



Enerji Depolama Teknolojileri

Hidrojen Enerjisi

Mart 2022

Enerji Depolama Teknolojileri

Hidrojen Enerjisi

Mart 2022

Bu çalışma, TTGV Ideaport Komünite üyesi ve teknoloji profesyoneli 5 uzmandan ve 1 Ideaport Yıldızlar komünitesi üyesinden oluşan “Enerji Depolama Teknolojileri - Hidrojen Enerjisi Çalışma Grubu” tarafından hazırlanmıştır. Farklı sektörleri temsil eden uzmanlarımız; Hidrojen enerjisinin kullanım alanları, maliyetleri, depolanması, taşınması ve güvenliği gibi başlıklarında bir araya gelerek karşılıklı deneyim ve fikirlerini paylaştıkları ortak bir çalışma gerçekleştirdiler. Sekiz haftalık çalışmalarının sonucu olarak hazırladıkları bu rapor; tüm dünyada giderek önem kazanan “Hidrojen Enerjisi” konusunun ülkemizdeki ve dünyadaki güncel durumunu güncel verilerle özetlemektedir.

Bu kitapçık içerisinde yer alan tasarımlar, yazılar, logolar, grafikler de dahil olmak üzere, tüm yazılı ve görsel materyale ilişkin her türlü mali, manevi ve ticari haklar yahut bunları kullanma yetkisi TTGV'ye aittir. Sözü edilen içeriğin kişisel ve ticari olmayan kullanım dışında herhangi bir amaçla kullanılması, kopyalanması, işlenmesi, herhangi bir şekil veya yöntemle, tamamen veya kısmen, doğrudan veya dolaylı, geçici veya sürekli olarak çoğaltılması, kiralınması, ödünç verilmesi, satışa çıkarılması veya diğer yollarla dağıtılması kesinlikle yasaktır. Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5 inci maddesinin ikinci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir.



www.ideaport.org.tr

www.ttgiv.org.tr

TTGV Merkez

CYBERPARK CYBERPLAZA

B Blok Kat: 5-6

Bilkent 06800 ANKARA - TÜRKİYE

+90 312 265 02 72

TTGV İstanbul Temsilciliği

ARI TEKNOKENT Arı 2 Binası A Blok Kat:7

İTÜ Ayazağa Yerleşkesi, Koruyolu

Maslak 34469 İSTANBUL - TÜRKİYE

+90 212 276 75 62

1 Neden Hidrojen?

Sayfa 2

2 Senin Hidrojenin Ne Renk?

Sayfa 3

3 Hidrojeni Nereelerde Kullanıyoruz?

Sayfa 5

4 Hidrojenin Maaliyeti (Renklere Göre)

Sayfa 7

5 Neden Yeşil Hidrojen?

Sayfa 8

6 Hidrojen Stratejileri

Sayfa 10

7 Yeşil Hidrojen Ekonomisi

Sayfa 12

8 Yeşil Hidrojenin Üretimi (Elektrolizörler)

Sayfa 14

9 Hidrojenin Depolanması

Sayfa 18

10 Hidrojenin Taşınması

Sayfa 21

11 Yakıt Pilleri

Sayfa 23

12 Hidrojen Vadileri

Sayfa 26

13 Güvenlik

Sayfa 27

14 Gelecek Hidrojende

Sayfa 29

15 Ülkemiz için Öneriler

Sayfa 35

“İnanıyorum ki suyu oluşturan hidrojen ve oksijen birlikte ya da ayrı ayrı kullanıldığında taş kömüründen daha kuvvetli bir ısı ve ışık kaynağı oluşturacak ve bir gün lokomotiflerin buhar kazanlarını yakmada ve buharlı gemilerin hareketini sağlamada kömür yerine bu gazların sıkıştırılmışı kullanılacaktır.”

Jules VERNE
"Esrarlı Ada"
1874

Neden Hidrojen?



Evrendeki en hafif ve bol bulunan elementtir.



Birçok enerji kaynağından üretilebilir.



Petrol ve dizel kadar güvenli bir yakıttır.



Depolanabilir ve taşınabilir.



Sudan temiz bir şekilde üretilebilir.



Karbon emisyonu olmadan kullanılabilir.



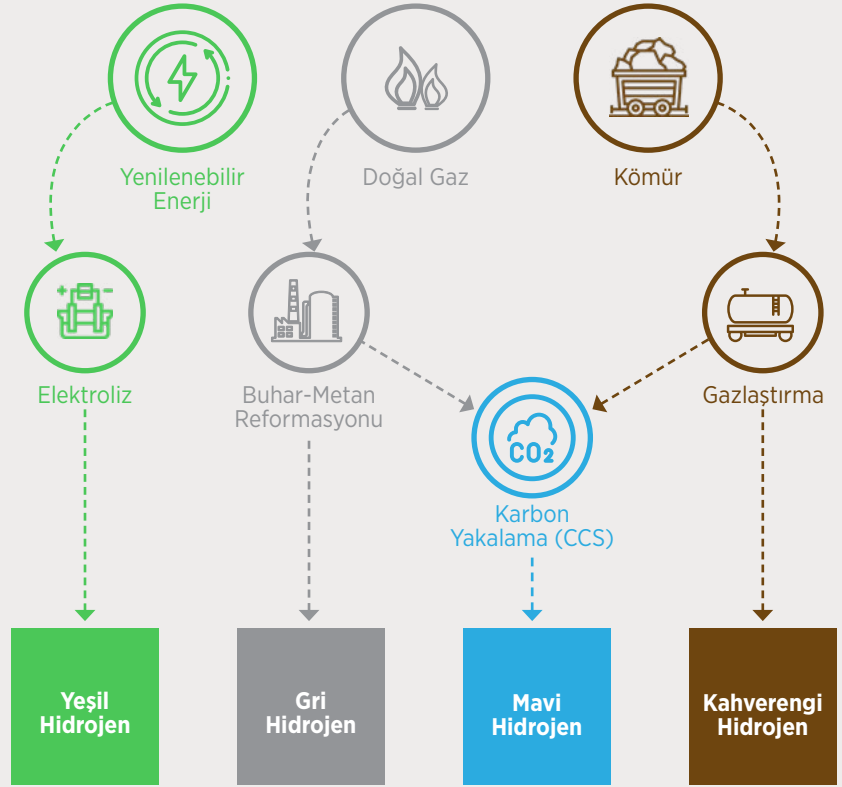
Sıkıştırıldığında petrol, dizel ve bataryalardan daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.



Sıvı ve gaz olarak depolanabilir.

2

Senin Hidrojenin Ne Renk?



Kaynak: Decarbonized Hydrogen in the US Power and Industrial Sectors: Identifying and Incentivizing Opportunities to Lower Emissions, RFF raporu

Hidrojen farklı prosesler ile farklı kaynaklardan üretilmektedir. Üretilen hidrojenin sınıflandırması, kullanılan teknoloji ve yakıt kaynağına göre dört farklı renk kodu ile ifade edilmektedir.

2 Senin Hidrojenin Ne Renk?

Yeşil Hidrojen:

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilen, net sıfır atıklı sürdürülebilir hidrojendir. Üretimi esnasında herhangi bir zararlı emisyon açığa çıkartmaz. Yenilenebilir enerji kullanılarak elde edilen elektrik ve su ile çalışan elektrolizör ile yeşil hidrojen üretilmektedir. (Kasım 2020 tarihi ile)

Mavi Hidrojen:

Doğal gaz veya kömürün ana yakıtlar olarak sırasıyla buhar metan reformasyonu (SMR-steam methane reforming) veya gazlaştırma proseslerinde kullanılması ile elde edilen sentez gazından H_2 'nin saflaştırılarak ayrıştırılması ve ortaya çıkan CO_2 'in karbon yakalama ve depolama (CCS-carbon capture and storage) ile ortaya çıkan gaz karışımından uzaklaştırılmasını içermektedir. Bu tip bir proseste her ne kadar CO_2 oluşmuş olsa da CCS teknolojisi yardımıyla %85-95 oranında azaltılmaktadır. Lakin ayrılan CO_2 'nin taşınması ve depolanması ise ciddi bir sorundur.

Sınırlı kaynakları olan fosil yakıtlara bağlı kalması ve enerji güvenliği hedefleri ve bu yöntem ile hidrojen eldesi sırasında sera gazı (GHG-Greenhouse gas) emisyonlarında pozitif oranda artış olması nedeniyle net sıfır emisyonlara giden yolda yeşil hidrojenin artışını kolaylaştırmak için yalnızca kısa vadeli bir geçiş olarak görülmelidir.

Gri Hidrojen:

Metan gibi fosil yakıtların reformasyon (su-buhar dönüştürücü, ototermal dönüştürücü) prosesi ile üretilmektedir. Fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin safsızlık seviyesi yüksektir ve kullanımdan önce pahalı bir teknik olan basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA-Pressure swing adsorption) ile işlenmesi gerekiyor. PSA; adsorpsiyon, basınç düşürme, rejenerasyon ve yeniden basınçlandırma olmak üzere dört ana kademededen oluşan kompleks bir prosesler bütünüdür. Günümüzde üretilmekte olan H_2 'nin yaklaşık olarak %50'si doğal gazın buharlı parçalanması ile gerçekleşmektedir. Metanın parçalanması ile elde edilen gaz karışımındaki ana CO_2 bileşeninin ayrılmasından dolayı sera gazı emisyonu yüksek olan bir prosestir ve sıfır emisyona ulaşmayı engellemektedir.

Kahverengi Hidrojen:

Kömür, az miktarda oksijen ile ısıtıldığında sentez gazı da denilen hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit, su buharı ve metan karışımı bir ürüne dönüşür. Bu gazlaştırma prosesi sonucunda çıkan hidrojen kahverengi hidrojen olarak adlandırılır ve aynı gri hidrojeninde olduğu gibi hidrojenin kullanımı öncesinde saflaştırma yöntemlerine ihtiyaç duyar. Bu yöntem, daha çok çevre duyarlılığı az ve ucuz kömüre erişimi olan ülkeler tarafından kullanılmaktadır. Bazı kaynaklarda bu yöntemi de gri hidrojen içinde kabul etmektedirler.

Ayrıca bunlara ek olarak;

- Nükleer enerjiden elde edilen elektrik ile çalışan elektroliz yöntemiyle elde edilen hidrojen, pembe hidrojen olarak adlandırılır.
- Turkuaz hidrojen ise; pirolizle doğal gazın içindeki karbonun katı karbona dönüştürülmesi ile oluşur. Turkuaz hidrojen çalışmaları pilot ölçek aşamasındadır.

3

Hidrojeni Nereelerde Kullanıyoruz?



