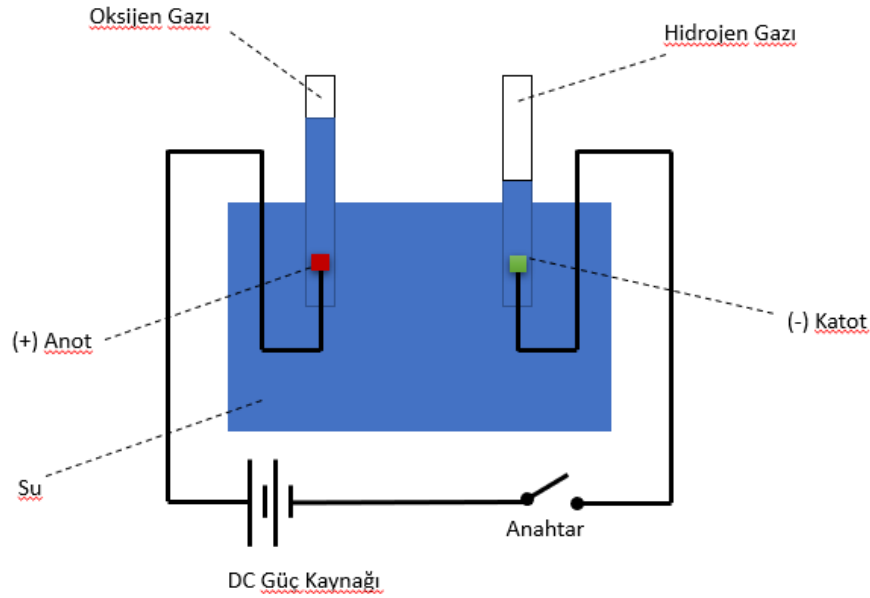
Fosil kaynaklardan hidrojen elde edilmesi süreçlerinde reaksiyon sonucunda sülfür oksit (SO<sub>x</sub>), nitrojen oksit (NO<sub>x</sub>), cıva (Hg) ve diğer partiküller gibi çok sayıda kirleticinin yanı sıra karbondioksit gibi sera gazları açığa çıkmaktadır. Fosil yakıtlardan hidrojen üretiminde karbon yakalama, depolama ve kullanma alanında gelişen teknolojilerin üretim proseslerine entegre edilmesi çevresel etkilerin asgari düzeye indirilmesinde önemli faydalar sunabilmektedir.

Düşük maliyetli doğal gazın reformasyonu yakıt hücreli elektrikli araçlar için hidrojen yakıtı sağlayabilecek bir alternatif teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Uzun vadede doğal gazdan hidrojen üretiminin yenilenebilir, nükleer, kömür (karbon yakalama ve depolama ile) ve diğer düşük karbonlu enerji kaynaklarının kullanılması doğrultusunda artması beklenmektedir. Fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin yakıt hücreli araçlarda kullanılması doğrultusunda meydana gelen emisyonlar, benzinle çalışan içten yanmalı motorlu araçlara göre daha düşük düzeydedir. Bir yakıt hücreli elektrikli aracın egzoz borusundan çıkan tek emisyon su buharıdır. Diğer yandan, doğal gazdan hidrojen üretimi ve yeni nesil araçlarda kullanılmak üzere depolanması ile taşınması süreçlerinde meydana gelen toplam sera gazı emisyonları konvansiyonel benzinli araçların neden olduğu emisyonlar ile kıyaslandığında yine de düşüktür.

### 2.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Doğru akım uygulanarak suyun, hidrojen ve oksijene ayrılması işlemine *elektroliz* adı verilir. Elektrokimyasal hidrojen üretim tekniği olarak da tanımlanan elektroliz teknolojik açıdan oldukça gelişmiş bir yöntemdir. Elektroliz işlemi elektrolizör denilen birimlerde gerçekleştirilir. Yakıt pilleri gibi, elektrolizörler de bir elektrolitik sıvı ile ayrılmış iki elektrottan (anot ve katot) oluşur. Elektrotlara doğru

akım uygulanır ve elektrolitik sıvı ile pozitif elektrottan (anot) negatif elektrota (katot) akım iletilir. İşlem sonunda elektrolit içindeki su, hidrojen ve oksijene ayrışır.



**Şekil 3.** Suyun Elektrolizi  
Kaynak: TSKB

Şebeke elektriğinden hidrojen üretimi teknolojisine yaygın şekilde erişilebilmektedir. Yenilenebilir enerjiyi verimli bir şekilde kullanabilen sistemler ile hidrojen üretim teknolojileri ise (örn. rüzgâr, jeotermal, güneş veya biyokütle vb.) geliştirilmeye devam etmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan neredeyse sıfır sera gazı emisyonuna neden olan yeşil hidrojen elde etmek mümkün olabilmektedir. Hidrojen; jeotermal, biyokütle, rüzgâr, güneş enerjisi gibi enerji kaynakları tarafından üretildiğinde sıfır karbon içerikli enerji taşıyıcısı olarak kabul edilmektedir.

Elektroliz gibi hidrojen üretim yöntemlerinin elektrik üreten sistemlere entegre edilmesi ile farklı kaynaklardan hidrojen üretilmesi mümkündür. Örneğin rüzgâr enerjisi kullanılarak elektroliz yöntemi ile hidrojen üretilmektedir. Elektrolizörler rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminde yaşanan problemlerden biri olan rüzgâr hızına bağlı voltaj değişimlerine adapte olabilme potansiyeline sahip olduğu için rüzgâr enerjisi ile elektroliz ve hidrojen üretimi tercih edilebilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Diğer yandan, elektrik arz fazlası olduğunda rüzgâr türbinlerinin durdurulması yerine bu enerjiyi hidrojen üretmek için kullanabilecek hibrit rüzgâr enerjisi santrallerinin kurgulanması mümkündür. Benzer şekilde, endüstriyel ölçekte güneş enerjisini kullanan fotovoltaik paneller ile entegre hidrojen üretim sistemleri mevcuttur. Elektroliz yöntemi farklı kaynaklar ile entegre çalışabileceği için avantajlı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Mevcut elektrik arz sepetinde yenilenebilir kaynakların oranının artması ile daha yeşil hidrojen üretimi potansiyeli de artmaktadır.

Güneş enerjisi elektroliz dışında farklı üretim yöntemlerinde de kullanılmaktadır. Örneğin yeni teknolojilerden olan *termokimyasal su ayırma* yöntemi, sudan hidrojen ve oksijen üretmek için konsantre güneş enerjisinden elde edilen ısıyı kullanmaktadır. Termokimyasal yöntemdeki yardımcı kimyasallar,

yeniden kullanılabilir. Yine yeni bir teknik olan *fotoelektrokimyasal teknikte* ise hidrojen, güneş ışığının hidrojen reaktörüne konsantre olarak odaklanması ile su moleküllerini hidrojen ve oksijene doğrudan ayırmak için ışık enerjisi kullanan özel yarı iletkenler kullanılarak sudan üretilmektedir. Aynı şekilde, yenilenebilir kaynakları kullanan *fotobiyolojik hidrojen üretim* sürecindeyse, suyun ve bazen organik maddenin hidrojene dönüştürülmesi için mikroorganizmalar ve güneş ışığı kullanılmaktadır.

Biyokütle de yenilenebilir bir kaynak olup bir dizi yöntemle hidrojene ve diğer yan ürünlere dönüştürülebilir. Biyokütle kullanan hidrojen üretim süreçleri gazlaştırma, biyokütleden elde edilen sıvının reformasyonu, mikrobiyolojik biyokütle dönüşümü olarak sınıflandırılabilir. Fosil yakıtlardan hidrojen elde edilmesinde kullanılan gazlaştırma yöntemi biyokütleden hidrojen elde edilmesinde de kullanılmaktadır. Etanol gibi biyo-esaslı yakıtlar da dahil olmak üzere biyokütle kaynaklarından türetilen sıvılar, doğal gaz reformasyonuna benzer bir proses ile hidrojen üretmek için yeniden değerlendirilmektedir. Güncel araştırmalar kapsamında ise biyokütleden mikroorganizmaların metabolik faaliyetleri ile doğrudan hidrojen üretimi üzerinde çalışmalar yürütülmekte, orta-uzun vadede bu teknolojilerin de ticari ölçekte uygulanabileceği değerlendirilmektedir.

