



**Hidrojen Enerjisi
Bilgilendirme Notu
Güncellemesi**

Ağustos 2023

TSKB

Hazırlayanlar

Can Hakyemez – Ekonomik Araştırmalar

Efe Tangüner – Kalkınma Finansmanı Kurumları

Orçun Yıldızca – Mühendislik

Uğur Altan – Kredi Tahsis

İÇİNDEKİLER

Grafik Listesi.....	ii
Tablo Listesi.....	ii
Şekil Listesi	ii
Kısaltmalar	iii
1. Yönetici Özeti	1
2. Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi Nedir?	2
2.1.Hidrojen Enerjisinin Özellikleri.....	2
2.2.Hidrojen Enerjisi Kaynakları.....	4
2.2.1. Fosil Kaynaklar	4
2.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	5
2.2.3. Nükleer Kaynaklar	7
3. Hidrojen Enerjisinin Gelişimi.....	8
3.1.Hidrojen Enerjisinin Geçmişi.....	8
3.2.Hidrojen Enerjisinin Mevcut Durumu	9
3.3.Hidrojen Enerjisinin Potansiyeli	13
4. Hidrojen Enerjisinin Küresel Uygulamaları	15
4.1.Başlıca Ülkelerin Hidrojen Girişimleri	15
4.2.Hidrojen Enerjisi İçin Kalkınma Finansmanı.....	19
4.3.Hidrojen Alanında Öne Çıkan Projeler ve Uygulamalar	19
5. Türkiye'deki Hidrojen Enerjisi Gelişmeleri.....	22
6. İklim Değişikliği İle Mücadelede Hidrojen Enerjisi	25

Grafik Listesi

Grafik 1. Saf Hidrojen Talebi Gelişimi	10
--	----

Tablo Listesi

Tablo 1. Kaynaklara Göre Hidrojen Üretim Maliyeti (2021)	11
Tablo 2. Bölgelere Göre Hidrojen Üretimine Ayrılmış Toplam Yenilenebilir Kapasite, 2021-2027	12

Şekil Listesi

Şekil 1. Hidrojen Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Enerjisi Renkleri	3
Şekil 2. Kaynaklarına Göre Hidrojen Üretim Yöntemleri	4
Şekil 3. Suyun Elektrolizi	6
Şekil 4. Büyük Hidrojen Projeleri	13

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
CCUS	Karbon Tutma, Kullanma ve Depolama
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	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 ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
ICHET	Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IMO	Uluslararası Denizcilik Örgütü
Kg	Kilogram
MJ	Megajul
MP _a	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

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; ulaştırma, petro-kimya ve demir-çelik gibi emisyonları azaltmanın zor olduğu sektörlerde karbonsuzlaşmayı 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 göstermektedir.

Ülkeler özel hidrojen stratejilerini hazırlamaktadır ve ortaya çıkan hidrojen stratejileri de dinamik olarak büyüyen bir 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 çalışmalarını gözetenek ve özel sektörün desteğini alarak ulusal hidrojen stratejisi 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 yayımlanan AB Hidrojen Stratejisi, hidrojeni Avrupa Yeşil Mutabakatı'na ulaşmak için kilit bir öncelik olarak tanımlamaktadır. Aralık 2022'de Avrupa Komisyonu tarafından alınan karara göre, hidrojen Sınırdan Karbon Düzenlemesi (SKD) kapsamına dahil edilmektedir.¹

İşbu Bilgilendirme Notu, TSKB tarafından 2021 yılında yayımlanan Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu'nun² güncellenmesi niteliğinde olup 2022 ve 2023 yıllarında hidrojen enerjisine ilişkin dünyada ve Türkiye'de yaşanan gelişmelere dair bilgileri de sunmaktadır.

¹ Avrupa Komisyonu, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7719

² TSKB, <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/hidrojen-enerjisi-bilgilendirme-notu-120721.pdf>

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 ulaştırmadan 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 Miami'de yapılan Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı sayesinde 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.³

21. yüzyılın enerji kaynaklarından 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.

- Dağıtık 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 tepkimeye girdiği yüksek sıcaklıktaki bir işlem ile üretilebilmektedir. Bir başka yaygın hidrojen üretim yöntemi elektroliz olarak adlandırılmaktadır. Bakteri veya mikroalg gibi mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik tepkimeler aracılığıyla da hidrojen

³ 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 bilgilere Bölüm 2.2’de detaylı olarak yer verilmektedir.



Şekil 1. Hidrojen Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Enerjisi Renkleri

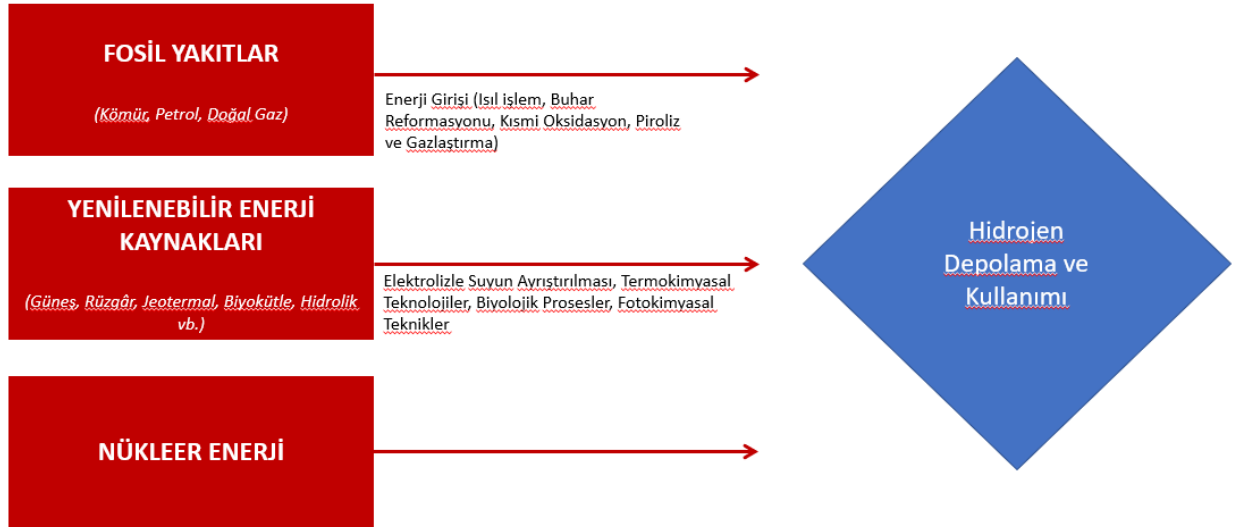
Kaynak: Scita, R. vd., 2020⁴

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. Depolama için ise öncelik, taşımaya olanak tanıyan yöntemlerde yoğunlaşmaktadır. Hidrojenin depolanması için taşımayı önceliklendiren yöntemler; sıvı hidrojen, gaz hidrojen, metal hidrit ve kimyasal depolamadır.

⁴ 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, Fondazione Eni Enrico Mattei (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., 2006⁵

Hidrojen üretimi için kimyasal, elektrokimyasal, termokimyasal ve 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, tepkimeye giren gazların tepkime sonunda yeniden düzenlenmesi olarak özetlenebilir.