Petrokimya



Amonyak/ Gübre



Sentetik yakıtlar



Metal işleme



Ulaşım



Gıda



Cam

Dünya genelinde, farklı kaynak ve üretim teknikleriyle elde edilen hidrojen; başlıca rafineri, petrokimya, amonyak ve metanol gibi pek çok endüstride ham madde ve yakıt olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Yıllık kullanılan hidrojen miktarı 2005 yılında 40 milyon ton iken, şu anda 100 milyon tonun üzerine çıkmıştır. Örneğin ham madde olarak, petrokimya, gübre, metal ve cam sanayilerinde; amonyak ve margarin elde edilmesinde kullanılırken; yakıt olarak ise elektrik üretimi, ulaşım ve ısınmada kullanılmaktadır. Hidrojen; lojistik, endüstriyel ısı ve ham madde gibi sektörlerde karbondan arındırma ve enerji güvenliği sağlama noktasında önemli bir potansiyele sahiptir.

Otomotiv, kimya, petrol/gaz ve ısı sektörlerindeki endüstri liderleri, düşük karbonlu ve yenilenebilir hidrojeni, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için ciddi bir alternatif olarak görmektedir. Bu konuda en önemli kilometre taşı örneklerden biri olarak kabul edebileceğimiz REFHYNE projesi; rafinerilerde ilk yeşil hidrojen kullanımı amaçlı olup, ITM Power ve Shell'in ortaklaşa gerçekleştirdiği Rhineland fabrikasındaki 10 MW elektrolizör sistemi ile başlamıştır. REFHYNE II projesi ile 100 MW elektrolizör sistemine sahip tesisin 2024 yılında faaliyete geçmesi planlanmıştır. Doğal gazdan hidrojen üretiminden ortaya çıkan CO₂ emisyonları bir rafinerinin toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %15-25'ine karşılık gelmekte olduğu düşünüldüğünde bu tarz projelerin önemi netlik kazanmaktadır. Benzer bir proje olan 89 milyon Euro bütçeli Westküste 100 projesi ise 30 MW elektrolizör sistemi ile başlamıştır. İkinci fazında bu kapasite 700 MW'a çıkacaktır.^[1]

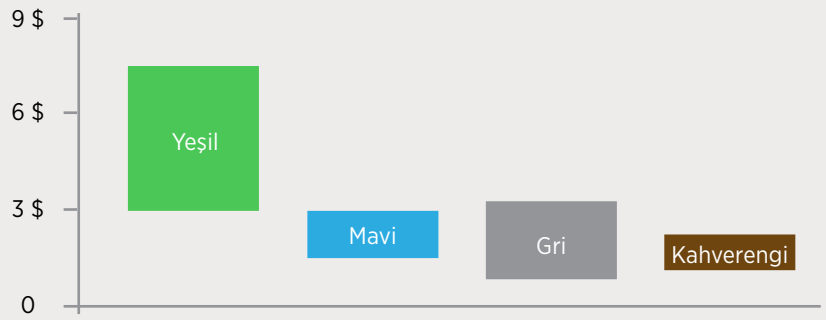
Hidrojen kullanımında rafineri endüstrisini; amonyak ve metan üretimi izlemektedir. Bu konuda, yeşil methanol ve yeşil amonyak üretim çalışmaları/projeleri hızla artmaktadır.

2030/2050 geçişleri sırasında ise; hidrojen yeni kullanım alanları oluşacaktır. İsveç'te 2021 yılında Nel, SSABB, LKAB ve Vattenfall firmalarının ortaklığında ilk kez yeşil çelik üretilmiştir. Bu teknolojinin 2030 yılında ticareleşmesi/ yaygınlaşması planlanmaktadır. Bu sektörün Dünya'daki CO₂ emisyonunun %7'sinden sorumlu olduğu düşünüldüğünde bu gelişmenin de geleceğimiz için önemi çok açıktır.

Hidrojenin enerji sektöründeki kullanımları da; dağıtım/merkezi güç, rüzgar ve güneş enerjisi için mevsimsel depolama, doğal gaz hatlarına karıştırılarak kullanılması ve yakıt hücreleri sayesinde ulaşımda kullanılmaya başlanması gibi konular son yıllarda ortaya çıkmış olup, 2050 yılında, 2020 yılına göre 10 kat artması beklenen hidrojen talebini artıracak sektörlerden olacaktır.^[2-3]

Hidrojenin Maliyeti

1 Kg Hidrojenin Üretim Maliyeti



Kaynak: IEA: 2018 The future of hydrogen raporu

- 2018 yılında; rafineri endüstrisinde yıllık 38,2 milyon ton, amonyak üretiminde ise yıllık 31,5 milyon ton hidrojen tüketilmiştir. Diğer endüstrilerde kullanılan 4,2 milyon ton saf hidrojen ile beraber hidrojen tüketimi yaklaşık yıllık 74 milyon tona ulaşmıştır.
- Bu değer 2020 yılında ise 100 milyonu geçmiştir. Lakin bunun sadece %5'i yeşil hidrojen olup geri kalanı fosil kaynaklıdır.
- Bunun en önemli sebebi yeşil hidrojenin üretiminin diğerlerine göre daha pahalı olmasıdır. Fakat artan doğal gaz fiyatları yüzünden Eylül 2021'de İngiltere'de doğal gazdan elde edilen hidrojenin kg fiyatı 8\$'a çıkarak ilk kez yeşil hidrojeni geçmiştir. Şubat 2022 sonu ile başlayan Rusya- Ukrayna savaşı ile birlikte artan doğalgaz fiyatları ile gri hidrojen yeşile göre her gün daha pahalı hale gelecektir.
- Yeşil hidrojenin maliyetinin yaklaşık olarak %70'i elektrik fiyatlarına bağlıdır. Yenilenebilir enerjideki maliyetler, son 10 yılda %80 azalmıştır. Bu maliyetler geriledikçe yeşil hidrojenin de fiyatları azalmaya devam edecektir.^[4]



Neden Yeşil Hidrojen?

55
kat

Elektrolizör kapasitesinin 2015-2025 arasındaki büyümesi

66
ülke

Sıfır karbon emisyonunu 2050 hedefi olarak kabul etti

10
yıl

Dünya'nın 1,5 °C ısınması için kalan süre

%80

2010'dan beri yenilenebilir enerji ücretlerindeki düşüş

419
milyar
€

AB ülkelerinin son 40 yılda aşırı hava olayları yüzünden harcadığı para

7
milyar
€

İklim değişikliği yüzünden olan sel ve orman yangınları sebebiyle her yıl AB'de oluşan ekonomik kayıp

%18

2050'de toplam enerji talebinin hidrojen tarafından sağlanacak kısmı

30
milyon
kişi

Hidrojen teknolojilerinde 2050 yılında oluşacak yeni iş olanakları

2.5
trilyon
\$

2050 yılında olacak hidrojen teknolojilerindeki yıllık satış miktarı

6
Gt

2050 yılındaki yıllık CO₂ azaltım miktarı

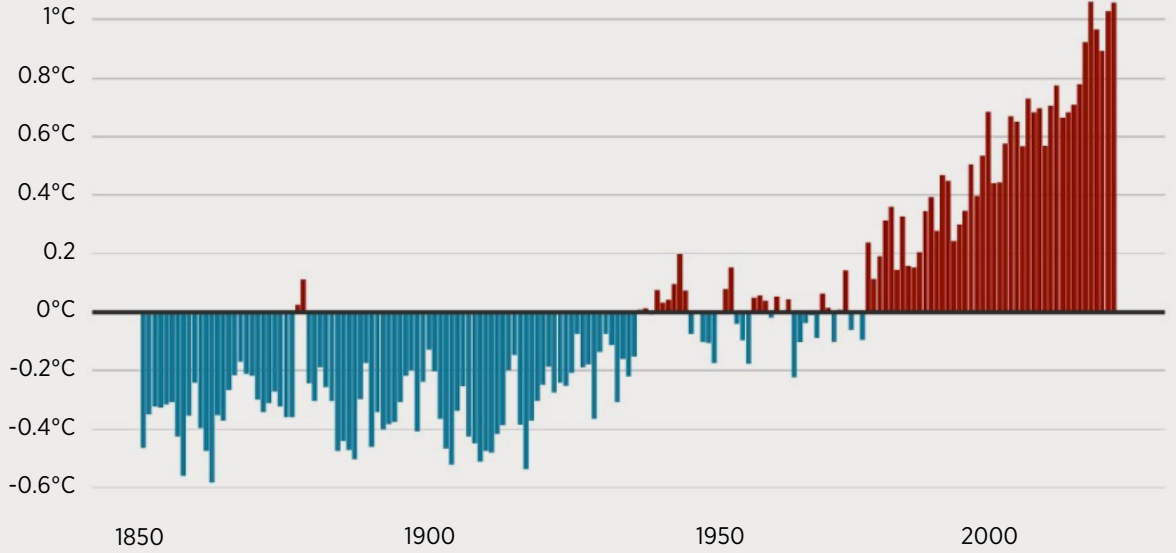
346
bin

AB'de geçen yıl hava kirliliği kaynaklı hastalıklardan ölen kişi sayısı

%80

Dünyadaki sera gazı emisyonunda enerji sektörünün payı

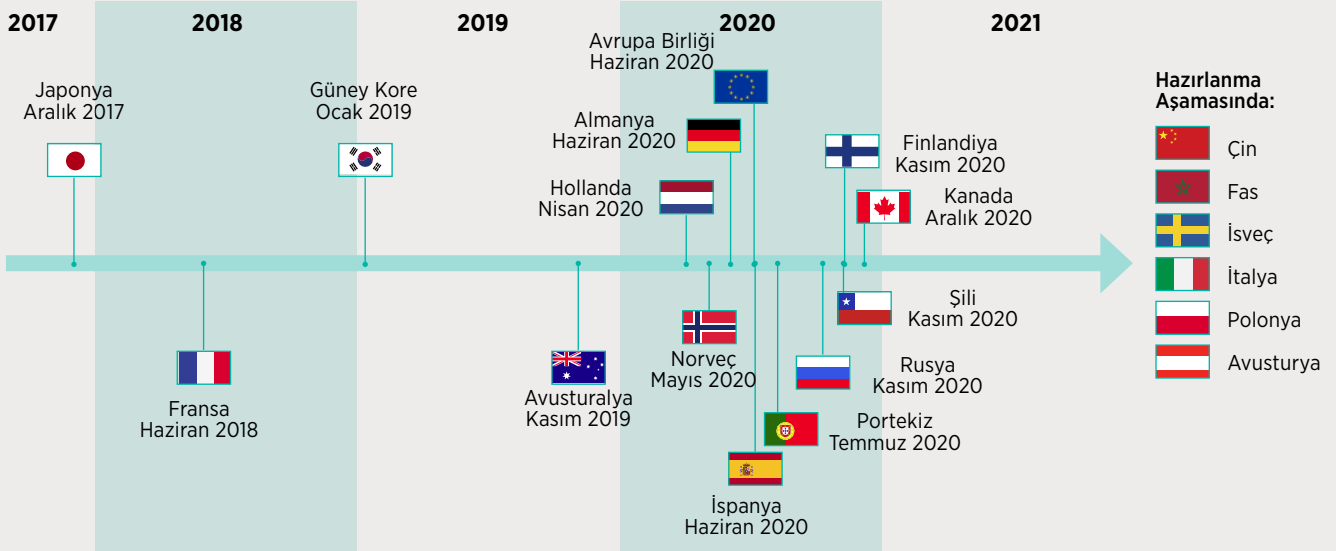
5 Neden Yeşil Hidrojen?