### 2.2.3. Nükleer Kaynaklar

Mevcut nükleer santraller, doğal gaz kazanlarından daha düşük maliyetlerle yüksek kaliteli buhar üretebilir ve buhar reformasyonu dahil birçok endüstriyel işlemde kullanılabilir. Bununla birlikte, bu yüksek kaliteli buhar elektrolize edildiğinde ve saf hidrojen ile oksijene ayrıştırıldığında yüksek verimde hidrojen elde etmek mümkün olabilmektedir. 1.000 MW'lık bir nükleer reaktörden yılda 200.000 ton hidrojen üretimi mümkün olmaktadır. Gelişmiş reaktörlerde açığa çıkan yüksek sıcaklıklar ile büyük miktarlarda hidrojen üretimi söz konusu olabilir. Nükleer enerji tesisleri hem şebekeye elektrik üretimi sağlarken hem de açığa çıkan bu ısı sayesinde hidrojen üretimini destekleyebilecek potansiyelde değerlendirilmektedir. Ayrıca nükleer enerji santralleri karbon emisyonu salımına neden olmadıkları için yeşil enerji kaynağı olarak görülmekte, bu reaktörler aracılığıyla üretilecek olan hidrojen de yeşil hidrojen statüsünde olarak kabul edilmektedir.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Yakıt Hücreleri & Hidrojen Enerjisi Birliği, <https://www.fchea.org/in-transition/2020/5/11/using-nuclear-power-to-produce-green-hydrogen>

### 3. Hidrojen Enerjisinin Gelişimi

21. yüzyılda enerji, insanlık için vazgeçilmez bir yaşam kaynağıdır. Artan nüfus doğrultusunda enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Kullanılacak olan enerji kaynağının hem yenilenebilir hem de çevre dostu olması, araştırmaları alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında bazı kısıtlı noktalar bulunması nedeniyle de hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte kullanımı öngörülmektedir. Üretim tipine bağlı olarak değişse de büyük oranda temiz ve çevreci bir enerji kabul edilmesi nedeniyle hidrojen enerjisinin önemi son yıllarda artmaktadır.

#### 3.1. Hidrojen Enerjisinin Geçmişi

Hidrojen, 16. yüzyılda keşfedilmiş ve 1766 yılında diğer yanıcı gazlardan ayırt edilebilmiştir. Hidrojenin yanmasıyla su oluşumu 1776'da gözlenmiş, hidrojen adı ise 1781'de Fransız kimyacı Antoine-Laurent Lavoisier tarafından önerilmiştir.

Son elli yılda hidrojenin birkaç popüler dönemi olmuştur, ancak bu dönemler günümüze kadar pek de başarılı sonuçlar doğurmamıştır.<sup>5</sup>

1970'lerde, petrol fiyatındaki artış, petroldeki kıtlık ve çevre bilincinin bir sonucu olarak hidrojenin potansiyeline ilgi artmaya başlamıştır. 1970 yılında John Bockris, General Motors Teknik Merkezi'ndeki bir konuşma sırasında ilk defa "hidrojen ekonomisi" terimini ortaya atmıştır. Aynı yıl, Michigan Üniversitesi'nden Lawrence W. Jones, "Sıvı hidrojeni fosil hidrokarbon yakıtlarının nihai ikamesi olarak kullanma olasılığı"ni öne süren "Sıvı Hidrojen Yakıt Ekonomisine Doğru" başlıklı bir teknik rapor yayınlamıştır. 18-20 Mart 1974 tarihlerinde Amerika Florida Miami Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü'nde, Enstitü Direktörü bilim insanı Prof. Dr. Nejat Veziroğlu'nun başkanlığında düzenlenen "Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı (THEME)", modern boyutta hidrojen enerjisi kullanımı için bir başlangıç noktası olmuştur.<sup>6</sup>

1970'li yıllar boyunca, birkaç akademisyen ve mühendis, kömürden veya nükleer enerjiden üretilen hidrojenin, özellikle ulaştırma sektöründe yeni bir enerji kaynağı olması potansiyeli taşıdığını öne sürerek hidrojen konusunda çeşitli çalışmalar ortaya koymuştur. Ancak, 1980'li yıllarda petrol ve doğal gaz fiyatlarındaki düşüş ve hava kirliliği oluşturan emisyonların çeşitli yöntemlerle "kontrol" altına alınması çabalarıyla birlikte hidrojen enerjisi önemini yitirmiştir.

1990'larda ve 2000'lerin başında, iklim değişikliği konusundaki endişelerin artması nedeniyle hidrojene yönelik ilgi dalgası tekrar yükselmiştir. 1970'lerdekine benzer şekilde, araştırma ağırlıklı olarak ulaşım sektörüne odaklanılmış, ancak bu kez karbon yakalama ve depolamaya ağırlık verilerek hidrojenin çevre dostu özellikleri daha fazla araştırılmıştır. Bu dönemde, çeşitli ülkeler ve özel sektör, hidrojenin sürdürülebilir bir enerji seçeneği potansiyeli olduğuna inanarak hidrojene yatırım yapmaya başlamıştır. 1993 yılında Japonya, yenilenebilir enerjiye dayalı uluslararası hidrojen ticareti için uzun vadeli bir programa 4,5 milyar Japon (yaklaşık 40 milyon dolar) yeni yatırım yapmıştır. 1992 yılında ise AB Komisyonu ve Quebec Hükümeti, özel sektör ile iş birliğine girerek hidrojen enerjisine ilişkin çeşitli projelere destek vermeye başlamıştır.

<sup>5</sup> Scita et al, a.g.m.

<sup>6</sup> Yumurtacı vd., a.g.m.

2003 yılında Amerika Birleşik Devletleri, hidrojen ve yakıt hücresi Ar-Ge çalışmaları ile ortak standartlar ve altyapı oluşturmaya ilişkin bilgi paylaşımını geliştirmek için uluslararası iş birliğini teşvik etmek amacıyla “Ekonomide Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Uluslararası Ortaklık” programını başlatmıştır. Ancak hidrojene olan ilgi, iklim politikalarının uygulanmasındaki hayal kırıklığı, hidrojen enerjisi altyapılarının yüksek maliyeti ve pilli elektrikli araçların geliştirilmesinin bir sonucu olarak, bu kez de 2000’li yılların başında hayal kırıklığı ile sonuçlanmıştır.

Prof. Dr. Nejat Veziroğlu’nun İstanbul’da bir Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (ICHET) kurma girişimi önerisi, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü’nün (UNIDO) 20-22 Kasım 1996 tarihlerinde Viyana’da yaptığı toplantıda kabul edilmiştir. Bu karar kapsamında UNIDO gözetiminde özerk bir kurum olarak faaliyet gösterecek olan ICHET, hidrojen enerjisi konusunda bir bağlantı kurmayı ve bu husustaki genel uygulamaların Ar-Ge faaliyetlerini yürütmeyi hedeflemiştir. ICHET’in faaliyet konuları, hidrojen üzerine eğitim programları gerçekleştirmek ve danışmanlık çalışmalarında bulunmaktadır. ICHET projesi, hidrojen enerjisinde Türkiye’nin ön saflarda yer almasını ve mevcut güneş enerjisi potansiyelinden en iyi şekilde yararlanmasını hedefleyen önemli bir girişimdir. Söz konusu öneme rağmen, her ne kadar küçük çaplı birtakım pilot çalışmalar yapıldıysa da Türkiye’nin bu projeyi uygulamak için ihtiyaç duyduğu finansal destek tam anlamıyla sağlanamamıştır.

### 3.2. Hidrojen Enerjisinin Mevcut Durumu

Hidrojen enerjisi teknolojileri günümüz koşullarında üretim maliyeti, depolama zorlukları ve taşıma maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle endüstride yeterli düzeyde yer edinememiştir. Özellikle iklim krizinin küresel piyasalarda ön plana çıktığı, hava kirliliği ve küresel ısınmayı sınırlandırmak için temiz enerji kaynaklarının öncelikli görüldüğü bu dönemde, temiz hidrojen de ivme kazanmıştır. Son yıllarda çok sayıda uzman, çeşitli kaynaklardan hidrojen üretimi, taşınması ve depolanması ile emisyonuz nihai enerji arzı sağlaması için bu kaynağın kullanım potansiyelini araştırmaktadır.<sup>7</sup> Hidrojen, neredeyse tüm bölgelerde giderek artan bir şekilde ana akım enerji tartışmalarının temelini oluşturmaktadır. Çeşitli ülke ve şirketler hidrojeni, enerji sektörünün geleceğinde rol oynaması muhtemel önemli bir kaynak olarak görmektedir.