Katı formda olmayan, akışkan fosil yakıtlardan (örn. doğal gaz) buhar reformasyonu prosesi, gelişmiş ve yaygın bir hidrojen üretim teknolojisi olup günümüzde hidrojen üretiminde en çok kullanılan tekniktir. Buhar reformasyonunda doğal gaz vb. akışkan yakıtlar yaklaşık 700-1.000 °C sıcaklıkta katalizör varlığında tepkimeye sokularak hidrojen (H₂), karbonmonoksit (CO) ve karbondioksitten (CO₂) oluşan sentez gazı üretilir. Buhar (H₂O) oluşumu endotermik bir tepkime olup tepkimenin ilerlemesi için prosese ısı sağlanması gerekir. Sentez gazı üretiminin ardından gaz-su dönüşüm tepkimesi devam eder. Bu işlemde, karbonmonoksit ve buhar, karbondioksit ve daha fazla hidrojen üretmek için bir katalizör kullanılarak

⁵ Çimen, T. (2006). Sıvı Hidrojen Tanklarının Isıl Analizi ve Optimal Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.

tepkimeye 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_a)) altında gazlaştırma gerçekleştirilir. Tepkimenin gerçekleşmesi için katalizör gerekli değildir. Kısmi oksidasyonla oluşan gaz karışımı karbonmonoksit, karbondioksit, su, hidrojen, metan (CH₄) gibi gazlar içerir.

Piroliz, oksijensiz ortamda 0.1-0.5 MP_a'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, karbonmonoksit, karbondioksit ve azot (N_x) 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.

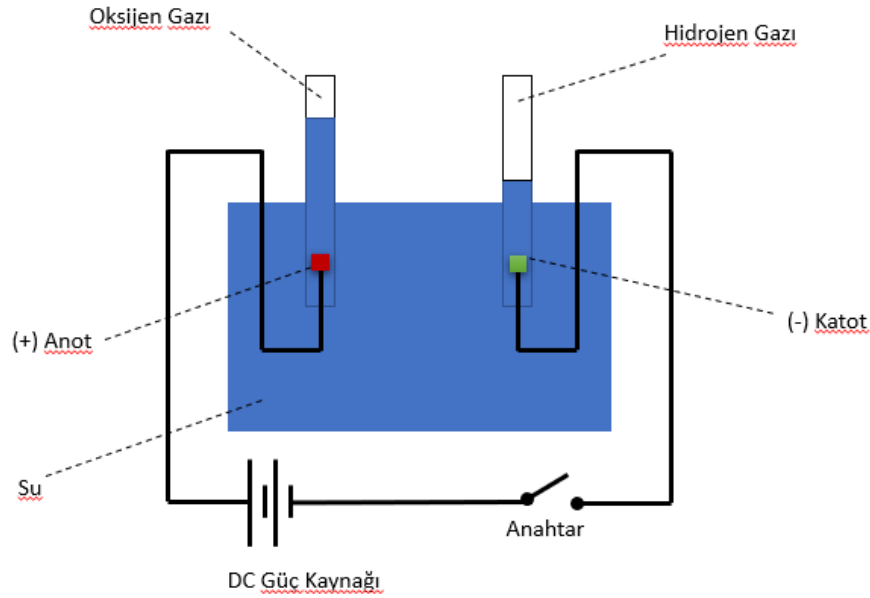
Fosil kaynaklardan hidrojen elde edilmesi süreçlerinde tepkime sonucunda sülfür oksit (SO_x), nitrojen oksit (NO_x), cıva (Hg) ve diğer partiküller gibi çok sayıda kirleticinin yanı sıra karbondioksit gibi sera gazları açığa çıkmaktadır. Fosil yakıtlardan hidrojen üretiminde karbon yakalama, depolama 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 enerjii 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 enerjii 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 teknikle* 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 ve 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 edilebilmektedir. 1.000 MW'lık bir nükleer reaktörden yılda 200.000 ton hidrojen üretimi mümkündür. Gelişmiş reaktörlerde açığa çıkan yüksek sıcaklıklar ile büyük miktarlarda hidrojen üretimi söz konusu olabilir. Bu yöntemle bir yandan şebekeye elektrik üretimi sağlanırken diğer yandan açığa çıkan ısı sayesinde hidrojen üretimini destekleyebilecek potansiyel de değerlendirilmektedir.

3. Hidrojen Enerjisinin Gelişimi

21. yüzyılda insanlık için vazgeçilmez hale gelen enerji, artan nüfusa bağlı olarak talebi sürekli büyüyen bir metaya dönüşmüştür. 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.⁶

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"nı öne süren "Sıvı Hidrojen Yakıt Ekonomisine Doğru" başlıklı bir teknik rapor yayımlamıştır. 18-20 Mart 1974 tarihlerinde 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.⁷

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, araştırmalar ağırlıklı olarak ulaşım sektörüne odaklanmış, 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 yeni (yaklaşık 40 milyon ABD doları) yatırım yapmıştır. 1992 yılında ise AB Komisyonu ve Quebec Hükümeti, özel sektör ile iş birliğine girerek hidrojen enerjisine ilişkin çeşitli projelere destek vermeye başlamıştır.

⁶ Scita vd., a.g.m.

⁷ Yumurtacı vd., a.g.m.

2003 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD), 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 İçin 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.⁸ 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.

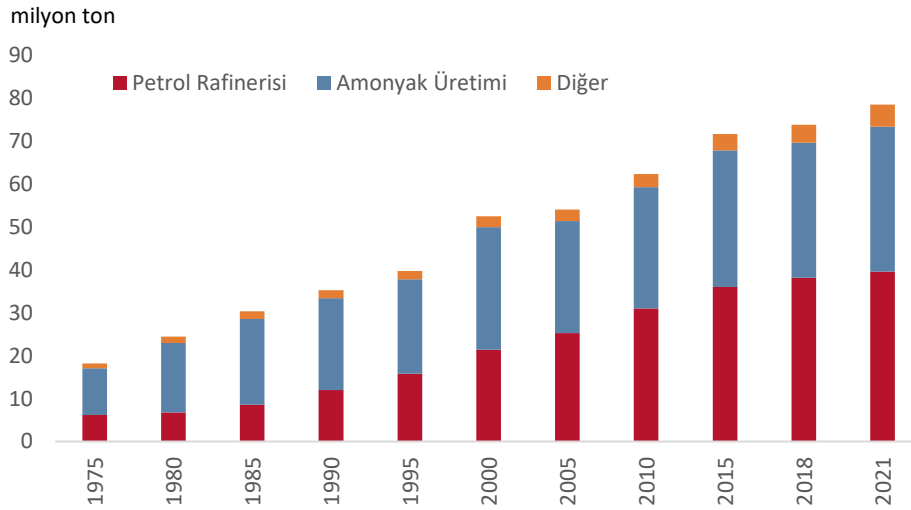
Hidrojenin iki özelliği, yaygın kullanımına yönelik artan ilgiyi açıklayabilmektedir. Bu özellikler, hidrojenin doğrudan hava kirleticileri veya sera gazı emisyonları olmadan kullanılabilmesi ve düşük karbonlu enerji kaynaklarından üretilmesidir. Hidrojen; ulaştırma, petro-kimya ve demir-çelik gibi emisyonları azaltmanın zor olduğu sektörlerde karbonsuzlaşmayı 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, elektriğe ve metana dönüştürülerek haneler veya üretim sektörleri için enerji olarak veya arabalarda, kamyonlarda, gemilerde ve uçaklarda yakıt olarak kullanılabilir.

⁸ 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

Hidrojenin daha iyi ve daha dayanıklı bir gelecek için temiz enerji geçişini teşvik etmesi amacıyla 2017’de kurulan ve günümüzde 145 üyesi bulunan “Hidrojen Konseyi”, küresel şirketlerin bu konuda yatırım çalışmalarını yönlendirmeyi hedeflemektedir.