Kaynak: <https://www.bbc.com/news/science-environment-24021772>

- Dünya, sanayi öncesi döneme göre yaklaşık 1,0°C ısınmıştır. Bu durum; kuraklık ve seller gibi aşırı hava olaylarına ve deniz seviyesinde yükselmeye sebep olmaktadır.
- Sera gazı emisyonları mevcut şekilde devam ederse, küresel ısınma 2030'da, sürdürülebilir kalkınma ve yaşam döngüsü için kritik öneme sahip 1,5 °C'yi geçecek.
- Bu sınırı geçmemek için küresel emisyonları 2030 yılında 2010 yılına göre %55 azaltmak ve 2050 yılında net sıfır emisyonu ulaşmak gerekmektedir.
- Bu yüzden, tarım, enerji, sanayi, yapı, ulaşım ve şehirlerde "hızlı ve geniş kapsamlı" dönüşümler gerekli olup; karbon yoğun ekonominin yerini temiz hidrojenin yoğun olduğu ekonomi almalıdır.^[5-6]

Hidrojen Stratejileri



Güncel Hidrojen Stratejilerine Göre Ülkelerin Ana Hedef Sektörleri

Hidrojen Kullanan Sektörler:	AB	Almanya	Hollanda	Fransa	İspanya	İtalya	Birl. Krallık	Norveç	İsviçre	Ukrayna	Rusya	Japonya	Kore	Çin	Avustralya	Kaliforniya	Fas
Endüstri	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓
Güç	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ulaşım	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Yapılar	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
İhracat	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓

✓ Ana sektör ✓ İkincil Odak Alanı ✗ Odak alanı değil

Kaynak: INTERNATIONAL HYDROGEN STRATEGIES: A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany September 2020

Dünya’da ilk hidrojen stratejisini (2017) açıklayan ülke Japonya’dır. Bunu, Fransa ve Güney Kore takip etmektedir. Bu üç ülke Dünya’daki en büyük 4 hidrojen ekonomisi arasında yer almaktadır.

International Energy Agency (IEA)’nin 2019 yılındaki The Future of Hydrogen raporu gelecek birçok strateji/yol haritasının önünü açtığı için oldukça önemlidir. Bu raporda;

- Hidrojenin; enerji endüstrisinde çok amaçlı bir enerji taşıyıcısı olacağı
- Uluslararası hidrojen ekonomisinin kurulacağı
- Hidrojen değer zincirinin başarıya ulaşması için partnerliklerin çok önemli olduğu
- Hidrojen ekonomisinin oluşması için regülasyonların çerçevesinin belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Dünya Enerji Konseyi’nin Almanya şubesinin Eylül 2020’de çıkarttığı raporda; 56 ülkenin yayınlanmış ve taslak halindeki hidrojen stratejileri, erken dönem yol haritalarını yayınlanmıştır. Rapor; Japonya, Almanya ve Güney Kore hidrojeni daha çok kullanmayı hedeflerken; Avustralya, İspanya, Orta Doğu ülkeleri ve Ukrayna ise hidrojeni üretip diğer ülkelere ihraç etmeyi planladıklarını göstermektedir. Sektöre göre değerlendirildiğinde Japonya ve Güney Kore’nin evlerdeki ısıtma dahil olmak üzere tüm sektörlerde hidrojeni aktif olarak kullanmayı planlamışlardır.

Hydrogen Council: Hydrogen Insights 2021 raporuna göre; şu ana kadar dünyadaki gayrisafi milli hasılanın (GSMH) %73’ünü elinde tutan 31 ülkenin hidrojen stratejilerini resmi olarak açıkladığını söylemektedir. Karbon vergisi/ ücretlendirmesini kabul eden ülke sayısı 49 olup bu da GSMH’nin yaklaşık %80’ine denk gelmektedir. 2050’deki net sıfır hedefini kabul eden ülkelerin sayısı 75 olsa da, GSMH’nin sadece yüzde 50’sine denk gelmektedir.^[7-8]

Karbon Vergisi

Karbona Biçilen Fiyat

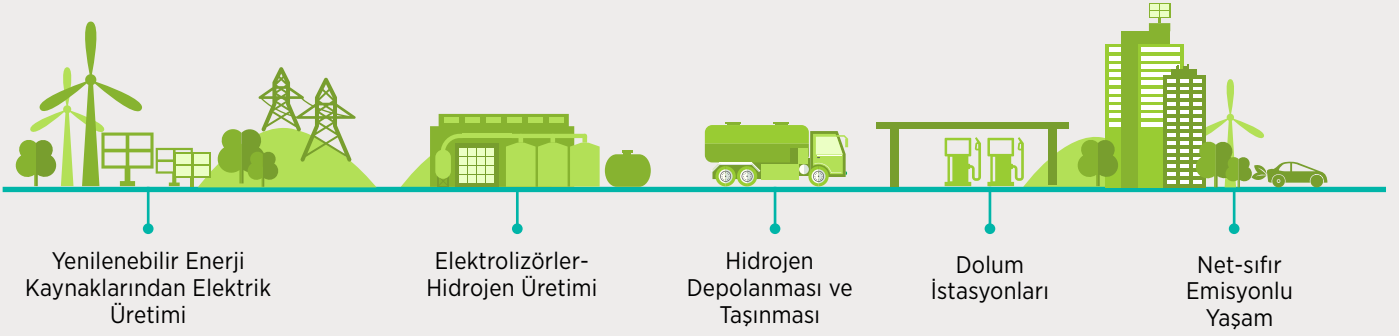
Avrupa Birliği’nin (AB) “2050’de Karbon Nötr İlk Kıta” olma hedefiyle hazırladığı Sınırdaki Karbon Uygulaması, 14 Temmuz 2021’de onaylandı ve karbon emisyonunun düşürülmesi yönünde önemli bir vergi regülasyonu hayata geçirilmiş oldu. 2023’te başlatılacak sistemde, 2026’dan itibaren AB’ye ihraç edilen ürünler için üretim sürecinde salınan sera gazı tonu başına vergi alınacak.

Karbon vergisi; şu ana kadar yaklaşık 46 ülkede ve 28 eyalette/kentte halihazırda hayata geçirilmiş bulunuyor. Karbon için biçilen fiyat aralığı (1-127 \$/ton CO₂), küresel olarak dalgalanma göstermektedir. Verginin miktarı sektörler ve ülkelere göre değişim göstermektedir. Vergi hesabı konusunda farklı metotlar olmakla beraber; sera gazı emisyonunun karbon fiyatı (30-50 €) ve ihraç edilen ürün tonu ile çarpılmasıyla hesaplanacak.

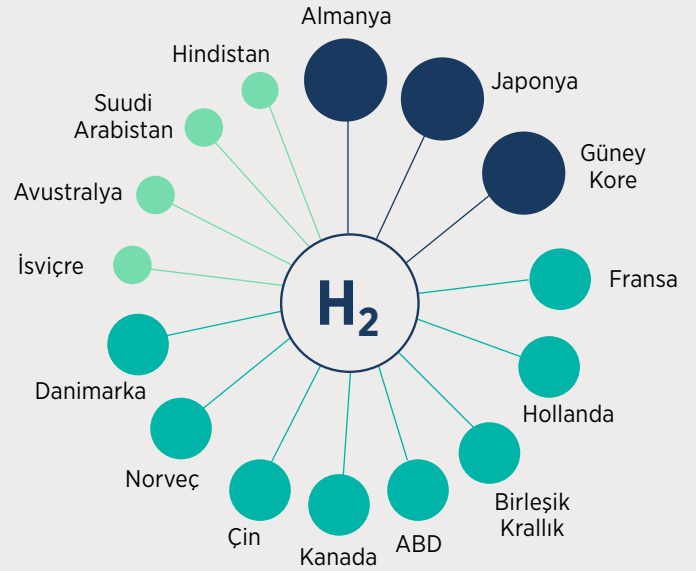
Vergi Yükümlülüğü = Emisyon x Ürün (Ton) (x Karbon Fiyatı)

TÜSİAD’ın çalışmalarına göre bu yeni kanun ile birlikte AB’ye en çok ihracat yapan ülkeler arasında 6. sırada yer alan Türkiye’yi ağır sorumluluklar bekliyor. Karbon fiyatının 30€/ton olduğu senaryolarda, Türkiye’nin AB’ye yıllık 1,074 milyar € ödemesi gerekirken, ton başına alınan verginin 50€ olması durumunda ise tahmin edilen rakam 1,777 milyar € olacaktır. Bu vergi yükümlülüğünden en çok çimento sektörü etkilenecek ve onu elektrik, demir-çelik ve gübre sektörleri takip edecektir.^[9-10-11]

Yeşil Hidrojen Ekonomisi



Bugün itibariyle hidrojen enerjisinin büyük bir kısmı fosil yakıtlar kullanılarak üretiliyor; ancak Dünya'nın ısınmasını 1,5°C ile sınırlamak için acil olarak yeşil hidrojen ekonomisine geçmemiz gerekmektedir. Özellikle elektrifikasyonun zor olduğu veya yeterli olmadığı sektörleri (taşımacılık, petrokimya ve demir-çelik gibi) hidrojen ile karbonsuzlaştırmak mümkündür. Bu hidrojen ekonomisini oluşturan, üretiminden son kullanıcıya kadar olan değer zincirindeki tüm halkalar, yeşil hidrojen ekosistemi olarak da adlandırılır. Burada temiz hidrojenin eldesi, taşınması, saklanması ve son kullanıcı tarafından kullanılması basamakları vardır. Temiz yani yeşil hidrojen ekosisteminde, nükleer enerjinin yeşil olup olmadığı halen tartışma konusudur. Bu yüzden öncelikli olarak, rüzgar ve güneş enerjisi ile üretilen temiz elektrik, elektrolizör yardımıyla suyu parçalar ve saf hidrojen ile saf oksijen elde edilmesi sağlanır.