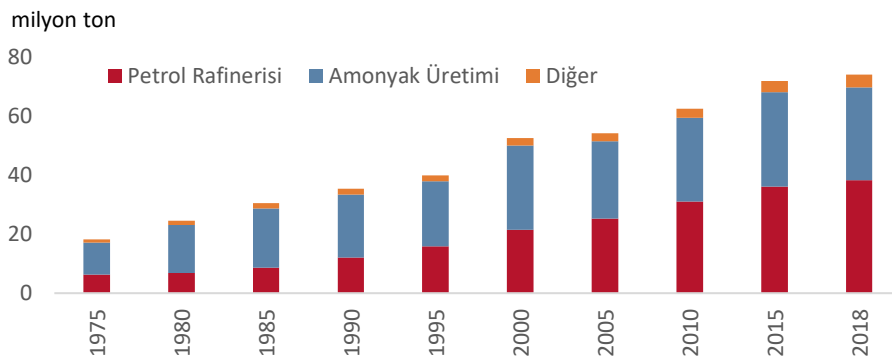
Hidrojenin iki özelliği, yaygın kullanımına yönelik artan ilgiyi açıklayabilmektedir. Bu özellikler, hidrojenin doğrudan hava kirleticileri veya sera gazı emisyonları olmadan kullanılabilmesi ve düşük karbonlu enerji kaynaklarından üretilmesidir. Hidrojen; taşımacılık, petro-kimya ve demir-çelik gibi emisyonları azaltmanın zor olduğu sektörlerde dekarbonizasyonu sağlayabilecek yöntemler öneren bir kaynaktır. Ayrıca, hidrojen, hava kalitesini iyileştirmeye ve enerji güvenliğini artırmaya da yardımcı olabilmektedir.

Hidrojen sayesinde enerjiyi farklı şekillerde üretebilecek, depolayabilecek, taşıyabilecek ve kullanabilecek teknolojiler bulunmaktadır. Boru hatlarıyla, tankerlerle ve gemilerle sıvı hâlde taşınabilen hidrojen, elektrığe ve metana dönüştürülerek haneler veya üretim sektörleri için enerji olarak veya arabalarda, kamyonlarda, gemilerde ve uçaklarda yakıt olarak kullanılabilir.

<sup>7</sup> Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). (2019). “Hidrojenin Geleceği”, Paris, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf)

Hidrojenin daha iyi ve daha dayanıklı bir gelecek için temiz enerji geçişini teşvik etmesi amacıyla 2017’de kurulan “Hidrojen Konseyi”, son üç yılda küresel şirketlerin bu konuda yatırım çalışmalarını yönlendirmeyi hedeflemektedir.

1975 yılında 18,2 milyon ton olan “saf hidrojen” talebi yıllık ortalama %3,3’lük bir artış ile 2018 yılında toplam 73,9 milyon tona<sup>8</sup> ulaşmıştır. 2018 yılında toplam saf hidrojen talebinin %51,7’si petrol rafinerisi ve %42,6’sı amonyak üretimi içindir. Petrol rafinerisi sektöründeki hidrojen talebi, artan petrol talebi ve rafineri ürünlerinin iyileştirilmesi için hidro-arıtma ve hidro-kırma kullanımının artışı nedeniyle yükselmiştir. Rafineri sektöründe hidrojene yönelik talep, daha geniş dekarbonizasyon politikalarına ve gerçekleşen petrol talebinin gelişimine bağlı olarak değişim gösterecektir.<sup>9</sup> Bununla birlikte, saf hidrojenin en büyük kullanım alanlarından biri amonyak üretimidir. Amonyak, azotlu gübre üretiminde kullanılmaktadır.



**Grafik 1. Saf Hidrojen Talebi Gelişimi**

**Kaynak:** IEA, TSKB

Dünya genelinde tüketilen hidrojenin tamamına yakını doğal gaz ve kömür kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu çerçevede, üretilen doğal gazın %6’sı ve üretilen kömürün %2’si hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) “Hidrojenin Geleceği” raporuna göre, 2018 yılında gerçekleşen 73,9 milyon tonluk saf hidrojen talebinin yanı sıra, yaklaşık 45 milyon ton hidrojen diğer gazlardan ayırışmadan demir-çelik sektöründe ve metan üretiminde kullanılmaktadır.

Dünyadaki en büyük hidrojen üreticisi ve kullanıcısı olan Çin, yaklaşık 20 yıldır karayolu araçlarında kullanılmak üzere yakıt hücreleri ve hidrojen geliştirmektedir. Çin’de 1.000 Yakıt Hücreli Elektrikli Otobüs ve Ballard yakıt hücreli 2.200 ticari kamyon faaliyet göstermektedir.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> 73,9 milyon ton hidrojen 2.750 teravatsaat (TWh) elektrik enerjisine karşılık gelmektedir.

<sup>9</sup> Oxford Üniversitesi. (2020). “Hidrojen ve Gazın Dekarbonizasyonu, Yanlış Şafak veya Gümüş Kurşun?”, <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2020/03/Insight-66-Hydrogen-and-Decarbonisation-of-Gas.pdf>

<sup>10</sup> Dünya Enerji Konseyi (WEC) Almanya ve Ludwig Bölkow Systemtechnik (LBS). (2020). “Uluslararası Hidrojen Stratejileri”, Ottobrunn-Almanya, [https://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC\\_H2\\_Strategies\\_finalreport.pdf](https://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC_H2_Strategies_finalreport.pdf)



Yıllık hidrojen üretiminin %95'i, metan gazı veya diğer türevlerin yeniden düzenlenmesiyle fosil yakıtlardan gelmekte ve yalnızca %5'i sürdürülebilir bir şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrolizle üretilmektedir.<sup>11</sup> Bu dağılım, esas olarak hidrojen üretim maliyetinden etkilenmektedir. 2018 yılı verilerine göre, doğal gaz ile hidrojen üretiminin maliyeti kilogram başına 0,90-3,20 dolar aralığında iken, karbon tutma, kullanma ve depolama (carbon capture, utilisation and storage - CCUS) teknolojisinin kullanımı ile maliyet aralığı kilogram başına 1,50-2,90 dolar olmaktadır.<sup>12</sup> Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen “Yeşil Hidrojen”in kilogram maliyeti ise 3,0-7,5 dolardır. Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretiminin maliyetinin yüksek olması nedeniyle, bu dönemde ön plana çıkamadığı değerlendirilmektedir.

**Tablo 1.** Kaynaklara Göre Hidrojen Üretim Maliyeti (2018)

Kaynak	Hidrojen Üretimi Birim Maliyeti Aralığı (USD/kg)
Doğal Gaz	0,90-3,20
Doğal Gaz (CCUS mevcut)	1,50-2,90
Kömür	1,20-2,20
Yenilenebilir Kaynaklar	3,00-7,50

Kaynak: IEA, TSKB

Yatırım, işletme ve hammadde maliyetleri üzerinden hesaplanan hidrojen üretimi maliyeti, bölgesel olarak farklılık göstermektedir. Enerji sistemi genelinde uygulanan emisyon azaltma teknolojisi CCUS, maliyetleri ortalama %26 oranında artırmaktadır. Doğal gazdan hidrojen üretimi maliyetlerinde ise, Ortadoğu ve Çin’de yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksekliği dikkat çekmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) CCUS ile hidrojen üretiminde konvansiyonel yöntem (doğal gazdan hidrojen üretimi) göre %52’lik bir maliyet artışı söz konusu iken bu oran Ortadoğu’da %12’ler civarındadır. Doğal gaz kullanılarak hidrojen üretiminde hammadde maliyeti ABD ve Avrupa’da toplam maliyetin ortalama %48’i civarında iken bu oran Ortadoğu’da %10’a düşmektedir.

CCUS, karbon temelli ürünler, soda ya da kimyasallar gibi mamul malların içinde yakalanmış CO<sub>2</sub>’nin “depolanması” yoludur ve iklim değişikliği ile mücadele için potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Yakalama ve depolama, CO<sub>2</sub>’yi ortam havasından ya da sanayi emisyonlarından ayrıştırabilen teknolojileri temel almaktadır. Bütün CO<sub>2</sub> ayırma yöntemleri atmosferden ya da egzoz gazlarından CO<sub>2</sub>’yi ayırmak için kimyasal reaksiyonlardan faydalanmaktadır.<sup>13</sup>

**Tablo 2.** Doğal Gaz İle Hidrojen Üretimi Maliyeti (2018, USD/kilogram)

Bölge	Yöntem	Yatırım Maliyeti	İşletme Maliyeti	Hammadde Maliyeti	Toplam
ABD	CCUS mevcut değil	0,34	0,17	0,49	1,00
	CCUS mevcut	0,61	0,37	0,54	1,52
Avrupa	CCUS mevcut değil	0,34	0,57	1,22	2,13
	CCUS mevcut	0,61	0,77	1,34	2,72
Rusya	CCUS mevcut değil	0,88	0,97	0,60	2,45
	CCUS mevcut	1,15	1,17	0,66	2,98

<sup>11</sup> Forbes, <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2020/07/07/hydrogen-as-a-sustainable-energy-resource/?sh=6b2c91cd37ff>

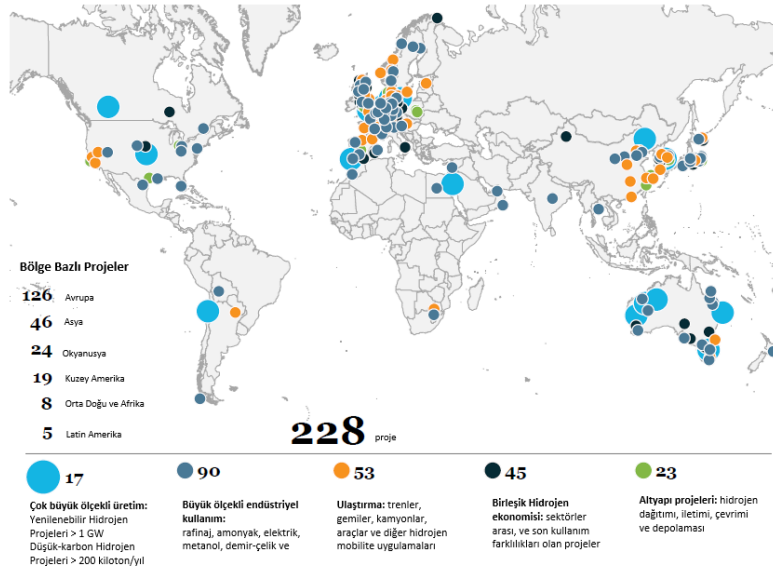
<sup>12</sup> IEA, 2019, a.g.e.