1975 yılında 18,2 milyon ton olan “saf hidrojen” talebi yıllık ortalama %3’lük bir artış ile 2021 yılında toplam 78,6 milyon tona⁹ ulaşmıştır. 2021 yılında gerçekleşen toplam saf hidrojen talebinin %50,4’ü petrol rafinerisi ve %43’ü amonyak üretimi içindir. Petrol rafinerisi sektöründeki hidrojen talebi, artan petrol talebi ve rafineri ürünlerinin iyileştirilmesi için hidro-arıtma ve hidro-kırma kullanımının artışı nedeniyle yıllar itibarıyla yükselmiştir. Buna karşın sadece 2020 yılında Covid-19 pandemisi sebebiyle petrol rafinerisindeki hidrojen talebi 39,6 milyon tondan 37,9 milyon tona gerilemiştir. Rafineri sektöründe hidrojene yönelik talep, daha geniş karbonsuzlaşma politikalarına ve gerçekleşen petrol talebinin gelişimine bağlı olarak değişim gösterecektir.¹⁰ Bununla birlikte, saf hidrojenin en büyük kullanım alanlarından biri, azotlu gübrenin bir girdisi olan amonyak’ın üretimidir.



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) “Küresel Hidrojen Görünümü 2022” raporuna göre, 2021 yılında yaklaşık 20 milyon ton hidrojen diğer gazlardan ayrışmadan demir-çelik sektöründe ve metan üretiminde kullanılmaktadır.

Çin, 2021 yılında yaklaşık 28 milyon ton taleple dünyanın en büyük hidrojen tüketicisi konumunda olmuştur. Ağır vasıta taşımacılığı sektörü ise Çin’deki hidrojen kullanımında hakimiyetini sürdürmektedir. 2021’in sonunda dünyada 4.100 civarındaki yakıt hücreli otobüslerin %85’inden fazlasını ve 4.300

⁹ 78,6 milyon ton hidrojen 2.925 teravatsaat (TWh) elektrik enerjisine karşılık gelmektedir.

¹⁰ Lambert M. (2020). Hydrogen and decarbonisation of gas: false dawn or silver bullet?

<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2020/03/Insight-66-Hydrogen-and-Decarbonisation-of-Gas.pdf>

civarındaki tüm yakıt hücreli kamyonların %95'inden fazlasını Çin'dedir. Özellikle Çin'de ağır hizmet tipi yakıt hücreli kamyonlarda önemli bir büyüme olmuş ve 2021'de yaklaşık 800 adet kamyon faaliyete geçirilmiştir.¹¹

ABD ve Ortadoğu ülkeleri, her biri yaklaşık 12 milyon ton taleple dünyadaki en büyük ikinci ve üçüncü hidrojen tüketicisi olup Avrupa ülkeleri ise toplam 8 milyon ton ile dördüncü sıradadır. Hindistan ise özellikle rafineri sektörü ve çelik üretiminde Covid-19 pandemisinden en çok etkilenen bölge olarak 2021 yılında gerçekleşen toparlanmanın ardından yaklaşık 8 milyon ton ile Avrupa'nın ardında yer almaktadır.

Yıllık hidrojen üretiminin %95'i, metan gazı veya diğer türevlerin reformasyonu ile fosil yakıtlardan gelmekte ve yalnızca %5'i sürdürülebilir bir şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrolizle üretilmektedir.¹² Bu dağılım, esas olarak hidrojen üretim maliyetinden etkilenmektedir. 2021 yılı verilerine göre, doğal gaz ile hidrojen üretiminin maliyeti kilogram başına 1,0-2,5 ABD doları aralığında iken karbon tutma, kullanma ve depolama (carbon capture, utilisation and storage - CCUS) teknolojisinin kullanımı ile maliyet aralığı kilogram başına 1,5-3,0 ABD doları olmaktadır.¹³ Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen "Yeşil Hidrojen" in kilogram maliyeti ise 4,0-9,5 ABD dolarıdır.

2022'nin başlarında Ukrayna'da yaşanan kriz, Avrupa'da doğal gaz için fiziki arz kısıtlamaları ve 2021'in ikinci yarısında talep toparlanırken fiyat artışının ardından doğal gaz fiyatlarında yaşanan artışla birlikte enerji güvenliği endişeleri artmıştır. Bunun yanı sıra Covid-19 pandemisi hem CCUS'lu hem de CCUS'suz doğal gazdan hidrojen üretme ekonomisini değiştirmiştir. Avrupa'daki gaz piyasalarında Haziran 2022'de gözlenen fiyat artışlarından dolayı, doğal gazdan elde edilen hidrojen üretim maliyetleri 4,8-7,8 ABD Doları/kg ile 2021'deki seviyelerin üç katına kadar çıkmıştır. Bu nedenle yenilenebilir hidrojen, üretim kapasitelerinin izin verdiği ölçüde birçok bölgede hidrojen üretmek için en ucuz seçenek haline gelmiştir. Doğal gaz fiyatlarının tekrar düşmesi durumunda doğal gazdan hidrojen üretiminde rekabet gücünün artabileceği öngörülmektedir.

Tablo 1. Kaynaklara Göre Hidrojen Üretim Maliyeti (2021)

Kaynak	Hidrojen Üretimi Birim Maliyeti Aralığı (ABD doları/kg)
Doğal Gaz	1,00-2,50
Doğal Gaz (CCUS mevcut)	1,50-3,00
Kömür	1,40-2,90
Yenilenebilir Kaynaklar	4,00-9,00

Kaynak: IEA

Yenilenebilir elektrikten hidrojen üretiminin, uzun vadeli karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşılmasında ve enerji arz güvenliğinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Güncel durumda küresel hidrojen üretiminin çok az bölümü yenilenebilir enerji kaynaklarından gelse de yenilenebilir hidrojen artan bir şekilde ilgi çekmektedir. Toplam 25 ülke ile birlikte Avrupa Komisyonu, temiz enerji kaynağı olarak hidrojeni içeren planlarını açıklamış olup bu ülkelerin birçoğu mali destek programları uygulamaya

¹¹ IEA, 2022, Global Hydrogen Review

¹² Forbes, <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2020/07/07/hydrogen-as-a-sustainable-energy-resource/?sh=6b2c91cd37ff>

¹³ IEA, 2022, a.g.e.