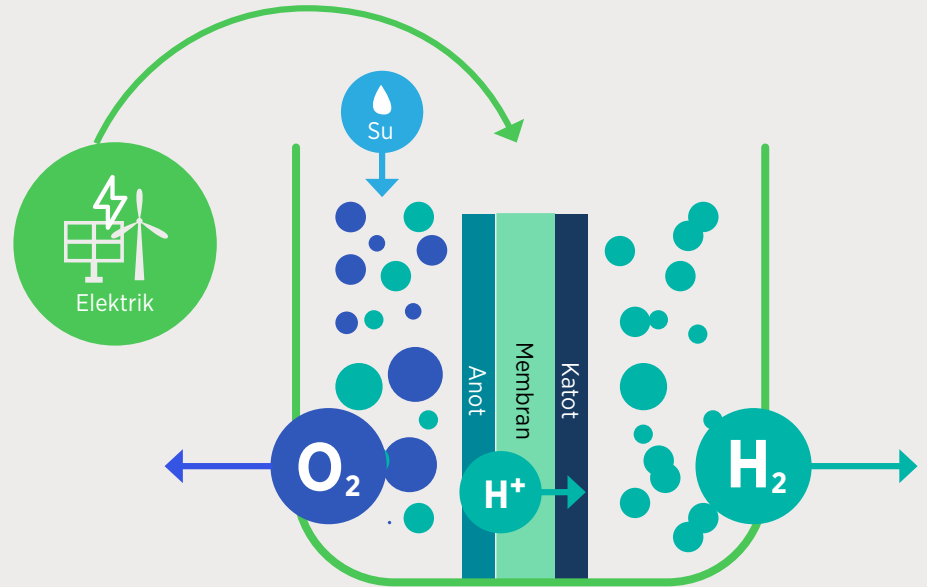
Elektrolizörler yerinde hidrojen dolum istasyonlarının/fabrikalarının yanına da kurulabilir böylece taşınması ve depolanmasına gerek kalmaz. Diğer seçenek olarak ise saha dışında kurulan elektrolizörden çıkan elektrolizör depolanır ve taşınır. Depolanması konusunda tuz kavernlerinde ya da basınçlı tanklarda saklama seçeneklerine gidilebilir. Hidrojenin depolanması sonrasında, son kullanıcılara aktarılması için taşınması gerekir. Burada farklı çözüm alternatifleri vardır. Bu alternatifler; doğal gaz hattına karışım için verilmesi, sıvılaştırılarak deniz ve kara yolu ile taşınması, basınçlı tanklar ile yüksek basınç altında taşınması ve amonyak formunda taşınması olarak özetlenebilir. Taşınan hidrojen ise son kullanıcıya iletilir. Bu hidrojen; ısınma, rafinerilerde, metanol ve amonyak endüstrisinde, yakıt pili kullanılarak elektrik üretimi ve ulaşımda kullanılmaktadır. Yeşil hidrojen ekosistemi sadece gezegenimizi 1,5°C ısınma seviyesinde tutmak konusunda değil, hava kalitesinde iyileşme ve enerji güvenliğini artırmaya da yardımcı olabilmektedir.

Bloomberg'in yaptığı ve güncel verilerle sürekli güncellediği araştırmaya göre günümüzde en büyük hidrojen ekonomisine sahip ülke Almanya'dır. Hidrojeni geleceğin sürdürülebilir enerjisi yapmak amacıyla 9 milyar Euro'luk yatırım yapmayı planlamışlardır. Almanya'yı Japonya, Kore ve Fransa izlemektedir. Japonya 2030 yılına kadar hidrojen ithalatı planlamakta ve 2030'dan itibaren, uluslararası hidrojen tedarik zincirlerini genişletmeyi ve büyük ölçekli hidrojen enerjisi üretimini hedeflemektedir. Böylece, büyük bir hidrojen ekosistemi oluşturmayı planlamaktadır. Japonya, Kore ve Fransa'nın; hidrojen stratejilerini açıklayan ilk üç ülke olduğunu unutmamak gerekir.^[12-13]



8

Yeşil Hidrojenin Üretimi (Elektrolizörler)



Su ve elektrik harcanarak, PEM elektroliz yöntemiyle hidrojen eldesi

Karbonsuzlaşma hedefleri ve hidrojene geçiş planları ile birlikte elektrolizörlere olan ilgi artmaya başlamıştır.

Yeşil hidrojen, elektroliz yoluyla üretilir ve suyu hidrojen ve oksijene ayırır. Elektrolizörler elektrolit ve çalışma sıcaklığına göre başlıca alkali, polimer elektrolit membran (PEM), anyon değişim membran (AEM) ve katı oksit (SOEC) olmak üzere dört grupta ele alınmaktadır. Bu elektrolizörlerden, alkali ve polimer elektrolit membran elektrolizörler ticari olarak üretilirken, anyon değişim membran ve katı oksit elektrolizörler henüz laboratuvar ölçeğindedir. Öte yandan, özellikle AB'nin "Green Deal" destekleri bu iki teknolojiyi de geliştirmek konusunda süreci hızlandırmaktadır.

8 Yeşil Hidrojenin Üretimi (Elektrolizörler)

Su elektrolizöründe alkali elektrolizörler PEM'e göre daha yaygın kullanılsa da, yakın gelecekte PEM tipi elektrolizörlerin alkali sistemlerin önüne geçmesi beklenmektedir.

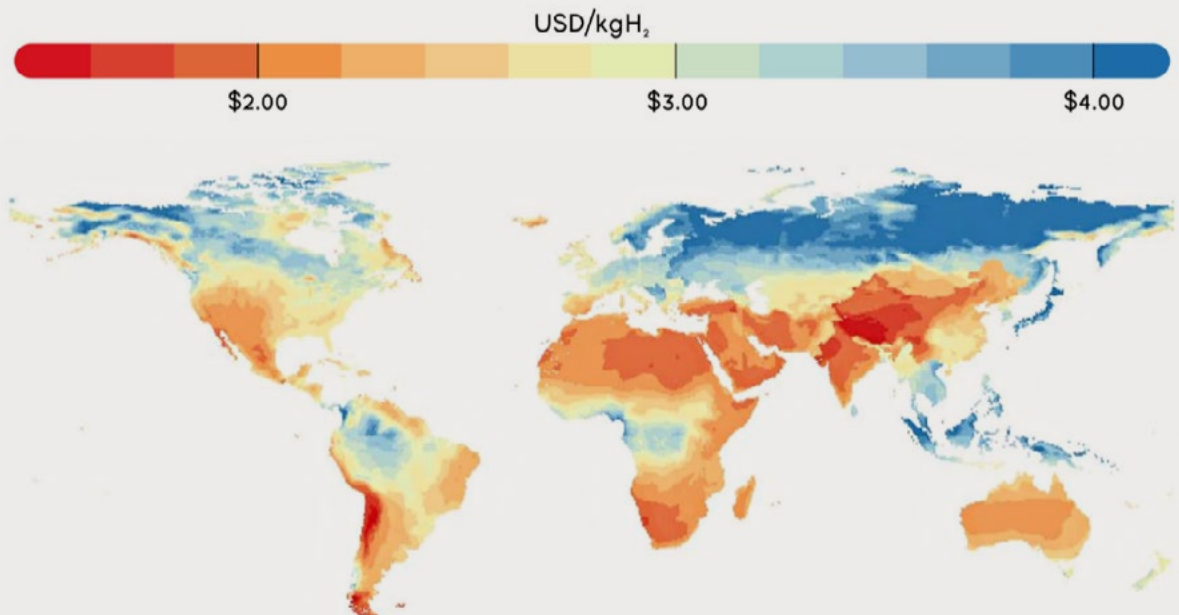
Günümüzde elektrolizörlerin teknolojisine bağlı olarak verimliliği %60-85 arasında değişmektedir.

Alkali elektroliz, en eski hidrojen üretim yöntemi olup endüstriyel olarak en geniş kapsamlı kullanım alanına sahiptir. Ancak üretilen hidrojenin saflık derecesi PEM, SOEC ve AEM elektroliz yöntemine göre daha düşüktür. PEM ve alkali elektrolizör arasındaki başlıca fark; PEM yöntemi ile yüksek akım yoğunluklarında, hızlı hidrojen üretiminin ve daha yüksek hidrojen saflığının elde edilebilmesidir. AEM teknolojisi, alkali ya da PEM tipi elektrolizörlere göre hem çeşitli avantajlara sahiptir hem de üretim maliyeti PEM ile kıyaslandığında düşüktür ama henüz tam olarak ticari olamamıştır. Çalışma sıcaklıkları 700-900 °C aralığında oldukça yüksek olan katı oksit elektrolizör teknolojileri de ticarileştirilmeye çalışılmaktadır.

Avrupa Birliği, açıkladığı hidrojen stratejisinde, 2030 yılına kadar elektrolizör kapasitesini 40 GW'a yükselteceğini açıklamıştır. Buna ek olarak; Avrupa Birliği'nin yeşil hidrojen ithal edebileceği Ukrayna ve Orta Doğu ülkelerinde ek bir 40 GW elektrolizör kapasitesi oluşturacağını açıklamıştır. AB HORIZON 2020 projeleri kapsamında elektrolizörlere ait 38 projeyi desteklemiş olup, bu projeler için 135 milyon avro bütçe sağlamıştır.

Güneş panelleri ve karaüstü rüzgar türbinleri kullanarak elde edilecek yeşil hidrojenin 2050 yılındaki kg başına üretim maliyeti (\$) grafiğine bakıldığında, ülkemizin temiz hidrojen ihracatçısı olabilme potansiyelinin çok yüksek olduğu görülmektedir.

Denizüstü rüzgar türbinleri ve deniz suyunu kullanarak çalışan elektrolizörler Avrupa'da kullanılmaya başlanmıştır. İngiltere'deki H100 Fife projesi ile denizüstü rüzgar türbinlerindeki elektrik enerjisi; karadaki elektrolizöre taşınıp, burada depolanıp, ardından da hidrojen hattı ile evlerin ısıtılması için kullanılmaya başlanmıştır.^[14-15-16-17]



Kaynak: IEA, The Future of Hydrogen raporu, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

8 Yeşil Hidrojenin Üretimi (Elektrolizörler)

Gri hidrojen üretim maliyeti yaklaşık 1,5 \$/kg'dır. Şu anda 800 \$/kW'a sahip bir elektrolizör ile elde edilen yeşil hidrojenin maliyeti 3,5-4,5 \$/kg seviyesindedir.