<sup>13</sup> <https://www.geoengineeringmonitor.org/2019/11/field-trials-schemes-and-calls-for-transparency-nov-geoengineering-updates/>

Bölge	Yöntem	Yatırım Maliyeti	İşletme Maliyeti	Hammadde Maliyeti	Toplam
Çin	CCUS mevcut değil	1,42	1,37	1,27	4,06
	CCUS mevcut	1,69	1,57	1,40	4,66
Ortadoğu	CCUS mevcut değil	1,96	1,77	0,43	4,16
	CCUS mevcut	2,23	1,97	0,47	4,67

Kaynak: IEA, TSKB

2019 yılında büyük bir ivme kazanan hidrojen teknolojileri özel sektör şirketlerinin tercihlerinin yanı sıra kamu stratejilerinde de önemli bir yer almaya başlamıştır. 2019 yılı önemli miktarda elektroliz kapasitenin faaliyete geçtiği bir yıl olarak kayıtlara geçmiştir.<sup>14</sup> Çin, Japonya ve Güney Kore'deki gelişmeler çerçevesinde yakıt hücreli elektrikli araçların pazarı ikiye katlanmıştır. Elektrolizörler, düşük karbonlu elektrik ve sudan temiz hidrojen üretimini sağlamaktadır. Endüstriyel sektörlerde uzun süredir kullanılan elektrolizörler, enerji ile iklim hedeflerine hizmet eden kullanımlar için ön plana çıkmaktadır. Bu kullanım alanları arasında araç yakıt temini, doğal gaz sistemine hidrojen enjeksiyonu ve elektrik depolama bulunmaktadır. Bunlarla birlikte, demir-çelik sektöründe elektroliz uygulamalarının test edildiği de görülmektedir.



Şekil 4. Büyük Hidrojen Projeleri

Kaynak: Hidrojen Konseyi

2021 Şubat ayı itibarıyla dünya genelinde 30 ülkede hidrojen yol haritası ve açıklanan büyük ölçekli toplam 228 hidrojen projesi bulunmaktadır.<sup>15</sup> Bu projelerin %85'i Avrupa, Asya ve Avustralya kıtalarında yer almaktadır.

### 3.3. Hidrojen Enerjisinin Potansiyeli

Ülkeler özel hidrojen stratejilerini hazırlamakta ve üzerinde anlaşmaya varmaktadır. Ortaya çıkan bu hidrojen stratejileri, dinamik olarak büyüyen pazarı işaret etmektedir. Ulusal stratejiler, belirli ülke çıkarları

<sup>14</sup> IEA. (2020). "Hidrojen", <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

<sup>15</sup> Hidrojen Konseyi. (2021). "2021 Hidrojen Anlayışı", <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>

ve ülkelerin endüstriyel güçlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, hidrojenin karbondan arındırılmış bir enerji sisteminin temel ve vazgeçilmez bir unsuru olduğu gerçeği evrensel olarak kabul görmektedir.

Ulusal stratejiler, 2050 için beklenen hidrojen talebinin küresel düzeyde toplamı 9.000 TWh'ye varan bir potansiyeli veya yılda yaklaşık 270 milyon ton hidrojeni işaret etmektedir.<sup>16</sup> Almanya, hidrojenin gelecekteki enerji sisteminin önemli bir unsuru olduğu karbon nötr hedefini benimsemektedir. Japonya ve Güney Kore gibi bazı Asya ülkeleri, hidrojen ve ekonomiyle ilgili hedeflere daha fazla odaklanmakta ve uzun vadeli hedeflerini bir hidrojen ekonomisi kurmak olarak formüle etmektedir. Avustralya gibi ülkeler ise, 2050 yılına kadar küresel bir hidrojen ihracatçısı olmayı hedeflemektedir.

Son yıllarda, rafineri sektöründe hidrojen talebi, artan rafinaj aktivitesi ve hidro-arıtma ve hidro-kırma için artan gereksinimlerin bir sonucu olarak önemli ölçüde artmıştır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), deniz yakıtlarının sülfür içeriğini 2020'den itibaren %0,5'ten fazla olmayacak şekilde sınırlayan yeni yakıt yönetmeliğini getirmiştir<sup>17</sup> ve bu yönetmeliğin denizde yakıt üretimi için hidrojen gereksinimlerinde önemli bir artışa yol açması beklenmektedir. Bununla birlikte, deniz taşımacılığında kullanılması planlanan "karbon içermeyen" amonyak da bir potansiyel olarak değerlendirilmektedir.<sup>18</sup>

Hidrojen Konseyi, hidrojene önümüzdeki yıllarda kamu ve özel sektör tarafından küresel olarak en az 300 milyar dolar yatırım yapılmasının beklendiğini ve hidrojenin küresel enerji talebinin neredeyse beşte birini karşılayabileceğini belirtmektedir.<sup>19</sup>

Hidrojenin yaygınlaşmasını sağlayacak unsurlar arasında enerji sektöründe daha verimli ve düşük maliyetli enerji sağlanması ve çevreyi kirletmeyen temiz kaynak arayışları bulunmaktadır. Petrolün bugünkü ve gelecekte öngörülen durumu, ithalat bağımlılığı, fosil yakıtların yarattığı karbondioksit emisyonları ve Kyoto Protokolü'nün emisyonlara getirdiği sınırlamalar doğrultusunda, hidrojen çok önemli bir kaynak olarak nitelendirilmektedir. Bununla birlikte hidrojenin geleceği; altyapı ve üretim maliyetleri, hükümetlerin destekleyici politikaları ve teşvikler, yeni teknolojilerin toplum ve tüketiciler tarafından kabul görmesi gibi birçok parametreye bağlıdır.

Dünyada hidrojen talebine yönelik beklenen gelişmeler arasında, hidrojenli araçların teşviki amacıyla hidrojen istasyonlarının yer aldığı otoyol ağının kurulması, hibrit yakıtlı araçların (dizel/hidrojen, benzin/hidrojen) otomotiv sektöründe payının artması ve evlerde ısınma amaçlı hidrojen kullanımının yaygınlaşması bulunmaktadır. Bu çerçevede, 2025 ve sonraki dönemde, dünyadaki toplam enerji ihtiyacının %10-20'sinin hidrojenden karşılanması öngörülmektedir.<sup>20</sup>

<sup>16</sup> WEC Almanya ve LBS, a.g.e.

<sup>17</sup> Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO). (2020). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>

<sup>18</sup> Gemi Performans Optimizasyonu, <https://vpoglobal.com/2019/07/27/energy-experts-support-carbon-free-ammonia-as-a-marine-fuel/>

<sup>19</sup> Hidrojen Konseyi, <https://s360.com.tr/S360MagDetail?postid=86cedb1c-2b76-44c9-9c55-c221f3d0d318>

<sup>20</sup> <https://www.yesilaski.com/hidrojen-enerjisinin-gelecegi.html>

## 4. Hidrojen Enerjisinin Küresel Uygulamaları

Son dönemde hidrojen stratejilerinin daha çok önem kazanmasında ve ülkelerin kendi ulusal hidrojen stratejilerini ve yol haritalarını oluşturmaya başlamasında ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma, enerji arzı güvenliği ve ekonomik büyüme hedefleri öne çıkmaktadır. 2050 yılına kadar büyük ölçüde karbondan arındırılmış bir dünya hedefiyle, ülkelerin hidrojen kullanımında yalnızca yenilenebilir enerjiden elde edilen yeşil hidrojene yöneleceği değerlendirilmektedir.