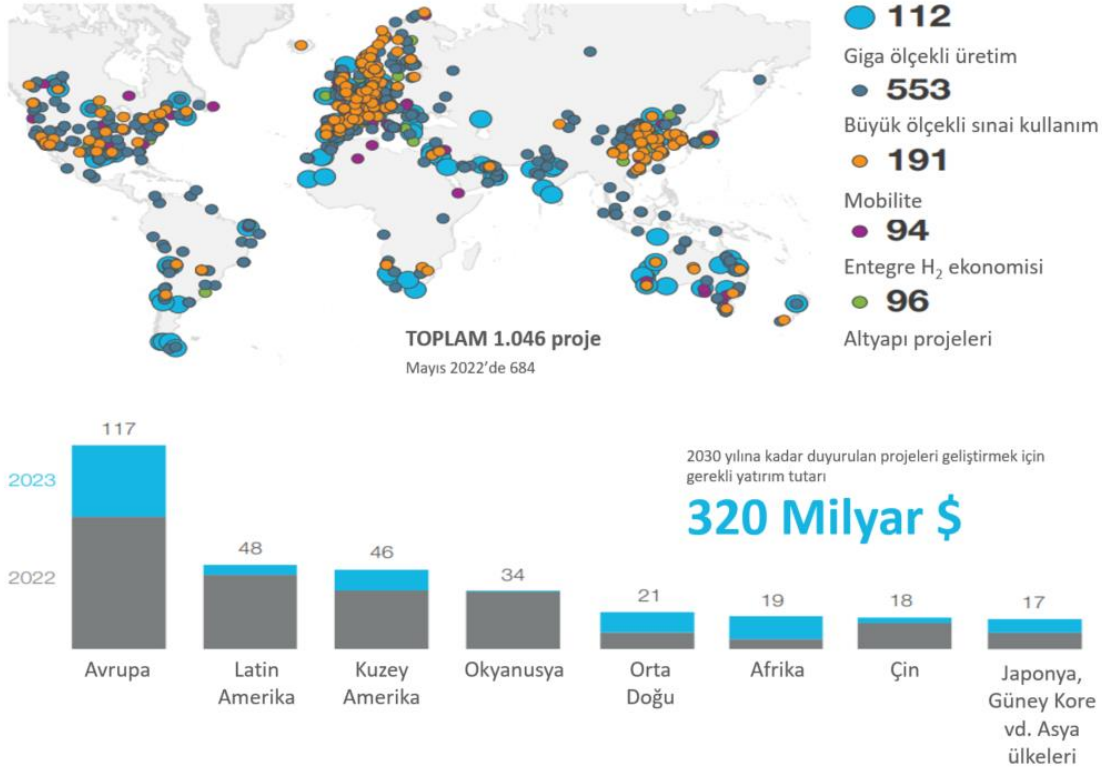
başlamıştır. Bunun neticesinde yenilenebilir enerjiden hidrojen üretmek için elektrolizörlerin kullanılması ve hidrojenin boru hatlarıyla taşınmasına yönelik çeşitli geliştirme projeleri son yıllarda artmaktadır. IEA tarafından 2022 Aralık ayında hazırlanan “Yenilenebilir Enerji” raporuna göre 2022-2027 için, toplam yenilenebilir kapasite büyümesinin %2’sine tekabül eden yaklaşık 50 GW’lık yenilenebilir kapasitenin hidrojen üretimine ayrılacağını tahmin edilmektedir. Bu genişlemeye Çin öncülük ederken onu Avustralya, Şili ve ABD izlemektedir. Bu dört pazar birlikte, hidrojen üretimi için ayrılmış yenilenebilir kapasitenin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır.

Tablo 2. Bölgelere Göre Hidrojen Üretimine Ayrılmış Toplam Yenilenebilir Kapasite, 2021-2027

Bölge	RES (GWh)	GES (GWh)	Yenilenebilir Enerji Kapasite Gelişimi Oranı (%)
Çin	8,2	10,2	1,7
Avrupa	3,3	4	1,7
Avustralya	2,9	3,5	17,4
Ortadoğu ve Kuzey Afrika	1,7	4,5	13,6
Şili	4,9	0,3	19,4
ABD	2,1	2,1	1,5
Diğer	0,2	1,8	3,1
TOPLAM	23,3	26,4	-

Kaynak: IEA

Hidrojen teknolojilerinden bir diğeri olan elektroliz, düşük karbonlu elektrik ve sudan temiz hidrojen üretimini sağlamaktadır. 2021’de su elektrolizi, küresel hidrojen üretiminin yalnızca yaklaşık %0,1’ini oluşturmasına karşın elektrolizörlerin kurulu kapasitesi hızla artmakta olup 2021’in sonuna kadar 510 megavata (MW) ulaşarak bir önceki yıla göre %70 artış sağlamıştır. Üretime dayalı 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 taşıma sistemine hidrojen girdisi ve elektrik depolama bulunmaktadır. Bunlarla birlikte, demir-çelik sektöründe elektroliz uygulamalarının test edildiği de görülmektedir. 2022 yılı itibarıyla küresel olarak, geliştirilmekte veya inşa edilmekte olan yaklaşık 460 elektrolizör projesi bulunmaktadır. Küresel elektrolizör kapasitesinin, 2023 yılının sonu itibarıyla 1,5 GW seviyesine ulaşarak 2021’deki seviyenin yaklaşık üç katına ulaşması beklenmektedir.¹⁴



Şekil 4. Büyük Hidrojen Projeleri

Kaynak: Hidrojen Konseyi

Hidrojen projelerin devletlerin son yıllarda duyurduğu net sıfır sera gazı emisyonu taahhütlerini gerçekleştirmek için kilit bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Rusya'nın Ukrayna'yı işgalinin yol açtığı küresel enerji krizi bu ivmeyi daha da artırmıştır. Pek çok devlet, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmanın bir yolu olarak düşük emisyonlu hidrojene yönelmektedir. 2021 Şubat ayı itibarıyla dünya genelinde 30 ülkede hidrojen yol haritası ve açıklanan büyük ölçekli toplam 228 hidrojen projesi bulunurken 2023 Ocak itibarıyla proje sayısı 1.046'ya ulaşmıştır.¹⁴ Daha önce ağırlıklı Avrupa'da bulunan projelerin dünya üzerinde diğer kıtalarda da arttığı izlenmektedir. 2030 yılına kadar duyurulan projeleri geliştirmek için gerekli yatırımların tutarı 320 milyar ABD doları olarak belirlenmiş olup toplam tutarın %36'sı Avrupa, %30'u Amerika kıtalarında yer almaktadır.

3.3. Hidrojen Enerjisinin Potansiyeli

Ülkeler özel hidrojen stratejilerini hazırlamakta ve üzerinde anlaşmaya varmaktadır. Ortaya çıkan 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.

¹⁴ Hidrojen Konseyi. (2023). "Hydrogen Insights 2023", <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023/>

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.¹⁵ Almanya, hidrojenin gelecekteki enerji sisteminin önemli bir unsuru olduğu karbon nötr hedefini benimsemektedir. Japonya ve Güney Kore gibi bazı Asya ülkeleri, hidrojen ekonomisiyle 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 taşıtları yakıtlarının sülfür içeriğini 2020'den itibaren %0,5'ten fazla olmayacak şekilde sınırlayan yeni yakıt yönetmeliğini getirmiş olup bu yönetmeliğin denizde yakıt üretimi için hidrojen gereksinimlerinde önemli bir artışa yol açması beklenmektedir.¹⁶ Bununla birlikte, deniz taşımacılığında kullanılması planlanan "karbon içermeyen" amonyak da bir potansiyel olarak değerlendirilmektedir.¹⁷

Hidrojen Konseyi, hidrojene önümüzdeki yıllarda kamu ve özel sektör tarafından küresel olarak en az 300 milyar ABD doları yatırım yapılmasının beklendiğini ve hidrojenin küresel enerji talebinin neredeyse beşte birini karşılayabileceğini belirtmektedir.¹⁸

Hidrojenin yaygınlaşmasını sağlayacak unsurlar arasında daha verimli ve düşük maliyetli enerji temini ile çevreyi kirletmeyen temiz kaynak arayışları bulunmaktadır. Görece daha temiz bir kaynak olması itibarıyla, hidrojenin çok önemli bir kaynak olarak nitelendirilmesi mümkündür. 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.

¹⁵ Ludwig-Bölkow-Systemtechnik ve World Energy Council (WEC). (2020). International Hydrogen Strategies A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany. https://www.weltenergieat.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC_H2_Strategies_finalreport.pdf

¹⁶ Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO). (2020). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>

¹⁷ Gemi Performans Optimizasyonu, <https://vpoglobal.com/2019/07/27/energy-experts-support-carbon-free-ammonia-as-a-marine-fuel/>

¹⁸ Hidrojen Konseyi, <https://s360.com.tr/S360MagDetail?postid=86cedb1c-2b76-44c9-9c55-c221f3d0d318>

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. 2018 ve 2023 yılları arasında ülkelerin ilan ettikleri hidrojen girişimleri aşağıda verilmiştir. Ulusal seviyedeki gelişmelere paralel olarak özel sektördeki girişimlerin sayısı da artış göstermiştir.