Elektrolizör teknolojisindeki gelişmeler ile yatırım maliyetlerinin 200 \$/kW'ne düşmesi ve yenilenebilir elektrik fiyatlarının 20 \$/MWh değerine inmesi ile karbon emisyonu sıfır olan yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin 1,3 \$/kg olması öngörülmektedir. Elektrolizör yatırım maliyetlerinin 100 \$/kW'a ve elektriğin ise 10 \$/MWh'a düşmesiyle; sadece %40 kapasite ile çalışan bir elektrolizörle bile 1 \$/kg seviyesi zorlanabilmektedir. Yenilenebilir hidrojen üretim maliyetlerinin en büyük faktörü olan yenilenebilir elektrik maliyetleri (yaklaşık %70'i), son on yılda %80'lik bir düşüş yaşamıştır. Yenilenebilir elektrik için maliyet düşüşünün devam etmesi beklenmektedir. Aynı zamanda, 2000-2019 yılları arasında kümülatif olarak sadece 50 MW olan elektrilizör kapasitesi, 2019-2025 arasında bitmesi beklenen projelerle beraber 900 MW kapasitesine ulaşacaktır. Böylece elektrolizör yatırım maliyetlerinde de ciddi düşüşler olacaktır.

PEM tipi elektrolizörlerde 1 kg hidrojen üretimi için 9 kg saf su gerekmektedir. Fakat verimsizliklerle birlikte 18-24 kg su ihtiyacı çıkmaktadır. %75 verimle 8000 saat çalışan 1 GW'lık bir elektrolizör tesisi, yıllık 0,15 milyon ton hidrojen üretimi yapmak için, 3 milyon ton su tüketmektedir ki bu miktar yaklaşık 70 bin nüfuslu bir yerleşim yerinin su tüketimine eşittir. Bu yüzden hidrojen ekonomisine geçişte atık suların saflaştırılması konusu oldukça önemlidir.^[19-20]

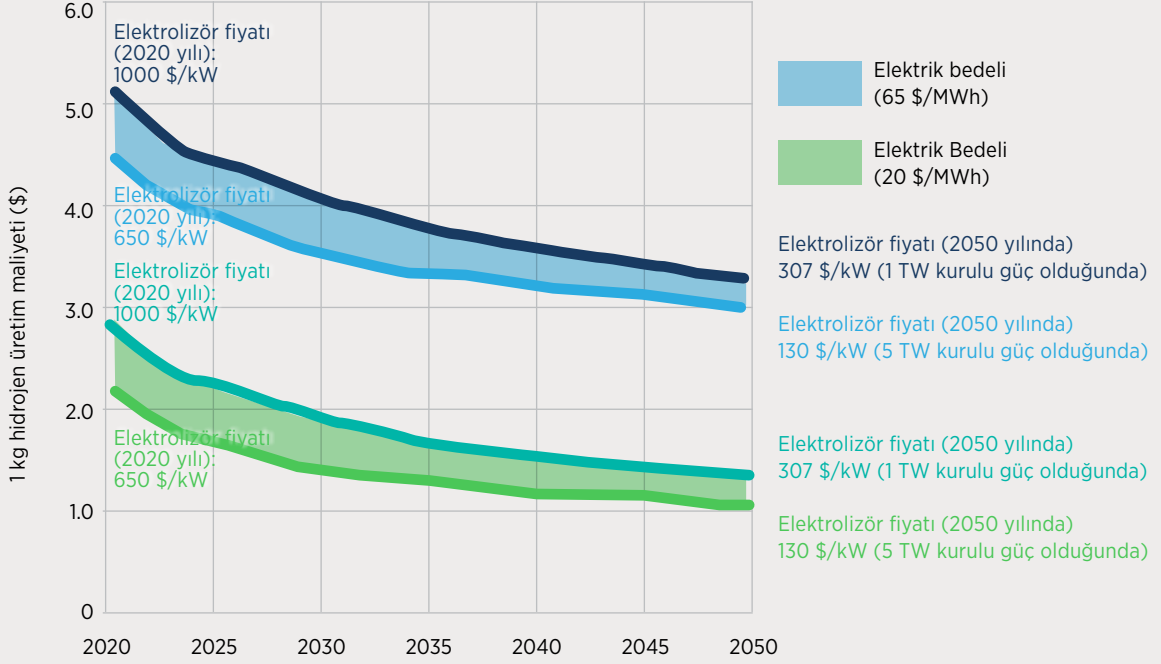


<https://www.ntv.com.tr/galeri/teknoloji/nasanin-moxie-araci-marsta-oksijen-uretti-kizil-gezegenin-kolonilestirilmesi-icin-tarihi-adim,OQuJMGdHUkiEzZGKcqbuvQ/aWwR-Vv2F0SbkVgeQVUiA>

Elektrolizörler için en yenilikçi uygulama ise, Perseverance'in içindeki MOXIE (The Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment) projesi sonucu Mars'a götürülen katı oksit elektrolizör ile olmuştur. Elektrolizörler sadece saf hidrojen değil bunun yanında saf oksijen de ürettiği için Mars yüzeyinde oksijen üretmek amacıyla kullanılmıştır.^[18]

8 Yeşil Hidrojenin Üretimi (Elektrolizörler)

Hidrojenin Maliyeti



IRENA (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Enerji Ajansı), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, 2020,

Hidrojen Mevzuat Eksikliği

Türkiye kurulu güç olarak;

- Rüzgar enerjisinde Dünya’da 13., Avrupa’da 7.;
- Güneş enerjisinde Dünya’da 16., Avrupa’da 8.;
- Jeotermal enerjide Dünya’da 4., Avrupa’da ise 1. sırada yer alıyor.

Hem sahip olduğu altyapı hem de jeopolitik konumu sebebiyle yeşil hidrojen üretimi için oldukça avantajlı bir noktada olan ülkemizin, henüz bir hidrojen mevzuatı ya da hidrojen yol haritası bulunmamaktadır.

Avrupa’nın yeşil hidrojen ihtiyacını karşılama potansiyelini barındırması, ülkemizi enerji ithalatçısı konumundan ihracatçısı konumuna çıkartabilecektir.^[21]

9

Hidrojenin Depolanması



Hidrojenin birim kütle başına enerji kapasitesi yüksek olmakla birlikte (120 MJ/kg), hacimsel olarak değerlendirildiğinde hidrojenin enerji içeriği 8 MJ/L seviyesine düşmektedir ve kullanılacağı yerde depolanması hidrojenin enerji taşıyıcı olarak kullanımında en kritik sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon malzemelerde veya kimyasal olarak çeşitli hidrürler şeklinde depolanabilmektedir.^[22]

9 Hidrojenin Depolanması

Yeraltında Depolama

Hidrojen gazını depolamanın en ucuz yöntemlerinden biri, doğal gaza benzer şekilde yeraltında, tükenmiş petrol veya doğal gaz rezervuarlarında depolanmasıdır. Maliyeti biraz yüksek olan bir depolama şekli ise, maden ocaklarındaki mağaralarda saklanmasıdır.

Sıvı Depolama

Hidrojeni -253 °C'de sıkıştırarak sıvılaştırmak, enerji kaybı görece yüksek olan bir prosestir. Gaz halinde sıkıştırma işlemine göre (%10) 4 kata kadar daha fazla enerji sarfiyatına neden olabilmektedir (%40). Sıvı hidrojenin diğer büyük dezavantajı, kaynama kaybı ile süper yalıtımlı kriyojenik kaplara ve soğutmaya ihtiyaç duyulmasıdır. Sıvı hidrojenin temel avantajı, nispeten düşük basınçlarda ulaşılabilen yüksek depolama yoğunluğudur.

Gaz Depolama (Sıkıştırma ile Depolama)

Hidrojen genellikle gaz halinde ve en yaygın olarak da yüksek basınca (350-700 bar) dayanıklı kompozit tanklarda sıkıştırılarak depolanmaktadır. Yüksek verimli bir hidrojen taşıma ve depolama alternatifidir. Sıkıştırma işlemi sayesinde birim hacimde depolanabilen enerji miktarı yükselmektedir. Hidrojenin depolanmasında kullanılacak depo malzemeleri yüksek dayanımlı olmalı, hafif olmalı ve hidrojenle reaksiyon vermemelidir. Ulaştırma, havacılık ve diğer endüstrilerdeki ihtiyaçlar kompozit tankların gelişimini hızlandırmıştır.

Metal Hidrürler

Metal hidrürler düşük emilim/salım sıcaklıkları, yüksek hacimsel enerji yoğunluğu, döngüsel kullanılabilirlik, hızlı reaksiyon kinetiği ve güvenlik gibi avantajları sebebiyle bir diğer potansiyel hidrojen depolama araçlarıdır.

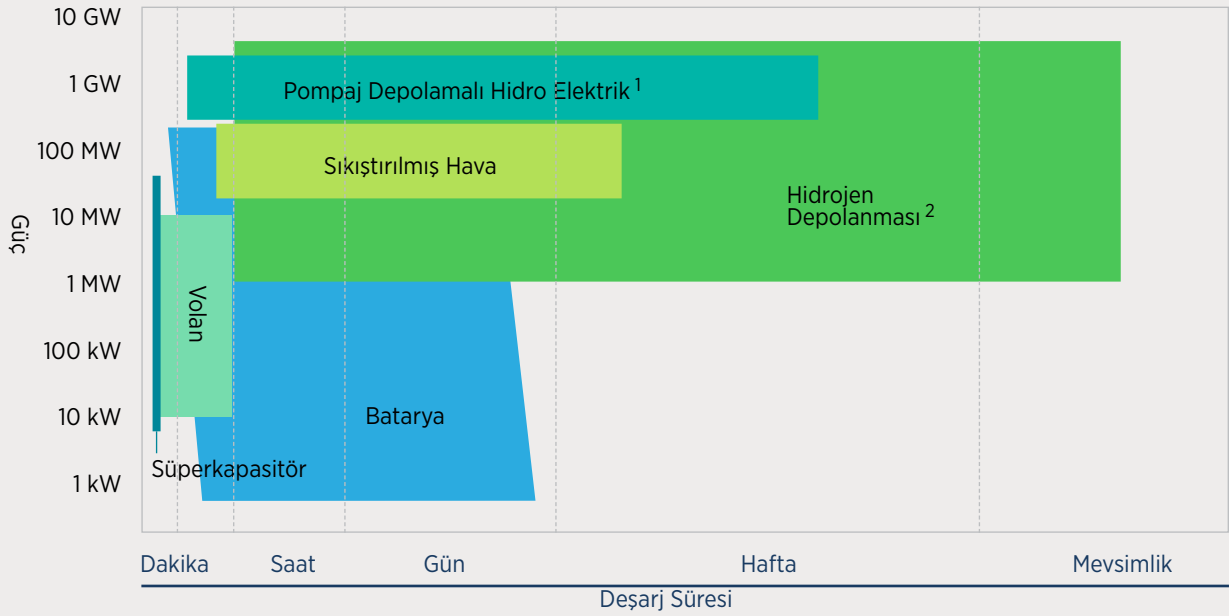
Kimyasal Hidrürler

Kimyasal hidrürler; metal hidrürler gibi hidrojeni kimyasal olarak bağlamaktadır. Başlıca avantajı, dehidrojenasyon ve hidrojenasyon süreçleri sırasında ısı ve kütle transferinin yanı sıra taşınmalarını ve depolanmalarını basitleştirmesidir. Bor esaslı bir kimyasal hidrojen depolama bileşiği olan sodyum borhidrür (NaBH_4), kütlece %10,6 hidrojen depolayabilmektedir ve yanıcı/patlayıcı değildir.