### 4.1. Başlıca Ülkelerin Hidrojen Girişimleri

Hidrojen politikalarının geliştirilmesi enerji sektöründe ön plana çıkan konular arasında yerini bulmuşken, ülkeler nezdinde bu yönde birçok ulusal strateji ve girişim oluşturulmuştur. Haziran 2018 ve Kasım 2020 dönemleri arasında ülkelerin ilan ettikleri hidrojen girişimleri aşağıda verilmiştir. Ulusal seviyedeki gelişmelere paralel olarak özel sektördeki girişimlerin sayısı da artış göstermiştir.

Hidrojen üretimi ve uygulamaları konusunda lider ülke konumuna gelmek isteyen **Almanya** 2020 yılında “Ulusal Hidrojen Stratejisi”ni yayınlamıştır.<sup>21</sup> Bu kapsamda Almanya, hidrojeni geleceğin sürdürülebilir enerjisi olarak hayata geçirmek için 9 milyar euroluk yatırım yapmayı planlamaktadır. Özellikle sera gazı emisyonunun azaltılması, elektrifikasyonu zor olan çeşitli nihai kullanıcı sektörlerin birleştirilmesi ve yenilenebilir enerji arzının entegrasyonu temel hedefler olarak belirlenmiştir. Strateji çerçevesinde, sınırlı yenilenebilir enerji potansiyeli nedeniyle, Almanya’daki uzun vadeli talebi karşılamak için hidrojen ithalatının gerekli olacağı belirtilmektedir. Bununla birlikte, yerli hidrojen talebinin ve üretim yeteneklerinin desteklenmesi, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak nitelendirilmektedir. Almanya halihazırda, tüketicilerin yoğunlukla kimya endüstrisi (amonyak ve metan üretimi) ve rafinerilerden oluştuğu ve üretiminin çoğu fosil yakıtlara dayalı olan büyük sayılabilecek bir hidrojen pazarına sahiptir.

**Japonya**, 2019 yılında yayınladığı “Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Stratejik Yol Haritası”<sup>22</sup> ile hidrojen toplumuna geçişi öne çıkarmaktadır. Japonya’nın ilk hidrojen toplumunu yaratmaya olan ilgisi, “güvenlik” öncülüğünde “enerji güvenliği”, “ekonomik verimlilik” ve “çevre” uygunluğunu artıran “3E+S” enerji politikası ile yakından ilişkilendirilmektedir. Bu politika, Japonya’daki enerji kaynaklarının yetersiz bulunabilirliğini, yüksek düzeyde enerji ithalatı bağımlılığı nedeniyle ortaya çıkan yapısal kırılganlığını ve sera gazı emisyonlarını azaltma taahhütlerini ele almaktadır.<sup>23</sup> Japonya 2030 yılına kadar yıllık 300.000 ton hidrojen ithalatı planlamakta ve 2030’dan itibaren, uluslararası hidrojen tedarik zincirlerini genişletmeyi ve büyük ölçekli hidrojen enerjisi üretimini hedeflemektedir.

**Güney Kore** 2019 yılında, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojisi açısından ana hedeflerin ve sektör hedeflerinin belirlendiği “Kore Hidrojen Ekonomisi Yol Haritası”nı ve “Hidrojen Teknolojisi Geliştirme Ulusal Yol Haritası”nı yayınlamıştır.<sup>20</sup> Otobüsler, yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV) ve yakıt ikmal

<sup>21</sup> [https://www.bmbf.de/files/bmwi\\_Nationale%20Wasserstoffstrategie\\_Eng\\_s01.pdf](https://www.bmbf.de/files/bmwi_Nationale%20Wasserstoffstrategie_Eng_s01.pdf)

<sup>22</sup> [https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312\\_002b.pdf](https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002b.pdf)

<sup>23</sup> [https://www.weltenergiat.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC\\_H2\\_Strategies\\_finalreport.pdf](https://www.weltenergiat.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC_H2_Strategies_finalreport.pdf)

istasyonları için 2022 ve 2040 hedeflerini içeren hidrojen ekonomisi yol haritasında tüm ticari araçların 2025 yılına kadar hidrojene geçirilmesi hedeflenmektedir.

Bugün dünyadaki en büyük hidrojen üreticisi ve kullanıcısı konumunda olan **Çin**, Nisan 2020’de Enerji Yasasını “Hidrojen Enerjisini” de kapsayacak şekilde genişletmiştir. Çin, hidrojen üretiminde kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil enerjilerin kullanımı azaltarak güneş ve rüzgâr enerjileri gibi yenilenebilir kaynaklara odaklanacağını açıklamıştır. Çin yaklaşık 20 yıldır karayolu araçlarında kullanılmak üzere yakıt hücreleri ve hidrojen teknolojileri geliştirmektedir.

**AB** ülkeleri arasında hidrojenin tartışılması amacıyla “Hidrojen Enerji Ağı” platformu kurulmuş ve ilk toplantısını Haziran 2019’da gerçekleştirmiştir. 28 AB üyesi ülke, yaklaşık 100 işletme, çeşitli kurum ve kuruluşların yanı sıra sürdürülebilir hidrojen teknolojisi konusunda iş birliğini teşvik eden Linz Deklarasyonu “Hidrojen Girişimi”ni imzalamıştır. Avrupa Komisyonu’nun “İklim Nötr Bir Avrupa İçin Hidrojen Stratejisi” Temmuz 2020’de yayınlanmıştır. Strateji çerçevesinde 2050 yılına kadar karbon nötr hedefine ulaşmak için Avrupa enerji sisteminin gereklilikleri ele alınmakta olup hidrojen ve hidrojen bazlı sentetik yakıtlar, halihazırda enerji sistemi entegrasyon stratejisinin ilgili bir unsuru olarak değerlendirilmektedir. Avrupa Hidrojen Stratejisi, özellikle iki önemli nihai kullanıcı sektörler olan taşımacılık ve sanayinin yanı sıra elektrolize dayalı hidrojen üretimine odaklanmaktadır. Taşımacılık sektöründe, otobüs, kamyon, tren, gemi ve havacılık gibi ağır hizmet uygulamalarına odaklanılırken sanayi sektöründe, rafinerilerde ve ayrıca amonyak ve metan üretiminde karbon yoğun hidrojenin kullanımının değiştirilmesi ön plana çıkarılmaktadır. Ayrıca çelik üretiminin karbon yoğunluğunun azaltılması ve sıfır karbonlu çelik üretimi hedeflenmektedir. Ticari binalar ve konutları ısıtmak için hidrojenin yanı sıra mevsimsel enerji depolama ve yedek enerji kaynağı olarak hidrojenin kullanımı da stratejide ele alınmaktadır. Bunların yanında, kısa ve orta vadede daha düşük karbonlu hidrojen üretimi teknolojilerine olan ihtiyaç vurgulanmaktadır.

**Hollanda**, 2020 yılında hidrojen yol haritası yayınlamış ve Hollanda İklim Anlaşması’na hidrojenle ilgili bölüm dahil edilmiştir. Elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretiminin 2025 yılına kadar yaklaşık 500 MW kurulu güce ve 2030 yılına kadar 3-4 gigavata (GW) çıkarılması planlanmaktadır.<sup>24</sup>

**Fransa**, 2018 yılında yayınladığı “Hidrojen Dağıtım Planı” çerçevesinde 100 milyon euroluk finansman ile sanayi, ulaşım ve yenilenebilir enerji depolama alanlarında düşük karbonlu hidrojen için 2023 ve 2028 hedeflerini açıklamıştır. Dağıtım planının ana hedefi, Fransa’daki sera gazı emisyonunun azaltılmasına yardımcı olmak ve yenilenebilir elektrik arzını, esas olarak hidrojen depolama ve “Power-to-Gas” teknolojisi<sup>25</sup> tarafından sağlanan ek hizmetler yoluyla enerji sistemine entegre etmektir.