Son yıllarda hidrojen enerjisine en önemli hükümet desteği, **ABD**'de Ağustos 2022'de çıkan Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) kapsamında verilmiştir. Yeşil hidrojen üreticilerine 10 yıl boyunca kilogram başına 3 ABD doları vergi indirimi sağlayan bu yasa ile ABD, dünyada yenilenebilir hidrojen üretiminin en ucuz yapılabildiği yer haline gelmiştir.¹⁹ Vergi indirimi aynı zamanda ABD'nin çoğu eyaleti için yeşil hidrojeni, petrol rafinasyonu ve kimyevi madde üretimi için kullanılan gri hidrojenden de ucuz hale getirmiştir. Ayrıca ABD Enerji Bakanlığı 7 milyar ABD dolarlık bütçe ile H2Hubs Programı kapsamında 6 ila 10 bölgesel temiz hidrojen merkezi kurmayı hedeflemektedir.²⁰ 2022 yılında 79 grup şirketi yatırım için başvuruda bulunmuş olup bunlardan 33'ü 2023'te tam başvuru için kabul edilmiştir.²¹ Hidrojen merkezlerinin yerleri ülke çapındaki tüm endüstriyel bölgeleri içerecek şekilde belirlenmiştir. Verilen en önemli teşviklerden biri olmasının yanında IRA'nın, rekabet ortamını güçlendirerek yeşil hidrojen alanında büyük oyuncu olmak isteyen tüm diğer ülkeleri daha rekabetçi teşvikler vermeye itmesi beklenmektedir.

Hidrojen üretimi ve uygulamaları konusunda lider ülke konumuna gelmek isteyen **Almanya** 2020 yılında "Ulusal Hidrojen Stratejisi"ni yayımlamıştır.²² 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

¹⁹ Recharge News. (2022). https://www.rechargenews.com/energy-transition/analysis-why-the-us-climate-bill-may-be-the-single-most-important-moment-in-the-history-of-green-hydrogen/2-1-1275143?zeph_sso_ott=wuq7RE

²⁰ ABD Temiz Enerji Gösterim Ofisi (OCED). (2023). <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-update>

²¹ H2-Tech. (2023). <https://h2-tech.com/articles/2023/july-2023/online-feature/academics-come-together-to-pool-h-sub-2-sub-hub-ideas/>

²² Almanya Ekonomi ve İklim Koruma Bakanlığı (BMWK). (2023).

https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=1

üretimi) ve rafinerilerden oluştuğu ve üretiminin çoğu fosil yakıtlara dayalı olan büyük sayılabilecek bir hidrojen pazarına sahiptir. Almanya Hükümeti 2022 Aralık ayında H2Global Planını yayımlamış ve bu plan çerçevesinde AB dışından alınacak yeşil hidrojen türevleri için ilk aşamada 900 milyon euroluk fon ayırdığını açıklamıştır.²³ Bu kaynağın üreticilere en erken 2024 yılında ulaşması beklenmektedir.

Japonya, 2019 yılında yayımladığı “Hidrojen ve Yakıt Hücreleri İçin Stratejik Yol Haritası”²⁴ 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 kırılma ve sera gazı emisyonlarını azaltma taahhütlerini ele almaktadır.²⁵ 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. 2023 yılının Mayıs ayında Japonya hidrojen hedeflerini güncelleyerek 2040 yılına kadar yıllık 12 milyon ton hidrojen arzı planladığını ilan etmiştir. Japon Sanayi Bakanlığının yaptığı açıklamaya göre önümüzdeki 15 yıllık süreçte kamu kaynakları ve özel kaynaklardan 113 milyar ABD dolarından fazla yatırım yapılması öngörülmektedir.²⁶

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 yayımlamıştır.²⁰ Otobüsler, yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV) ve yakıt ikmal 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. 2023 yılında Çin’deki yeşil hidrojen üretiminin genişlemesi beklenmektedir. Sinopec tarafından Xinjiang’da inşa edilen 260 MW’lık üretim tesisi kömür ağırlıklı olarak enerji ihtiyacını karşılayan bölgede yeşil dönüşümün sağlanması yolunda önemli bir adım olarak görülmektedir.²⁷

AB ülkeleri arasında hidrojenin tartışılması amacıyla “Hidrojen Enerji Ağı” platformu kurulmuş ve söz konusu platform ilk toplantısını Haziran 2019’da gerçekleştirmiştir. 28 AB üyesi ülke, yaklaşık 100 işletme,

²³ BMWK. (2023). <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2022/12/20221208-federal-ministry-for-economic-affairs-and-climate-action-launches-first-auction-procedure-for-h2global.html>

²⁴ Stratejik ve Uluslararası Çalışmalar Merkezi (CSIS). (2021). <https://www.csis.org/analysis/japans-hydrogen-industrial-strategy>

²⁵ Ludwig-Bölkow-Systemtechnik ve World Energy Council (WEC). (2020). International Hydrogen Strategies A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany. https://www.weltenergieat.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC_H2_Strategies_finalreport.pdf

²⁶ Reuters. (2023). <https://www.reuters.com/business/energy/japan-aims-boost-hydrogen-supply-12-mln-t-by-2040-2023-04-04/>

²⁷ Recharge News. (2022). <https://www.rechargenews.com/energy-transition/inside-china-s-260mw-behemoth-how-green-is-the-worlds-biggest-green-hydrogen-project-2-1-1229052>

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 yayımlanmıştır. 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 ulaştırma ve sanayinin yanı sıra elektrolize dayalı hidrojen üretimine odaklanmaktadır. Ulaştırma 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.

Mayıs 2022’de Avrupa Komisyonu Karbon Fark Kontratı’nda (Carbon Contracts for Difference – CCfD) doğal gazdan hidrojen üretiminin olduğu mevcut endüstriyel süreçlerin yenilenebilir dönüşürülmesi ve yeni endüstriyel sektörlerde temiz hidrojene geçişi İnovasyon Fonu kaynağını kullanarak teşvik edeceğini açıklamıştır.²⁸ Teşvikler, AB bloğunun 2030 yılına kadar 10 milyon ton yeşil hidrojen üretme ve bir o kadar da ithal etme hedefine uygun olarak tasarlanmıştır. Ayrıca AB, üye ülkelere 3,5 GW yeni elektroliz kapasitesi inşası teşvikleri için 5,2 milyar euro tutarında kaynak ayırmıştır.²⁹ Yine Mayıs 2022’de yayımlanan “REPower EU” planı ile AB’nin yenilenebilir hidrojen hedeflerinin Rusya’dan sağlanan fosil yakıt ithalatının azaltılması boyutuyla önemine dikkat çekilmiştir.³⁰ 2023 yılı sonuna kadar kurulması öngörülen Avrupa Hidrojen Bankası ile erken dönem projeleri ve altyapısı için gerekli finansmana ulaşımın kolaylaştırılması ve AB içinde ve uluslararası arenada uygun kredilerin sağlanması hedeflenmektedir.³¹

Hollanda, 2020 yılında hidrojen yol haritası yayımlamış 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.³²

Fransa, 2018 yılında yayımladığı “Hidrojen Dağıtım Planı” çerçevesinde 100 milyon euroluk finansman ile sanayi, ulaştırma ve yenilenebilir enerji depolama alanlarında düşük karbonlu hidrojen için 2023 ve 2028 hedeflerini açıklamıştır. Dağıtım planının ana hedefi, Fransa’daki sera gazı emisyonunun azaltılmasına

²⁸ Recharge News. (2022). <https://www.rechargenews.com/energy-transition/eu-announces-full-switch-of-existing-grey-hydrogen-production-to-green-h2-backed-by-carbon-contracts/2-1-1221044>

²⁹ Recharge News. (2022). <https://www.rechargenews.com/energy-transition/-5-2bn-bonanza-eu-unlocks-even-more-subsidies-for-hydrogen-this-time-for-heavy-industry/2-1-1304500>

³⁰ Avrupa Komisyonu. (2022). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033922121>

³¹ Avrupa Komisyonu. (2023). https://energy.ec.europa.eu/news/commission-outlines-european-hydrogen-bank-boost-renewable-hydrogen-2023-03-16_en

³² Hollanda Ekonomi ve İklim Politikası Bakanlığı. (2020).