Karbon Malzemeler ve Cam Küreler

Karbon temelli nanotüp ve grafit lifleri gibi yüksek yüzey alanına sahip malzemelerde hidrojen adsorpsiyon ile depolanmaktadır. En büyük dezavantajı maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır.

9 Hidrojenin Depolanması



1) Limitli kapasitede

2) Hidrojen veya sentetik doğal gaz olarak

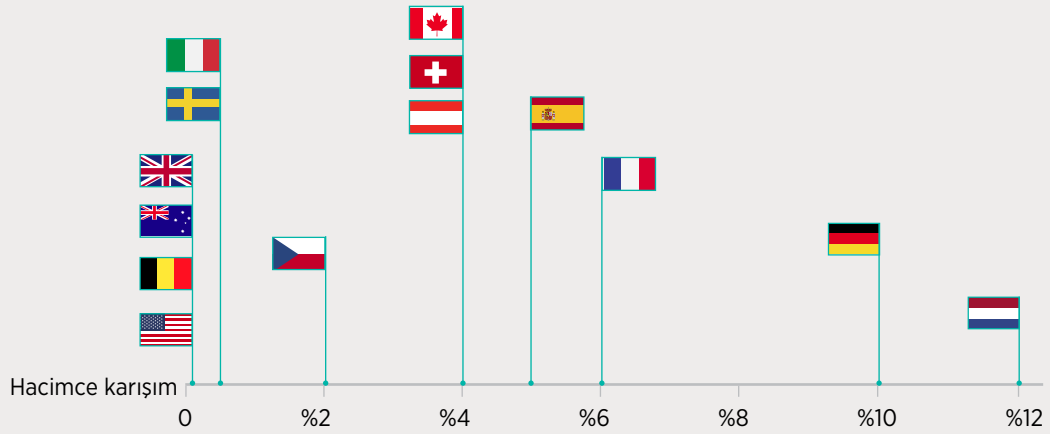
Kaynak: IEA Energy Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak en büyük avantajı, diğer enerji depolama sistemleri ile karşılaştırıldığında, uzun süreler enerji değerini kaybetmeden depolanabilmesidir. Özellikle, doğanın tabiatı yüzünden olan gün içi ve mevsimsel farklılıkları olan rüzgar ve güneş enerjisinin; dalgalanmalarını ve dolayısıyla artık enerjisini en aza indirme konusunda hidrojen oldukça önemli bir enerji taşıma aracıdır.



Hidrojenin Dağıtımı

Boru Hatları



Kaynak: The role of Hydrogen and Fuel Cells in the Future Energy Systems (2017) DOI: 10.13140/RG.2.2.28890.13762.

Doğal gazla belirli oranlarda hidrojen karıştırılması, birçok ülkede hâlihazırda hizmet veren doğal gaz şebekelerini aktif olarak kullanmaya devam etmek ve karbon salımını azaltmak için uygun bir stratejidir. Bu konu ile ilgili birçok pilot çalışma sayesinde Avrupa'daki ülkelerde doğal gaz karıştırma oranları çıkartılmıştır. En güncel proje olarak; Keele Üniversitesi'nde 2 yıl süren HyDeploy projesi ile İngiltere'deki hatlara %20 hidrojen karıştırılarak çalışabileceği gösterilmiştir. Yaklaşık 26 ülkede farklı oranlarda çalışmalar devam ederken, AB'nin ana hedefi 2040 yılında doğal gaz boru hatlarında tamamen hidrojen taşımadır. Bu yüzden, 2020'nin Temmuz ayında, 23 Avrupa gaz altyapı şirketinden oluşan bir grup, 2040'a kadar yaklaşık 39,700 km'lik "Avrupa Hidrojen Omurgası İnisiyatifi" isimli Avrupa'daki gelecek hidrojen arz ve talep merkezlerini birbirine bağlayacak olan özel bir hidrojen boru hattı ağı oluşturma planlarını kamuoyuna sunmuştur. Bu omurga içindeki boru hatları %75'i hâlihazırda doğal gaz borularının dönüşümünden olan boru hattından oluşurken, %25'i yeni hidrojen boru hatlarından oluşmaktadır. AB ülkelerindeki sanayi kümeleri Kuzey Denizi'ndeki ve İspanya'daki artık yenilenebilir elektrikten yeşil hidrojen üretebilen rüzgar çiftlikleri ve güneş panel tarlaları bu hidrojen omurgası içinde yer almaktadır. Ayrıca bu raporda; Türkiye'den geçen TANAP da hidrojen ithalat boru hatları arasında yer alıyor. Bu omurga için yatırım bedeli 43-81 milyar € olacaktır fakat bu Avrupa'nın genel enerji dönüşümünün yanında düşük bir değer durumundadır. Avrupa'nın içinde hidrojenin aktarım bedeli 1000 km için 0,11-0,21 €/kg olacaktır.

10 Hidrojenin Dağıtımı

Amerika'da ise benzer bir proje olarak; Amerikan Enerji Bakanlığı (DOE)'nin; 20 partneri, 15 milyon dolar fonlayarak başlattıkları HyBlend projesidir. Buna ek olarak, Dünya çapındaki 4500 km'lik halihazırdaki en büyük hidrojen boru hatları da ABD'de bulunmaktadır.^[23-24]

Türkiye'de; GAZBİR-GAZMER tarafından yürütülen Cleangas Türkiye isimli, hidrojenin doğal gaz boru hatlarına %20'ye kadar karıştırılması projesi Konya'da devam etmektedir. Yapılan ön araştırmalar doğal gaz hattında büyük değişiklikler yapılmadan %20'ye kadar hidrojen enjeksiyonunun mümkün olabildiğini göstermektedir.^[25]

Hidrojen Dolum İstasyonları



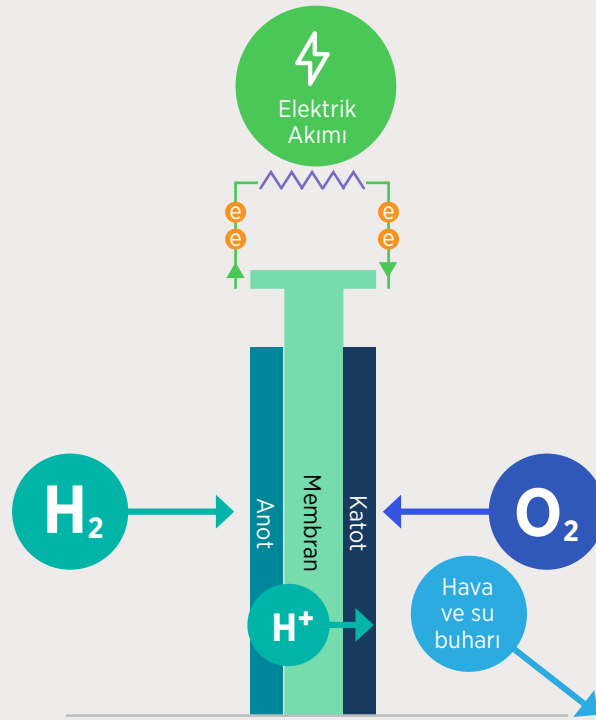
Hidrojenin dağıtımındaki bir diğer yöntem de hidrojen dolum istasyonlarını kullanmaktır. Yakıt pili ile çalışan Mirai'nin 3 dakikalık tek bir dolum ile 1360 km gittiği düşünülürse; şu andaki hidrojen dolum tesislerinin artmasıyla birlikte bu yakıt pilli araçların kullanımının da artacağı öngörülmektedir. Hydrogen Council'in raporuna göre, 2021 yılı itibarıyla tüm Dünya'da 470 olan hidrojen dolum istasyonu sayısı, 2030 yılında 10,000'in üstüne çıkması beklenmektedir.^[26]

Almanya'nın Bremervoerde şehrinde; trenler için özelleştirilmiş hidrojen dolum tesisi, günlük 1600 kg hidrojen kapasitesi ile Dünya'nın en geniş hidrojen dolum noktasıdır.^[27]

Günümüzde; hidrojenin sıkıştırılmış gaz veya sıvı formda kamyon ile taşınması veya sıkıştırılmış gaz olarak boru hattı yoluyla taşınması ticari olarak ana taşıma seçenekleri olup, orta vadede bunun devam etmesi beklenmektedir. Seçilecek yöntem taşınacak hidrojen miktarına, mesafeye ve maliyete göre belirlenmektedir.

Az miktarda kullanım için, basınçlı silindirde gaz halinde kamyonla taşıma tercih edilmektedir. Kamyonla taşıma, sıvılaştırma veya boru hattı ile taşımaya kıyasla, sabit maliyeti çok düşük, herhangi bir zaman ya da rotada kullanıma uygun bir seçenektir. Daha uzun mesafelerde, daha büyük hacimler için sıvı hidrojen taşımacılığı tercih edilmektedir. Çok büyük miktarlarda hidrojen taşınması için ise boru hattı ağı uygun bir seçenektir.^[28]

Yakıt Pilleri



Su ve elektrik harcanarak, PEM elektroliz yöntemiyle hidrojen eldesi

Yakıt pilleri, geleneksel içten yanmalı sistemlere göre çok daha verimli çalışan, hidrojenin kimyasal enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üreten enerji dönüşüm sistemleridir. Çıktı olarak sadece su ve ısı elde edilmesi ve özellikle minimum seviyedeki emisyonları yakıt pillerini avantajlı kılmaktadır.

Yakıt pilleri; yüksek verim, güç yoğunluğu, sessiz çalışma, modüler yapılı olma, şebekeden bağımsız elektrik üretimi, yakıt esnekliği, ve çevre dostu olması gibi üstün özelliklere sahiptir.

Yakıt pillerini, geleneksel pil ve bataryalardan ayıran en belirgin özellik şarj edilmelerine gerek olmadan, yakıt beslemeye devam edildiği sürece çalışmaya devam edebilmeleridir.

11 Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, ufak bir ampülü yakacak kadar az ya da tesislere yetebilecek kadar çok güç üretebilecek kapasitelerde yapılabilmektedir. Bu yüzden ulaşımdan, endüstriyel uygulamalara kadar çok farklı kullanım seçeneklerine sahiptir.

Kullanım seçeneklerini artıran bir diğer unsur; farklı sıcaklıklarda, çeşitli uygulamalar için farklı yakıt pillerinin bulunmasıdır.