**Birleşik Krallık**’ın özel bir resmi hidrojen stratejisi bulunmamakta, hidrojenin rolü iklim ve sanayiyle ilgili farklı politika girişimleri ve strateji belgeleri çerçevesinde tartışılmaktadır. Hidrojen faaliyetleriyle ilgili ana hedef, sera gazı emisyonunu azaltarak ve yenilenebilir enerjiyi enerji sistemine entegre ederek çevrenin korunması olarak belirlenmiştir. Bu şekilde, hidrojenin uzun vadeli dekarbonizasyon hedeflerine ulaşmada

<sup>24</sup> <https://www.government.nl/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen>

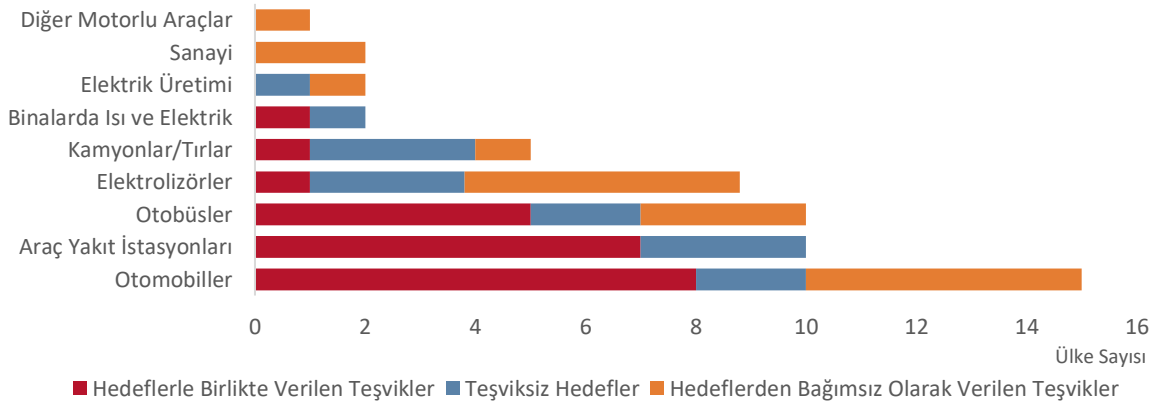
<sup>25</sup> Power-to-Gas (P2G) kavramı su elektrolizi yoluyla hidrojen üretmek için yenilenebilir enerjiden üretilen veya fazla elektriğin kullanılmasını ifade etmektedir.

yardımcı olması beklenmektedir. Ayrıca, finansman programları, sanayiye ve topluma ekonomik faydalar sağlayabilecek hidrojen teknolojilerinin gelişimini desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu yönde oluşturulan hedefler doğrultusunda Birleşik Krallık doğal gaz şebekesinin bir bölümünde %20'ye kadar hidrojeni harmanlamayı planlamaktadır.

Kasım 2019'da açıklanan **Avustralya** Ulusal Hidrojen Stratejisi<sup>26</sup>, hidrojenin ticarileştirilmesini hızlandırma, ulusal bir üretim ve tedarik zinciri oluşturma ile iç talebi teşvik etme planını ortaya koymaktadır. Avustralya'da 100 milyon Avustralya doları üzerinde bir desteğin hidrojen araştırmaları ve pilot projeleri desteklemek için kullanılmasına ilişkin karar alınmıştır. Özellikle önemli seviyede yenilenebilir enerji kapasitesine sahip Güney Avustralya, güneş ve rüzgâr gücünden hidrojen üretimi açısından ideal bir bölge olarak değerlendirilmektedir.

**Rusya**, Haziran 2020'de, "Enerji Stratejisi"ni sunmuştur.<sup>27</sup> Söz konusu stratejide hidrojen üretiminde ve ihracatında dünya lideri olmanın amaçlandığı açıklanırken ihracat hedefi 2024 yılında 0,2 milyon ton ve 2030 yılında 2 milyon ton olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Ekim 2020'de, 2020-2024 dönemi için "Rusya'da Hidrojen Enerjisinin Geliştirilmesi" yol haritası onaylanmıştır. Rusya'da hidrojen halihazırda endüstriyel ölçekte üretilmekte ve özellikle petrokimya ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ülkeler nezdinde oluşturulan stratejiler ve yol haritalarının yanı sıra hidrojen uygulamalarına hedefler dahilinde ve hedeflerden bağımsız olarak teşvikler de sağlanmaktadır. Ülke bazında hidrojen uygulamalarına sağlanan desteklerin ağırlıklı olarak ulaşım sektörüne yoğunlaştığı görülmektedir.



**Grafik 2.** Dünya Geneline Verilen Teşvikler ve Sayıları

Kaynak: IEA, TSKB

#### 4.2. Hidrojen Alanında Öne Çıkan Projeler ve Uygulamalar

Üçüncü bölümde de bahsedildiği üzere, mevcut durumda dünyada 228 hidrojen projesi bulunmakta olup bu projelerin %85'ine yakını Avrupa, Asya ve Avustralya bölgelerinde iken Amerika, Ortadoğu ve Afrika'da ise sektörde ivmelenme görülmektedir.

<sup>26</sup> <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>

<sup>27</sup> [http://www.energystrategy.ru/projects/docs/ES-2030\\_%28Eng%29.pdf](http://www.energystrategy.ru/projects/docs/ES-2030_%28Eng%29.pdf)

Hidrojen diğer kullanım alanlarına kıyasla ulaşım alanında yaygın olarak benimsenmiş durumdadır. 2020 yıl sonunda, dünya çapında 577 hidrojen yakıt ikmal istasyonu mevcuttur. Bu alanda Japonya 142 istasyonla lider konumda iken, onu 101 istasyonla Almanya ve 73 istasyonla ABD izlemektedir.<sup>28</sup> Hidrojen stratejisi bulunan ülkelerin tamamına yakınında hidrojen yakıtlı araçlar ve hidrojen yakıt ikmal istasyonlarına ilişkin kısa, orta ve uzun vadeli hedefler yer almaktadır.

Kara taşıtlarının yanında hidrojenin diğer ulaşım araçlarında da kullanımı artış göstermektedir. 2018 yıl sonunda, Alstom tarafından üretilen hidrojenli tren Almanya'da faaliyete geçmiş ve 2021 yılında 14 tane daha hidrojen ile çalışan trenin faaliyete geçeceği duyurulmuştur. Birleşik Krallık ve Hollanda da Alstom'ın hidrojenli trenlerini faaliyete geçirmeye başlamıştır. Ayrıca Çin Foshan'da, hidrojen yakıt hücresiyle çalışan tramvay faaliyete geçmiştir. Deniz taşımacılığında hidrojen yakıtlı araçlar henüz yaygın olmasa da Belçika'da halihazırda denizcilikte içten yanmalı motorlarda hidrojeni dizel ile birlikte yakan bir proje bulunmaktadır. Norveç'te ise hidrojenle çalışan feribot ve gemilerin geliştirilmesi için fon sağlanmaktadır.

Ulaşım ek olarak, evsel ve endüstriyel ısıtma ve doğal gazın kullanıldığı alanlar, düşük karbonlu hidrojen talebini artıracak sektörler olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda hidrojen alanının farklı boyutlarını da ele alan özel sektör yatırımları ve teşvikler bulunmaktadır.

Hidrojenin farklı değer zincirlerini kapsayan birkaç proje aşağıda özetlenmiş olup bu alana yatırımların önümüzdeki yıllarda ivme kazanacağı değerlendirilmektedir.

- Almanya'daki Amprion ve gaz ağı operatörü OGE, 2023 yılında devreye girmesi hedeflenen toplam 150 milyon euro tutarlı 100 MW'lık bir elektrolizör ve Almanya'nın kuzeybatısındaki özel bir hidrojen boru hattı için yatırım planı sunmuştur.
- VNG, Uniper, Terrawatt ve DBI tarafından Almanya'daki bir kimya kompleksinin yakınında, 50 milyar metreküp depolama alanı ve özel bir hidrojen boru hattı dahil olmak üzere, elektrolizörlerle birleştirilmiş 40 MW'lık bir rüzgâr santrali planlanmaktadır.
- ITM Power ve Linde ile oluşturulan konsorsiyum ile Shell'in Köln yakınlarındaki Wesseling rafinerisinde 10 MW'lık polimer elektrolit membran (PEM) elektrolizörü 2020 yılında devreye alınmıştır.<sup>29</sup>
- Almanya Araştırma Bakanlığı Ocak 2021'de, büyük elektrolizörlerin üretimine, deniz üstü rüzgâr santralleri ile hidrojen üretiminin birleştirilmesine ve hidrojenin taşınmasına odaklanan yeşil hidrojen üzerine üç büyük ölçekli araştırma projesine toplam 700 milyon euro destek verildiğini duyurmuştur.
- Japonya'nın Fukushima şehrinde, Toshiba tarafından 2018 yılından beri inşaatı devam eden yenilenebilir enerji ile çalışan 10 MW'lık hidrojen üretim ünitesi 2020 yılı Şubat ayında devreye alınmıştır. Ulaşım uygulamalarında kullanılmak üzere yenilenebilir kaynaklardan yılda 900 ton

<sup>28</sup> <https://www.h2stations.org/>

<sup>29</sup> <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/030121-shell-plans-bio-power-to-liquids-project-at-rheinland-refinery>



hidrojen sağlaması planlanmakta olup ünitenin ihtiyaç duyacağı elektriği 20 MW'lık bir güneş santrali projesinden sağlayacağı belirtilmiştir.<sup>30</sup>