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

yardımcı olmak ve yenilenebilir elektrik arzını, esas olarak hidrojen depolama ve “Power-to-Gas” teknolojisi tarafından sağlanan ek hizmetler yoluyla enerji sistemine entegre etmektir.³³ Bunun yanında enerjisinin %70’ini nükleer enerjiden karşılayan Fransa, nükleer enerjiden üretilen düşük karbonlu hidrojenin yenilenebilir enerji kavramı dahilinde değerlendirilmesi için Avrupa Parlamentosu’nda lobi faaliyetleri yürütmektedir.³⁴

Birleşik Krallık ise ABD dışında temiz hidrojen için ulusal teşvik açıklamış ülkelerden olma özelliğini taşımaktadır. Avrupa Birliği’nin açıkladığına benzer olarak Nisan 2022’de açıklanan Fark Kontratı (CCfD) ile Birleşik Krallık, toplam 1 GW kapasiteye kadar yeşil hidrojen projelerini desteklemeyi planlamaktadır.³⁵ Kullandırımların 2023 ve 2024 yıllarında olmak üzere iki dönemde yaptırılması kararlaştırılmıştır. Hidrojen enerjisine yönelik faaliyetleriyle ilgili ana hedef, sera gazı emisyonunu azaltarak yenilenebilir enerjiyi enerji sistemine entegre edip çevrenin korunması olarak belirlenmiştir. Bu şekilde, hidrojenin uzun vadeli karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmada 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 Stratejisi³⁶, 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 hazırlamıştır.³⁷ 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 ulaştırma sektörüne yoğunlaştığı görülmektedir.

³³ Power-to-Gas (P2G) kavramı su elektrolizi yoluyla hidrojen üretmek için yenilenebilir enerjiden üretilen veya fazla elektriğin kullanılmasını ifade etmektedir.

³⁴ Reuters. (2023). <https://www.reuters.com/business/energy/france-leads-push-eu-boost-nuclear-produced-hydrogen-2023-02-03/>

³⁵ Birleşik Krallık İşletme, Enerji ve Sınai Strateji Departmanı (BEIS). (2022). https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1123751/hydrogen-strategy-update-to-the-market-december-2022.pdf

³⁶ Avustralya Hükümetleri Konseyi (COAG) Enerji Kurulu. (2019). <https://www.dceew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>

³⁷ CSIS. (2021). <https://www.csis.org/analysis/russias-hydrogen-energy-strategy>

4.2. Hidrojen Enerjisi İçin Kalkınma Finansmanı

Afrika Kalkınma Bankası (AfDB), Brazilya Kalkınma Bankası (BNDES), Asya Kalkınma Bankası (ADB), Asya Altyapı ve Kalkınma Bankası (AIIB), hidrojen politikalarının geliştirilmesinin desteklenmesi, teknik danışmanlık ve bilgi desteği sağlanması noktalarında paydaşları ile iş birliği yürütmektedir.³⁸

Avrupa Kalkınma ve Yatırım Bankası (EBRD), hidrojen değer zincirinin tüm segmentlerine dokunabilecek mezanin, öz sermaye yatırımı, garantiler, harman finansman, ayrıcalıklı finansman gibi değişik enstrümanlar ile bu alanda destek sağlamaktadır. EBRD uygulamaya aldığı “Hidrojeni Hızlandırma Programı” ile Güney ve Doğu Akdeniz, Türkiye, Kafkaslar, Moldova, Balkanlar, Kazakistan ve Özbekistan’da hidrojen politikalarını ve pazarını değerlendirerek politika önerilerinde bulunmaktadır. COP27 sonrasında ise Mısır ile hidrojene yönelik ilk finansmanı gerçekleştirmiş ve Afrika’daki ilk entegre yeşil hidrojen tesisi olacak 100MW’lık elektrolizör tesisi için gerekli yatırıma 80 milyon ABD doları finansman sağlama adımını atmıştır.³⁹

Dünya Bankası Grubu, Enerji Sektörü Yönetim Yardımı Programı (ESMAP) ile halihazırda düşük ve orta gelirli ülkeleri düşük karbonlu ekonomiye geçiş amacıyla hidrojen kapasitelerini artırma noktasında desteklemektedir. Verilen finansal, teknik destekler, kapasite gelişimi, risk yönetimi desteklerinin yanı sıra sağlanan finansman ile pilot projelerin gelişmesini ve yaygınlaşmasını hedefleyen Grup, yeşil hidrojen yatırımlarını desteklemek üzere 2023 Mayıs ayında Şili hükümeti ile 150 milyon ABD doları tutarında bir kredi tahsis anlaşması imzalamıştır.⁴⁰

4.3. Hidrojen Alanında Öne Çıkan Projeler ve Uygulamalar

2022 yıl sonu itibarıyla 240 milyar ABD doları tutarında 680 adet büyük çaplı hidrojen projesi ortaya konulmuşsa da bu tutarın yalnızca %10’u son yatırım kararı aşamasına ulaşmıştır.⁴¹ Avrupa, planlanan yatırımların tümünün %30’u civarına ev sahipliği yaparak lider konumda görünürken Çin elektrolizör, Japonya ve Kore ise yakıt hücresi yatırımlarında lider konumdadır.⁴²

Hidrojen diğer kullanım alanlarına kıyasla ulaştırma sektöründe yaygın olarak benimsenmiş durumdadır. 2022 yılı Eylül ayı itibarıyla, dünya çapında 756 hidrojen yakıt ikmal istasyonu mevcuttur. Bu alanda Çin 250 istasyonla lider konumda iken, onu 161 istasyonla Japonya ve 141 istasyonla Güney Kore izlemektedir.⁴³ 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’de Alstom tarafından üretilen “Coradia iLint” hidrojenli tren Almanya’da faaliyete geçmiş, Ağustos 2022’de

³⁸ Green Hydrogen Organisation. (2022). <https://gh2.org/sites/default/files/2022-11/Development%20finance%20-%20green%20hydrogen%20priority%20actions%20-%20Nov%202022.pdf>

³⁹ Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD). (2022). <https://www.ebrd.com/news/2022/ebrd-supports-first-green-hydrogen-facility-in-egypt-.html>

⁴⁰ Dünya Bankası. (2023). <https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P177533>

⁴¹ <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf>

⁴² a.g.e.

⁴³ H2Tools (2022). <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/international-hydrogen-fueling-stations>

14 adet ilave tren filoya dahil olarak hizmete başlamıştır. Birleşik Krallık ve Hollanda da Alstom'ın hidrojenli trenlerini kullanmaya 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 artırabilecek tüketim odakları olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, hidrojen uygulamalarının farklı boyutlarını 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.