Yakıt pilleri; hücrenin içinde kullanılan elektrolitin tipine göre Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP), Alkali Yakıt Pili (AYP), Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP), Ergimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP) ve Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) olarak sınıflandırılmaktadır. Özellikle PEM tipi yakıt pilleri, hareketli uygulamalarda sahip olduğu avantajlar sayesinde, diğerlerinin önüne geçip ticari olarak oldukça yaygınlaşmıştır. Arkasından da sabit uygulamalar için katı oksit yakıt pilleri gelmektedir.

Günümüzde gelişmiş birçok ülke, hidrojenle çalışan yakıt pilli ulaşım araçları kullanmaktadır.

Yakıt pilleri; düşük ısı ize sahip olmaları, yüksek enerji yoğunluğu, neredeyse tamamen sessiz olması, uzun menzil sağlaması ve hızlı dolum gibi avantajlarından dolayı, askeri uygulamalarda kullanılan araçlarda tercih edilmektedir.^[29]



11 Yakıt Pilleri



Yakıt pilli araçlar için Dünya rekoru 1360 km ile Toyota Mirai'ye (Mirai, Japonca'da gelecek anlamına gelmektedir) aittir. 5 dk'lık tek bir dolum ile 5,65 kg'lık hidrojen tankı doldurulmuş ve Güney Kaliforniya trafiğinde iki günlük yolculuk sonunda; 1360 km ile dünya rekoru kırılmıştır. Bu süreç içerisinde tam 12 tane hidrojen dolum istasyonunun önünden geçmişlerdir.

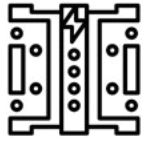
2020 yılına kadar bu rekorun sahibi 778 km ile Hyundai Nexu idi. 1 sene içinde katedilen bu aşama, yakıt pillerinin gelişmesinde hala önünün çok açık olduğunu göstermektedir.^[30]

Yakıt pili kullanmayan deniz araçları (ticariler de dahil olmak üzere) Avrupa'nın birçok limanına; 2030 yılında kademeli olarak, 2050 yılı itibariyle de kesinlikle giremeyecekler.

Dizel Jeneratör
ile çalışan
gemiler



Yakıt Pili Sistemi
ile çalışan
gemiler



Temel farklılıklar

Yüksek
emisyon



Sıfır
emisyon



Çalışma sırasındaki gürültü seviyesi

Yüksek sesli
çalışma
Rahatsız
edici seviyede
titreşimli sürüş



Sessiz
çalışma
Titreşimsiz
sürüş



2030/2050 regülasyonları

2050
itibariyle
limanlara
girişler
yasak



2050
itibariyle
limanlara
girişler
serbest



Alan limitleri



Büyük ve merkezi
güç sistemi

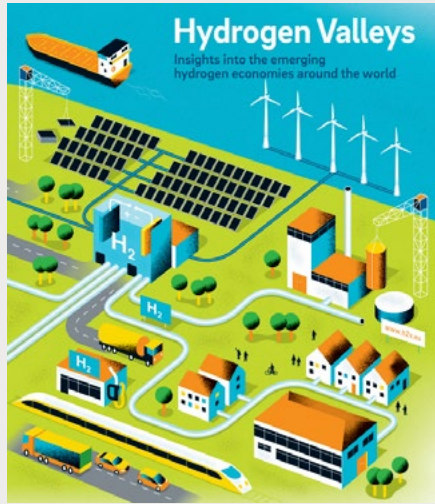


Modüler ve esnek

Kaynak: <https://blog.ballard.com/hubfs/Infographics/Marine%20Infographic/ballard-marine-infographic-final.jpg>

12

Hidrojen Vadileri



Kaynak: FCH JU: Hydrogen Valleys: Insights into the emerging hydrogen economies around the world raporu (2021)

Hidrojen vadileri, tüm hidrojen değer zinciri (üretim, nakliye, dağıtım, depolama ve son kullanım) boyunca pilot projeler yürütmek için çeşitli endüstriyel inisiyatifleri ve araştırma girişimlerini kümeleyen büyük çaplı entegre hidrojen ekosistemlerini ifade etmektedir.

Kuzey Hollanda, Hidrojen Vadisi için Avrupa'da devlet desteği alan ilk bölgedir. Bölge için yapılan hibe başvurusu, Avrupa Komisyonu'nun "Yakıt Hücreleri ve Hidrojen Ortak Girişimi (FCH JU)" tarafından 2019 yılında onaylanmıştır.^[31] HEAVENN olarak adlandırılan bu proje, bir coğrafi bölge içindeki tüm hidrojen zincirini kapsaması ve birbirine bağlaması bakımından benzersiz bir projedir. HEAVENN; Kuzey Hollanda Vadisi içerisindeki alanı kapsayacak şekilde, 6 Avrupa ülkesinden 31 kamu ve özel sektör kuruluşundan oluşan bir konsorsiyum ile gerçekleştirilmektedir.^[32] Bu çarpıcı örnek dışında dünya genelinde 20 ülkede yaklaşık 33 milyon Euro yatırımla kurulmuş 36 hidrojen vadisi daha bulunmaktadır.^[33]



Tokyo 2020 Olimpiyatları- Hidrojen Olimpiyatı

Hidrojen olimpiyatları ismiyle de anılan Tokyo Olimpiyatları sırasında; olimpiyatların en ikonik sembolü olan olimpiyat alevinin hidrojen ile yakılması, Japonya'nın en büyük otomobil üreticisi Toyota'nın 100 adet hidrojen yakıt hücreli otobüs ve 500 adet Mirai yakıt hücreli araçlarını tedarik etmesi, olimpiyat köyündeki başta ısınma ve elektrik ihtiyaçlarının hidrojenle karşılanarak; 4 günlük süreçte 720,000 ton CO₂ emisyonu engellenmiştir. Sky (gökyüzü), Ocean (okyanus), River (nehir) ve Air (hava) kelimelerinin baş harflerinin birleşimi ile oluşan Sora Otobüsleri ise; iki adet 114 kW yakıt hücresinden güç alarak toplam 600 litrelik 10 adet hidrojen tankıyla yakıt depolayarak olimpiyatın göz bebeği haline gelmiştir.

Tokyo Valisi Yoichi Masuzoe: Tokyo 1964 olimpiyatları Dünya'ya Shinkansen hızlı trenlerini miras bırakmıştı. Bu yılki olimpiyatlar ise; mirası olarak bir hidrojen toplumu bırakma yolunda ışık tutuyor.^[34]

13 Güvenlik

Hidrojen, evrenin en bol ve en basit elementidir. Yeryüzünde, esas olarak suyun (H_2O) temel bir bileşeni olarak bulunur. Hidrojen gazının toksik olmaması, kokusuz, tatsız ve hafif olmasının temel nedeni kimyasal yapısıdır. Yeşil hidrojen geleneksel yakıtlardan daha güvenlidir. Hidrojenin güvenliğini değerlendirmek için; özellikleri benzin, propan ve dizel gibi diğer geleneksel yakıtlarla karşılaştırılmalıdır. Hiçbir yakıt tamamen güvenli olmasa da, yeşil hidrojenin birçok açıdan geleneksel yakıtlardan daha güvenli olduğu çeşitli araştırmalarla desteklenmiştir.^[35]

1. Hidrojen, geleneksel yakıtların aksine toksik değildir. Buna karşın geleneksel yakıtların neredeyse tamamı zehirlidir. Ayrıca, hidrojen yakıt pilleri ile çalışan araçlar söz konusu olduğunda, hidrojen sadece su üretirken, geleneksel yakıtların yanması hava kirliliğine neden olmaktadır. Hidrojen sızıntısı veya dökülmesi, çevreyi kirletmez, insanları ve doğayı tehdit etmez, ancak fosil yakıtlar sızdığında, döküldüğünde veya yakıldığında önemli sağlık sorunları ve ekolojik tehditler oluşturabilir.
2. Hidrojen, benzin gibi geleneksel birçok yakıttan daha düşük bir radyan ısı değerine sahiptir. Yani hidrojen alevinin etrafındaki hava, benzin alevi kadar sıcak değildir. Bu nedenle; hidrojen, ikincil yangın riski daha düşük bir yakıttır.
3. Hidrojen, patlama için fosil yakıtlardan daha yüksek oksijene ihtiyaç duymaktadır. Hidrojen, %18-59 arasındaki oksijen konsantrasyonlarında patlayıcı olabilirken, benzin %1-3 arasındaki oksijen konsantrasyonlarında patlayıcı olabilir. Bu, oksijenli herhangi bir ortam için benzinin hidrojenenden daha fazla patlama riski olduğu anlamına gelmektedir.
4. Hidrojen havadan 14 kat, benzin buharından 57 kat daha hafiftir. Bu durum, hidrojenin, serbest bırakıldığında, tipik olarak hızla yükseleceği, dağılacağı ve zemin seviyesinde tutuşma riskini büyük ölçüde azaltacağı anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, propan ve benzin buharı havadan ağırdır, bu da yer seviyesinde kalmalarını daha olası hale getirerek yangınların insanlara ve binalara zarar verme riskini artırmaktadır.

13 Güvenlik



Hidrojen güvenlik standartları geçtiğimiz 40 yıl boyunca uzun bir yol katetmiştir ve araştırmacılar yıllar boyu güvenli bir hidrojen endüstrisi oluşturmaya odaklanmıştır. Hidrojen renksiz ve kokusuz olduğu için, hidrojen yakıt istasyonları, ekipmanları ve tesisleri için sızıntıları tespit edebilecek sensörlerin kullanımı oldukça kritik bir gerekliliktir. Günümüz teknolojileri, herhangi bir hidrojen sızıntısının etkili bir şekilde tespit edilmesini sağlamak için uzaktan hidrojen kaçaqlarını algılamayı mümkün kılan sistemleri üretmemize imkân sağlamaktadır. Yakıt hücreli araçlardaki hidrojen depolama tankları, montaj öncesi aşırı sıcaklıklara ve basınçlara maruz bırakılarak katı güvenlik testlerine tabi tutulmaktadır. Ayrıca bu araçlar darbeye maruz kaldığında yakıt ikmalini durdurarak tehlikenin devam etmesini engelleyen sistemlerle de donatılmıştır.

Hidrojen güvenliğini geliştirmeye adanmış kar amacı gütmeyen küresel bir organizasyon olan Hidrojen Güvenliği Merkezi (CHS) ve benzeri gruplar, yaşanabilecek muhtemel kazalarda olaya hızlı müdahale edilmesi gibi konularda endüstriyel üyelerine eğitim içeriği sağlamaktadır. Merkez, bünyesindeki 45'ten fazla üye kuruluşla (Shell, Hyundai, Argonne National Laboratory, National Grid, vd.) endüstri güvenliğine öncelik vermektedir. Sonuç olarak sorumlu bir şekilde kullanıldığında yeşil hidrojen, bugün güvendiğimiz diğer birçok yanıcı yakıttan daha az tehlike oluşturmaktadır.^[36]

14

Gelecek Hidrojeninde

Yeşil hidrojenin geleceği hiç bu kadar parlak olmamıştı...