- Japonya'nın desteğiyle Avustralya'nın Victoria Eyaleti'nde Hidrojen Enerjisi Tedarik Zinciri (HESC) projesi geliştirilmektedir. Proje kapsamında linyitin gazlaştırılarak hidrojene dönüştürülmesi ve üretilen hidrojenin Japonya'ya gönderilmesi amaçlanmaktadır. Pilot aşama Latrobe Vadisi'nde bir gazlaştırma tesisi ve Hastings Limanı'nda bir sıvılaştırma tesisi içermektedir. 500 milyon Avustralya doları (344 milyon ABD doları) maliyeti olması öngörülen projeye, Japon hükümeti ve Japon endüstrisi ile Avustralya ve Victoria hükümetlerinin her biri 50 milyon Avustralya doları finansman sağlamıştır. Tesisin, yılda 5.000 ton hidrojen ve 18.000 ton amonyak üretmesi hedeflenmektedir.<sup>31</sup>
- Avustralya'nın Pilbara bölgesinde geliştirilen 15 GW kapasiteli güneş ve rüzgâr santrali yatırımları ile elde edilecek elektriğin öncelikli olarak yerel madencilik endüstrisinde kullanılması ve ayrıca elektroliz yoluyla hidrojen üretmek için ihtiyaç duyulacak elektriğin de bu kapasiteden sağlanarak hidrojen ihracatı yapılmasının hedeflendiği belirtilmiştir.<sup>32</sup>
- Hidrojen alanında önemli projeler arasında yer alan ve İngiltere'nin kuzeyindeki gaz şebekelerini 2028 ile 2034 yılları arasında hidrojene dönüştürmeyi amaçlayan **H21 Kuzey İngiltere (H21 NoE)** projesi Cadent, Equinor ve Northern Gas Networks ortaklığıyla geliştirilmektedir. Proje kapsamında 2035 yılına kadar Humber Haliği'nde 12,5 GW'lık bir doğal gaz dönüştürme tesisi, 8 TWh'lık bir hidrojen gazı depolama tesisi, talebin yoğun olduğu merkezlerde yeni hidrojen iletim boru hattı ve yıllık 20 milyon ton CO<sub>2</sub> depolama yer almaktadır.<sup>33</sup>
- **H-vision girişimi**, Hollanda'nın Rotterdam limanındaki ilk potansiyel mavi hidrojen projesidir. Hedef, 2030 yılına kadar projenin tamamının gerçekleştirilmesi yönündedir. H-vizyon projesi, CO<sub>2</sub>'yi Kuzey Denizi altında depolamak ve ardından hidrojeni limandaki sanayi kuruluşlarına ulaştırmak için saatte toplam 15-20 ton hidrojen kapasiteli dört buhar dönüştürme tesisini kapsamaktadır. İlk tesisin 2025 yılında açılması ve üretilen hidrojenin liman içine veya başka bölgelere taşınması planlanmaktadır.<sup>34</sup>
- Fransa'da enerjiden gaza dönüştürme projesi olan Les Hauts de France projesi, beş yıllık bir süre içinde her biri 100 MW'lık beş hidrojen elektrolizör ünitesi inşa etmeyi hedeflemektedir. Exxon rafinerisinin yanında kurulacak Port-Jérôme tesisi, yakıtların kükürt gidermesi veya gübre üretimi için petrokimya endüstrisine (Exxon, Total, Yara vb.) hidrojen sağlamayı hedeflemektedir.
- Kanada'da Air Liquide şirketi, 2021 Ocak ayında hidroelektrik kullanarak düşük karbonlu hidrojen üretmek için 20 MW kapasiteye sahip dünyanın en büyük PEM elektrolizörünün açılışını yapmıştır.<sup>35</sup>

<sup>30</sup> [https://www.toshiba-energy.com/en/info/info2020\\_0307.htm](https://www.toshiba-energy.com/en/info/info2020_0307.htm)

<sup>31</sup> <https://hydrogenenergysupplychain.com/>

<sup>32</sup> <https://www.pv-magazine.com/2020/10/20/wa-govt-approves-15-gw-asian-renewable-energy-hub-whole-project-now-expanded-to-26-gw/>

<sup>33</sup> <https://h21.green/projects/h21-north-of-england/>

<sup>34</sup> <https://www.h-vision.nl/en>

<sup>35</sup> <https://www.airliquide.com/magazine/energy-transition/inauguration-worlds-largest-pem-electrolyzer#:~:text=Air%20Liquide%20inaugurated%20the%20largest,hydrogen%20on%20a%20large%20scale>



- Kore Gaz Şirketi (KOGAS), Nisan 2019'da hidrojen altyapısı için geliştirme planlarını açıklamıştır. Plan kapsamında 25 hidrojen üretim tesisi, 700 km'den fazla hidrojen boru hattı inşası ve 2030 yılına kadar 100 yakıt ikmal istasyonu ve 500 hidrojen taşıma römorku işletmesi planlanmaktadır. Söz konusu yatırımların toplamda yaklaşık 4 milyar ABD doları olacağını tahmin edilmektedir.<sup>36</sup>
- Danimarkalı Orsted, kuracağı 2 MW'lık tesiste deniz üstü rüzgâr enerjisi kullanarak günde 1.000 kg yeşil hidrojen üretmeyi planlamaktadır.
- British Petroleum (BP), sera gazı emisyonlarını azaltmak için İngiltere'nin kuzeyindeki tesisinde bölgesinde ülkenin en büyük hidrojen santralının kurulmasının planlandığı duyurmuştur. Santralin faaliyete geçmesiyle 1 gigavat "mavi hidrojen" üretilmesinin hedeflendiğini belirtmiştir.
- Avrupa'ya Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP) üzerinden hidrojen taşınması için araştırma ve analiz çalışmalarını tamamladıklarını belirten SOCAR, boru hattının %20'sinin herhangi bir ek yatırım gerekmeksizin hidrojen taşımak için kullanılabileceğini belirtmiştir.
- Siemens Gamesa ve Siemens Energy, Paris Anlaşması çerçevesinde, gelecek dönemde dünyanın yüksek miktarda yeşil hidrojene ihtiyaç duyacağı ve yeşil hidrojen üretimi için gereken enerjinin büyük kısmının rüzgârdan sağlanacağı öngörüsüyle iş birliğine gideceklerini açıklamıştır. 5 yıl içerisinde Siemens Gamesa'nın 80 milyon euro, Siemens Energy'nin ise 40 milyon euro tutarında yatırım yapması planlanmaktadır.

<sup>36</sup> [https://www.greencarcongress.com/2019/04/20190429-kogas.html#:~:text=\(KOGAS\)%2C%20the%20state%2D,kilometers%20to%20transport%20the%20gas](https://www.greencarcongress.com/2019/04/20190429-kogas.html#:~:text=(KOGAS)%2C%20the%20state%2D,kilometers%20to%20transport%20the%20gas)

## 5. Türkiye'deki Hidrojen Enerjisi Gelişmeleri

Türkiye, 2010'lu yılların başında İstanbul'da UNIDO öncülüğünde kurulan ICHET'i desteklemek suretiyle hidrojen araştırma ve geliştirmesini (Ar-Ge) artırmaya çalışmıştır. Bu kapsamda, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) da desteği ile 2011 yılında "Bozcaada Hidrojen Adası Projesi" gerçekleştirilmiştir. 7 Ekim 2011 tarihinde devreye giren proje ile Bozcaada Kaymakamlık binası ve sağlık ocağının elektrik ihtiyacı üretilen hidrojen ile karşılanmıştır.<sup>37</sup> Buna rağmen projenin devamı getirilmemiştir ve hidrojen üretimi sonlandırılmıştır.

Hidrojen enerjisinin resmi belgelere ilk giriş tarihi olarak 2 Mayıs 2007 tarihi ön plana çıkmaktadır. Bu tarihte Resmi Gazete'de yayımlanan "Enerji Verimliliği Kanunu"nda hidrojen, biyoyakıt ile birlikte kullanımı özendirilmesi gereken alternatif yakıt olarak belirlenmiştir.<sup>38</sup> Ayrıca, 2011 yılında hidrojen yakıtlı araçlara ilişkin bir yönetmelik çıkarılmıştır.<sup>39</sup> Söz konusu yönetmelikle, hidrojen yakıtıyla çalışan araçların tip onayına yönelik düzenleme yapılmıştır ve bu araçların bir süre sonra gündeme olacağı beklentisiyle bir ön hazırlık gerçekleştirilmiştir.