- Çin'in Xinjiang bölgesindeki Ulanqab şehri yakınlarında 2,8 milyar ABD dolara inşa edilen "Kuqa" 260 MW'lık elektroliz tesisinin 400 kilometrelik yeni bir boru hattıyla Pekin'deki Yanshan petrokimya tesisine senede 100.000 ton yenilenebilir hidrojen iletimi planlanmaktadır.
- Yine Sinopec tarafından inşa edilen bir başka yenilenebilir hidrojen tesisi olan "Ordos" ise 390 MW kapasite ile dünyanın en büyüğü olma unvanını taşımaktadır. Senede 30.000 ton yeşil hidrojen üretecek tesis için 831 milyon ABD doları yatırım yapılması planlanmaktadır.⁴⁴
- 2023 Ocak ayında açıklanan "Hidrojen Şehirleri Yaratma Projesi" ile ülkenin çeşitli bölgelerinde 6 şehirde konutlarda ve ulaşımda kullanılmak üzere mavi hidrojen projesi, boru hattı, dolmuş istasyonu ve taşıtlar için 193 milyon ABD doları yatırım açıklanmıştır.⁴⁵
- 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.⁴⁶
- 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 yapılan ve yenilenebilir enerji ile çalışan 10 MW'lık hidrojen üretim ünitesi 2020 yılında devreye alınmıştır. Ulaştırma uygulamalarında kullanılmak üzere yenilenebilir kaynaklardan yılda 900 ton hidrojen sağlayacak ünitenin ihtiyaç duyacağı elektriği 20 MW'lık bir güneş santrali projesinden karşılayacağı belirtilmiştir.⁴⁷

⁴⁴ Hydrogen Insight. (2023). <https://www.hydrogeninsight.com/production/world-s-biggest-green-hydrogen-project-now-under-construction-in-china-replacing-coal-based-h2/2-1-1406885>

⁴⁵ Hydrogen Insight. (2023). <https://www.hydrogeninsight.com/policy/south-korea-to-create-six-hydrogen-cities-that-would-use-h2-in-buildings-and-transport-as-part-of-daily-life/2-1-1385821>

⁴⁶ S&P Global. (2021). <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/030121-shell-plans-bio-power-to-liquids-project-at-rheinland-refinery>

⁴⁷ Toshiba Energy. (2020). https://www.toshiba-energy.com/en/info/info2020_0307.htm

- 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 tesisini 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.⁴⁸
- 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.⁴⁹
- 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 Haliçi'nde 12,15 GW'lık bir hidrojen üretim tesisi, 8 TWh'lık bir sezonsal depolama tesisi, talebin yoğun olduğu merkezlerde yeni hidrojen iletim boru hattı ve yıllık 20 milyon tonluk karbondioksit yakalama ve depolama yer almaktadır.⁵⁰
- **H-vision girişimi**, Hollanda'nın Rotterdam limanındaki ilk potansiyel mavi hidrojen projesidir. Hedef, 2030 yılına kadar projenin tamamının gerçekleştirilmesi yönündedir. H-vizyon projesi, CO₂'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.⁵¹
- 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.⁵²
- 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

⁴⁸ Hidrojen Enerjisi Tedarik Zinciri Projesi. (2022). <https://hydrogenenergysupplychain.com/>

⁴⁹ PV Magazine. (2020). <https://www.pv-magazine.com/2020/10/20/wa-govt-approves-15-gw-asian-renewable-energy-hub-whole-project-now-expanded-to-26-gw/>

⁵⁰ H21 Programı. (2021). <https://h21.green/projects/h21-north-of-england/>

⁵¹ Hidrojen Vizyonu Konsorsiyumu. <https://www.h-vision.nl/en>

⁵² Air Liquide. (2021). <https://www.airliquide.com/magazine/energy-transition/inauguration-worlds-largest-pem-electrolyzer#:~:text=Air%20Liquide%20inaugurated%20the%20largest,hydrogen%20on%20a%20large%20scale>

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.⁵³

- 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 santralini kurulmasının planlandığı duyurmuştur. 1 GW kapasiteli santralin faaliyete geçmesiyle "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 gereksiz 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.

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.⁵⁴ 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 Resmî Gazete'de yayımlanan "Enerji Verimliliği Kanunu"nda hidrojen, biyoyakıt ile birlikte kullanımı özendirilmesi gereken alternatif yakıt olarak belirlenmiştir.⁵⁵ Ayrıca, 2011 yılında hidrojen yakıtlı araçlara ilişkin bir yönetmelik çıkarılmıştır.⁵⁶ 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 alsa 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.⁵⁷ ETKB Bakanı Fatih Dönmez, konuşmasında Bakanlık olarak hidrojeni 4 ana

⁵³ Green Car Congress. (2019). [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)

⁵⁴ UNIDO. (2011). <https://www.unido.org/news/first-hydrogen-energy-production-turkish-island-has-started-bozcaada>

⁵⁵ Resmi Gazete, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.htm>

⁵⁶ Resmi Gazete, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/06/20110607-4.htm>

⁵⁷ ETKB, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerjide-arama-etkinlikleri-ve-belgeler>

fayda üzerinden elde etmeyi amaçladıklarına dikkati çekmiştir. Bu ana faydalar arasında; daha fazla yenilenebilir enerjiyi sisteme dahil etmek, ısı sektörünü karbon emisjonsuz 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.⁵⁸

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. Açılışta bir konuşma yapan ETKB Bakanı Fatih Dönmez, tesisin toplamda 6 milyon lira yatırım bedeliyle tamamlandığını, Türkiye’de ilk defa doğal gazla hidrojen karıştırılarak evsel cihazların beslenmesi projesinin hayata geçirildiğini belirtmiştir.⁵⁹ 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.

2021 yılında Hidrojen Teknolojileri Derneği, “Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası” raporunu yayımlamış ve bazı önerilerde bulunmuştur. 2020-2025 yılları arasında hidrojenin doğal gaz sistemine entegrasyonunun yanı sıra, 2025-2030 yılları arasında doğal gaz boru hatlarına %10 oranında hidrojen karıştırılması yapılan öneriler arasında öne çıkmıştır.⁶⁰

2022 yılı Türkiye’de hidrojen teknolojisi için milat denebilecek bir yıl olmuştur. Aralık ayında ETKB tarafından yayımlanan “Türkiye Ulusal Enerji Planı” kapsamında konu bir başlık olarak yer almıştır. Yayımlanan rapor, emisyon azaltımı sağlamak amacıyla doğal gazın hidrojen ve sentetik metan gibi temiz yakıtlarla karıştırılması gerekliliğine işaret ederken, 2035 yılında bu karışımda hidrojenin payının %3,5 olmasının hedeflendiği belirtilmiştir.⁶¹ Hidrojenin öncelikli olarak yerinde tüketim ve sanayi ihtiyacını karşılaması amaçlanmaktadır. Tüm bu çerçevede hidrojen üretiminde önemli bir yeri olan elektrolizör için de 2035 yılı itibarıyla 5,0 GW’lık kapasite hedefi konmuştur. Bunun yanında, 2035 yılı sonrasında ise karışımda hidrojenin payının %12’ye çıkarılması hedeflenmiştir.

ETKB, “Türkiye Ulusal Enerji Planı” raporunun ardından 2023 yılının başında “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası”nı yayımlamıştır.⁶² Yol haritasında, kısa, orta ve uzun vadede hem hidrojen üretimi hem de üretim teknolojisinin geliştirilmesi konularına değinilmiştir. 2035 yılına kadar yeşil hidrojen üretim

⁵⁸ <http://icci.com.tr/enerji-bakanligi-hidrojen-stratejisini-ankaradaki-calistayda-acikladi/>

⁵⁹ GAZBİR. (2021). <https://www.gazbir.org.tr/uploads/page/Mart-Nisan-2021-Bulten.pdf>

⁶⁰ Hidrojen Teknolojileri Derneği. (2021).

https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf

⁶¹ ETKB, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

⁶² ETKB, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalari/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf

maliyetini 2035 yılına kadar kilogram başına 2,4 ABD dolarının altına ve 2053 yılına kadar kilogram başına 1,2 ABD dolarının altına indirmenin hedeflendiği belirtilmiştir. Ayrıca yol haritasında hidrojen ile ilgili mevzuatın geliştirilmesi gereğine de değinilmiştir.