2020 yılı Ocak ayına kadar hidrojen, Türkiye'nin enerji politikalarında yerini alsada da ciddi bir ilgi görmemiştir. 2000'li yıllarında başında ulusal program dokümanlarında kısaca da olsa kendisine yer bulan hidrojen konusu, sonraki süreçte enerji politikalarının bir parçası olarak görülmemiştir. Uzunca bir aradan sonra 15 Ocak 2020 tarihinde ETKB'nin düzenlediği "Hidrojen Arama Konferansı" ile kamuoyuna hidrojenin önemi anlatılmıştır.<sup>40</sup> Toplantıda bir konuşma gerçekleştiren ETKB Bakanı Fatih Dönmez, Bakanlık olarak hidrojeni 4 ana fayda üzerinden elde etmeyi amaçladıklarına dikkati çekmiştir. Bu ana faydalar arasında; daha fazla yenilenebilir enerjiyi sisteme dahil etmek, ısı sektörünü karbon emisyonuz hale getirmek, yerli kömürden hidrojen üretimi gerçekleştirmek, hidrojen depolama ve tutucusu olarak borun kullanımını artırmak bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından gerçekleştirilen elektrik üretiminin dengelenmesi için depolama teknolojilerinin kullanılması gerekliliğine değinen Bakan Dönmez, bunun yöntemlerinden birinin de doğal gaz dağıtım hatlarına %2 ila 6 oranında hidrojen karıştırılması olduğunu ifade etmiştir. Türkiye ölçeğinde bunun 1 ila 3 milyar metreküp hidrojenin sisteme verilmesi anlamına geldiğini belirtmiştir. Türkiye'de en geç 2021 yılı sonunda dağıtım hatlarına hidrojen girişinin hedeflendiğini de sözlerine eklemiştir.<sup>41</sup>

2018 yılında başlayan hidrojenin doğal gaz hatlarına katılması ve entegrasyonu çalışması ETKB tarafından Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği'ne (GAZBİR) verilmiştir. 2 Nisan 2021 tarihinde GAZBİR'in teknik merkezi GAZBİR-GAZMER Konya'da açılmıştır. Açılıştaki konuşma yapan ETKB Bakanı Fatih Dönmez, tesisin toplamda 6 milyon lira yatırım bedeliyle tamamlandığını, Türkiye'de ilk defa doğal gazla hidrojen

<sup>37</sup> UNIDO. (2011). <https://www.unido.org/news/first-hydrogen-energy-production-turkish-island-has-started-bozcaada>

<sup>38</sup> Resmi Gazete, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.htm>

<sup>39</sup> Resmi Gazete, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/06/20110607-4.htm>

<sup>40</sup> ETKB, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerjide-arama-etkinlikleri-ve-belgeler>

<sup>41</sup> <http://icci.com.tr/enerji-bakanligi-hidrojen-stratejisini-ankaradaki-calistayda-acikladi/>

karıştırılarak evsel cihazların beslenmesi projesinin hayata geçirildiğini belirtmiştir.<sup>42</sup> Laboratuvarında test amaçlı olarak ortalama %5 ila 20 oranında hidrojen ile %95 ila 80 oranında doğal gaz karıştırılırken elde edilen karışım test amaçlı olarak yakılmıştır. Türkiye’de yürütülen doğal gaz sistemlerine hidrojen enjeksiyonu projesinin ilk sonuçlarına göre, doğal gaz iç tesisatlarında ve tüketici cihazlarında önemli bir değişikliğe gerek kalmaksızın hidrojenin, dağıtım ağlarında doğal gazla birlikte en fazla %20 oranında karıştırılabileceği sonucuna varılmıştır.

---

<sup>42</sup> GAZBİR, <https://www.gazbir.org.tr/uploads/page/Mart-Nisan-2021-Bulten.pdf>

## 6. İklim Değişikliği İle Mücadelede Hidrojen Enerjisi

Sanayinin karbon yoğunluğunun azaltılması için hidrojen enerjisinin kullanımına geçilmesi, çoğu ülkenin stratejik planlamalarında ele aldıkları ortak bir konudur. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında aktif rol üstlenen Avrupa Birliği'nin karbon emisyonlarını 1990 yılına göre %50-%55 oranında azaltmayı hedeflediği 2030 yılına kadar ilk büyük ölçekli uygulamalar kapsamında potansiyel hidrojen talebi için sağlam bir alt yapı oluşumunun sağlanabileceği öngörülmektedir.

Rüzgâr ve güneş enerjisi üretiminin hava koşullarıyla sınırlı olduğu dönemlerde (pillerin kapasitesinin ötesinde) uzun vadeli enerji depolaması için alternatif seçeneklerin sınırlı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, hidrojen enerjisi, bu ihtiyacı karşılama noktasında en umut verici seçeneklerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Hidrojen alanındaki önemli gelişim süreci, AB'nin 2050 yılına kadar karbon nötr olmaya yönelik taahhüdü ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın ilan edilmesi ile birlikte başlamıştır. Temmuz 2020'de yayınlanan AB Hidrojen Stratejisi, hidrojeni Avrupa Yeşil Mutabakatı'na ulaşmak için kilit bir öncelik olarak tanımlamaktadır.<sup>43</sup> AB Hidrojen Stratejisi, hidrojenin Avrupa'nın geliştirmekte olan teknolojilerdeki rekabet gücünü artırma potansiyeline sahip olduğunun altını çizerken, bu potansiyelin açığa çıkarılmasında demir çelik, kimya gibi karbondan arındırılması zor olan sektörlerdeki fosil yakıtların değiştirilmesinin son derece önemli olduğunu vurgulamaktadır. AB'nin stratejisi, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojeni karbonsuz ve iklim nötr bir ekonomiye geçişin önemli bir unsuru olarak değerlendirmektedir.

Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın ardından, Fransa, Almanya ve İspanya dahil olmak üzere çeşitli ülkeler, ulusal hidrojen stratejileri yayınlamıştır. Ülkeler, bu stratejileri ortaya koyarken, özel sektörün katılımını teşvik etmek amacıyla stratejilerin geliştirilmesinde aktif rol oynayabilecek bir dizi sanayi grubunu da sürece dahil etmişlerdir. Örneğin, bir sanayi birliği girişimi olan Hidrojen Avrupa ("Hydrogen Europe"), AB Hidrojen Stratejisinin gelişimini destekleyen Avrupa Hidrojen Yol Haritası'nı oluşturmak için çeşitli akademisyenler ve Avrupa Komisyonu ile ortaklık kurmaktadır.<sup>44</sup> Ayrıca, Avrupa ülkelerindeki ortak strateji, mavi hidrojenden ziyade yeşil hidrojene dayalı yatırımların ön plana çıkarılması yönündedir. Uzun vadede hedeflenen iklim nötrlük ve sıfır kirlilik için en uyumlu seçenek yeşil hidrojen olarak görülmekte ve bunun entegre bir enerji sistemiyle uyumlu olacağı vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, enerji üretiminde ağırlıklı biçimde fosil kaynaklara bağlı olan Türkiye'nin 1990'lı yıllarda Prof. Dr. Veziroğlu ve UNIDO'nun girişimleriyle başlayan hidrojen enerjisi yolculuğuna, gündemde olan iklim politikaları çerçevesinde, başta AB olmak üzere diğer ülkelerin yaptığı çalışmalarını da gözetererek ve özel sektörün desteğini alarak ulusal hidrojen stratejisinin ortaya konulması ile devam etmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

<sup>43</sup> Beedell, Estan. (2021). "Recovery Through Reform: Advancing a Hydrogen Economy While Minimizing Fossil Fuel Subsidies", International Institute for Sustainable Development (IISD).

<sup>44</sup> <https://www.hydrogeneurope.eu/>



MECLİSİ MEBUSAN CAD.  
NO:81 FINDIKLI İSTANBUL 34427, TÜRKİYE  
T: +90 (212) 334 50 50 F: +90 (212) 334 52 34

Bu rapor, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) A.Ş.'nin uzman kadrosunca güvenilir olarak kabul edilen kaynaklardan elde edilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Raporunda yer alan görüşler ve öngörüler, teknik ve akademik bilgiler ile sektör temsilcileriyle yapılan görüşmelerden elde edilen sonuçları yansıtmakta olup bu verilerin tamlığı ve doğruluğu konusunda TSKB'nin herhangi bir sorumluluğu bulunmamaktadır. Raporunda yer verilen değerlendirme, görüş, düşünce ve öngörüler, TSKB nezdinde açık ya da gizli bir garanti ve beklenti oluşturmaz. Diğer bir ifadeyle; bu raporda yer alan tüm bilgi ve verileri kullanma ve uygulama sorumluluğu, doğrudan veya dolaylı olarak, bu rapora dayanarak yatırım kararı veren ya da finansman sağlayan kişilere aittir ve ortaya çıkan sonuçtan dolayı üçüncü kişilerin doğrudan ya da dolaylı olarak zarara uğramaları durumunda TSKB hiçbir şekilde sorumlu tutulamaz.

©2021 Bu raporun tüm hakları saklıdır. TSKB'nin izni olmadan raporun içeriği herhangi bir şekilde basılamaz, çoğaltılamaz, fotokopi veya teksir edilemez, dağıtılamaz.