Tüm bu gelişmeler çerçevesinde Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen tesisinin inşası için Bandırma Enerji Üssü seçilmiştir. 2023 Şubat ayında imzalanan protokol kapsamında Bandırma ilçesinde bulunan EnerjiSA Bandırma Enerji Üssü'nde hidrojen üretimi yapılması planlanmıştır.⁶³ Bu proje kapsamında Güney Marmara Kalkınma Ajansı'nın önderliğinde, Enerjisa Üretim, TÜBİTAK MAM, Eti Maden ve Aspilsan'ın içinde bulunduğu bir yeşil hidrojen platformu oluşturulmuş ve Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen üretim ve depolama tesisi için harekete geçilmiştir. Minimum 500 ton yeşil hidrojen üretilmesi planlanan ve beş yıl sürecek projenin toplam yatırım maliyeti 36,8 milyon euro olarak kaydedilmiştir.

⁶³ <https://www.donanimhaber.com/enerjisa-uretim-marmara-denizi-nden-yesil-hidrojen-uretiyor--159737>

6. İklim Değişikliği İle Mücadelede Hidrojen Enerjisi

Hidrojen enerjisi, çeşitli sektörlerde sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli nedeniyle iklim değişikliği ile mücadelede umut verici bir çözüm olarak görülmektedir. Hidrojen enerjisi ve iklim değişikliğiyle mücadele arasındaki ilişkinin bazı temel yönleri aşağıdaki gibidir:

- **Karbonsuzlaştırma:** Hidrojen enerjisi; ulaştırma, sanayi, enerji üretimi ve ısıtma gibi sektörlerde fosil yakıtların yerini alarak karbonsuzlaştırma çabalarına katkıda bulunabilir. Hidrojen elektroliz yoluyla yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretildiğinde, yanmasının tek yan ürünü su buharı olduğundan temiz ve düşük karbonlu bir yakıt haline gelmektedir. Fosil yakıtlar yerine hidrojen kullanılarak, sera gazı emisyonları ve fosil yakıtların yanmasıyla ilişkili diğer kirleticiler önemli ölçüde azaltılabilecektir.
- **Sektör Entegrasyonu:** Hidrojen enerjisi, ekonominin çeşitli sektörleri arasında köprü kurarak sektör entegrasyonunu sağlayabilmektedir. Örneğin, yenilenebilir enerji fazlası elektroliz yoluyla hidrojen üretmek için kullanılabilir. Bu hidrojen daha sonra, kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanarak ve kesintiyi azaltarak, ulaştırma ve sanayi sektörlerinde kullanılabilir. Hidrojen ayrıca yüksek sıcaklıkta ısı gerektiren endüstriyel işlemlerde veya kimyasalların üretimi için hammadde olarak değerlendirilebilmekte ve bu sektörlerin karbonsuzlaştırılmasına da katkıda bulunabilmektedir.
- **Enerji Depolama ve Şebeke Dengeleme:** Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasının yarattığı dezavantajların giderilmesine yardımcı olabilmekte ve bir enerji depolama aracı olarak rol alabilmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen fazla elektrik, daha sonra depolanabilen ve daha sonra gerektiğinde tekrar elektrığe veya ısıya dönüştürülebilir hidrojen üretmek için kullanılabilir. 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. Bu, şebekeyi dengelemeye, enerji arz güvenliğini artırmaya ve yenilenebilir enerjinin daha yüksek paylarla şebekeye entegrasyonunu desteklemeye yardımcı olabilmektedir.
- **Karbonsuzlaştırılması Zor Sektörlerde Emisyonların Azaltılması:** Hidrojen, ağır hizmet taşımacılığı, havacılık ve yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel süreçler gibi doğrudan elektrikleştirmenin zor olduğu sektörleri karbondan arındırma potansiyeline sahiptir. Bu sektörlerdeki fosil yakıtların hidrojen ile değiştirilmesi, sera gazı emisyonlarında önemli azalmalar sağlayabilecektir.
- **Teknolojik Gelişme ve İnovasyon:** Hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, teknolojik ilerlemelere ve inovasyona katkıda bulunmaktadır. Araştırma ve geliştirme çalışmaları, hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanım teknolojilerinin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırmaya odaklanmaktadır. Bu ilerlemeler sadece hidrojen enerjisine fayda sağlamamakta, diğer yenilenebilir enerji teknolojilerinde de yenilikçi gelişmeleri teşvik ederek düşük karbon ekonomisine geçişte katkıda bulunmaktadır.

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 altyapı oluşumunun sağlanabileceği öngörülmektedir.

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 yayımlanan AB Hidrojen Stratejisi, hidrojeni Avrupa Yeşil Mutabakatı'na ulaşmak için kilit bir öncelik olarak tanımlamaktadır.⁶⁴ AB Hidrojen Stratejisi, hidrojenin Avrupa'nın gelişmekte olan teknolojilerdeki rekabet gücünü artırma potansiyeline sahip olduğunun altını çizirken, 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 yayımlamıştır. 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.⁶⁵ 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.

Kasım 2023'te Abu Dhabi'de gerçekleştirilecek COP28'in başkanı ve aynı zamanda Abu Dhabi Ulusal Petrol Şirketi ADNOC'un CEO'su ve yenilenebilir enerji geliştiricisi Masdar'ın başkanı olan Sultan Ahmed Al Jaber; 2030 yılına kadar enerji verimliliğini ikiye katlamak, yenilenebilir enerji kapasitesini üç katına çıkarıp 11.000 GW'a çıkarmak ve hidrojen üretimini ikiye katlayarak yılda 180 milyon tona çıkarmak için küresel Kuzey ve Güney'deki hükümetlerle ortaklık yapılması gerektiğini Temmuz 2023'teki bir konuşmasında dile getirmiştir.⁶⁶

Hidrojen enerjisi büyük bir potansiyele sahip olsa da üretim maliyeti, altyapı geliştirme ve hidrojen üretim yöntemlerinin sürdürülebilirliğini sağlama gibi ele alınması gereken zorluklar olduğunu not etmek gerekir. Bununla birlikte, teknolojiler ve politikalar gelişmeye devam ettikçe, hidrojen enerjisinin iklim değişikliğiyle mücadelede ve daha sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişte giderek daha önemli bir rol oynaması kaçınılmazdır.

Sonuç olarak, enerji üretiminde ağırlıklı biçimde fosil kaynaklara bağlı olan Türkiye'nin hidrojen enerjisi yolculuğuna, gündemde olan iklim politikaları çerçevesinde, başta AB olmak üzere diğer ülkelerin yaptığı çalışmaları da gözетerek ve özel sektörün katkısını alarak devam etmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

⁶⁴ Beedell, Estan. (2021). "Recovery Through Reform: Advancing a Hydrogen Economy While Minimizing Fossil Fuel Subsidies", International Institute for Sustainable Development (IISD).

⁶⁵ Hidrojen Avrupa. (2021). <https://www.hydrogeneurope.eu/>

⁶⁶ Fuel Cells Works. (2023). <https://fuelcellsworks.com/news/cop28-aims-to-boost-global-hydrogen-production-to-180-million-tons-annually-by-2030/>



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.

©2023 Bu raporun tüm hakları saklıdır. TSKB'nin izni olmadan raporun içeriği herhangi bir şekilde basılamaz, çoğaltılamaz, fotokopi veya teksir edilemez, dağıtılamaz.