Ülkemizin toplam enerji ihtiyacının %5'inin yeşil hidrojen ile karşılanabilme ihtimali bulunmaktadır. Bu amaçla, 1,6 ton yeşil hidrojen ve bu hidrojenin sağlanması için 12 GW elektrolizör kapasitesi gerekmektedir.^[37]

AB'de 2024'e kadar 1 milyon ton yenilenebilir hidrojen üretebilecek minimum 6 GW gücünde elektrolizör kurulumlarını destekleyecektir. 2025-2030 arası için en az 40 GW ve 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen üretimine çıkması hedeflenmektedir. 2030'dan itibaren ise yenilenebilir hidrojenin, karbondan arındırılması zor olan tüm sektörlerde geniş ölçekte kullanılması planlanmaktadır.

2016 yılında 8 üye ile kurulan Hydrogen Europe, şu anda 25 ülkenin ulusal hidrojen derneklerinin kurulmasıyla birlikte oldukça önem kazanmış ve tüm üyelerinin hidrojen yol haritalarını oluşturmaları ve gerekli kanunları hazırlaması için HyLaw isimli projeyi oluşturmuştur. Hidrojen sektörünün dünyadaki en büyük oyuncularının bir araya gelerek oluşturduğu Hydrogen Council ise hidrojen ekonomisinin dünyada farkındalık yaratması için önemli adımlardan birisi olmuştur.

Hidrojenin Kg Fiyatı

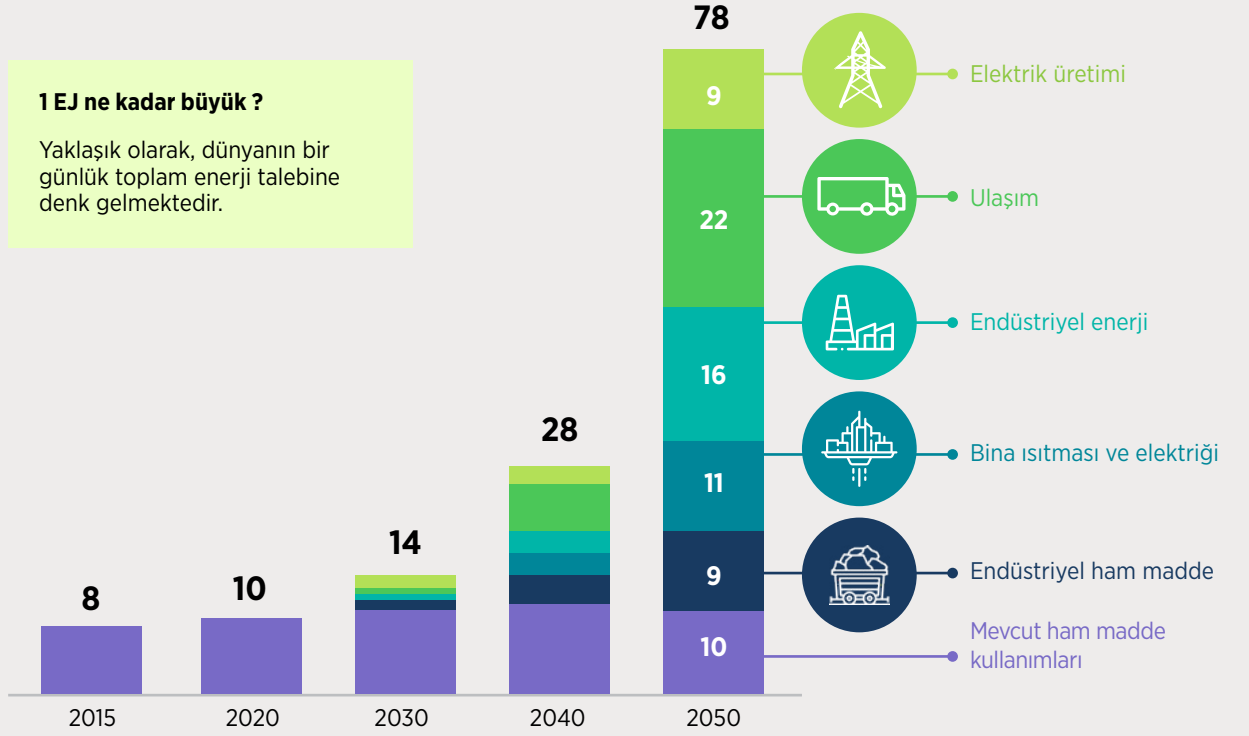
Halihazırda hidrojen dolum istasyonlarında (140 adet) dünya lideri olan Japonya'da; hidrojenin pompa fiyatı 9,35\$/kg'dır. Avrupa lideri olan Almanya'da ise ülke genelinde 90 adet hidrojen istasyonu aktiftir ve hidrojenin pompa fiyatı 11,26\$/kg'dır. ABD'deki en büyük hidrojenli araç kümelenmesinin bulunduğu Kaliforniya'da hidrojen istasyonlarında hidrojenin pompa fiyatı 13,14\$/kg'dır. Birleşik Krallık'ta ise bu fiyat 16,55\$/kg iken Vancouver, Kanada'da hidrojenin satış fiyatı 12,75\$/kg'dır ve kilometre başına fiyat bazında benzinle rekabet edebilmektedir. 2050 yılına kadar üretim ve dağıtım dahil olmak üzere hidrojenin pompa fiyatının 1,5\$/kg'ın altına düşmesi hedeflenmektedir.^[37]

14 Gelecek Hidrojen

Hidrojen ile sağlanan küresel yıllık enerji talebi (EJ)

1 EJ ne kadar büyük ?

Yaklaşık olarak, dünyanın bir günlük toplam enerji talebine denk gelmektedir.



Kaynak: Hydrogen Council: Hydrogen Insights 2021

2019 yılı itibariyle dünyadaki enerji kullanımında hidrojenin rolü %4 iken 2050 yılında bunun %18-22'ye çıkması beklenmektedir. 2030 yılında yeşil hidrojenin maliyetinin 2,29-2,81 \$/kg seviyesine, 2050 yılında ise 1,5 \$/kg'ın altına inmesi beklenmektedir. Bu durum yeşil hidrojenin kullanımının daha da yaygınlaşması anlamına gelmektedir. Hidrojen ekosistemi sayesinde 2050 yılında 30 milyon kişilik yeni istihdam oluşması beklenmekteyken, 6 GT kadar CO₂ emisyonu önlenmiş olacaktır ki bu değer tüm Kuzey Amerika kıtasının yıllık CO₂ miktarına eşittir. Yıllık 2,5 trilyon dolar geliri olan bir hidrojen ekonomisinin 2050 yılında kurulacağı düşünülmektedir.^[39-40]

14 Gelecek Hidrojende



COP 26 sonrası IEA başkanı Dr. Fatih Birol açıkladığı raporda;

- 2017’de %6, geçen yıl %57 bu yıl ise dünyadaki %73 emisyonu temsil eden 131 ülke net sıfır hedeflerine ulaşmayı taahhüt etmiştir.
- Geçtiğimiz yıl boyunca, dünyadaki tüm yeni yapılan elektrik santrali kapasitesinin %80’inden fazlası yenilenebilir enerjiden sağlandığını ve bundan sonra karbon yoğun yeni tesislere yatırım yapmanın ciddi bir riski olacağını belirtmiştir.
- Önümüzdeki 25 yılda net sıfır enerji ekosistemi kurmanın, küresel ekonomi için 26 trilyon dolarlık net fayda sağlayacağını öngörmüştür.
- Gelişmiş ülkelerin, enerji dönüşümü için geri kalmış ve geliştirmekte olan ülkelere para yardımı yapması gerekliliğini dile getirmiştir.

Ayrıca COP 26 sırasında;

- Gelişmiş ülkeler ve yaklaşık 450 finans kurumu/ şirketi, geri kalmış ve geliştirmekte olan ülkelere toplam 130 milyar dolar kaynak aktarma taahhütünde bulunmuştur.
- Enerjisinin %80’ini kömürden sağlayan Güney Afrika’ya (Afrika kıtasındaki en fazla sera gazı üreten ülke) 8,5 milyar dolarlık destek verileceğini açıklanmıştır.
- COP26 sonrası benzer bir fon olarak, ülkemizin de 3,3 milyar dolarlık bir hibe/teşvik alacağı öngörülmüştür.
- Aşamalı olarak kömür kullanımının azaltılması planlanmıştır.

Bunlara ek olarak, iklim değişikliği ile mücadelede taahhütlerini yerine getirmeyen ülkelerin 2023’te uyarılması ve uygulamaların izlenmesi için IEA görevlendirilmiştir.

Ayrıca; COP 26 sonuç raporlarında; Almanya 2045’te net sıfır emisyon hedefini koyarken birçok ülke 2050’de net sıfır emisyon hedefini yenilenmiştir. Türkiye ise 2053 olarak hedef koymuştur.

Güncel Haberler

S&P Global Platts Analytics'ın Kasım 2021 tarihli raporuna göre dünyanın en büyük 14. hidrojen ekonomisine sahip olan Suudi Arabistan önderliğinde; Oman, Katar ve Birleşik Arap Emirlikleri ortaklığında yapılacak olan projelere yaklaşık olarak 44 milyar dolarlık yatırım yapıldığını ve bunların faaliyete geçmesiyle birlikte, Orta Doğu'nun Avrupa için Hidrojen dağıtım merkezi konumuna geleceği bildirilmiştir.^[41]

Avrupa Birliği 2021-2027 arasındaki toplam bütçesinin %30'unu iklim krizi ve sonuçları ile mücadele için ayırmıştır.^[42]

Ülkemizden Aspilsan Enerji'nin de üyesi olduğu European Clean Hydrogen Alliance'in düzenlendiği ve COP26 sonrası ilk önemli hidrojen toplantısı olan European Hydrogen Week'in açılış konuşmalarını; Avrupa Komisyonu Başkanı Ursula von der Leyen ve IEA Başkanı Dr. Fatih Birol yapmıştır. Dr. Birol, yatırımcılara ve ülke yöneticilerine seslenerek; COP26'da alınmış en önemli karar olarak eğer karbon yoğun santrallere yatırım yaparsanız risklerine katlanmak zorunda kalacaksınız mesajını vermiştir. Diğer tüm enerji kaynaklarının aksine, herkes hidrojeni seviyor ve onu geliştirme konusunda bir şeyler yapmak istiyor. Bu daha önce hiç karşılaşmadığımız bir durum açıklamasında bulunmuştur.

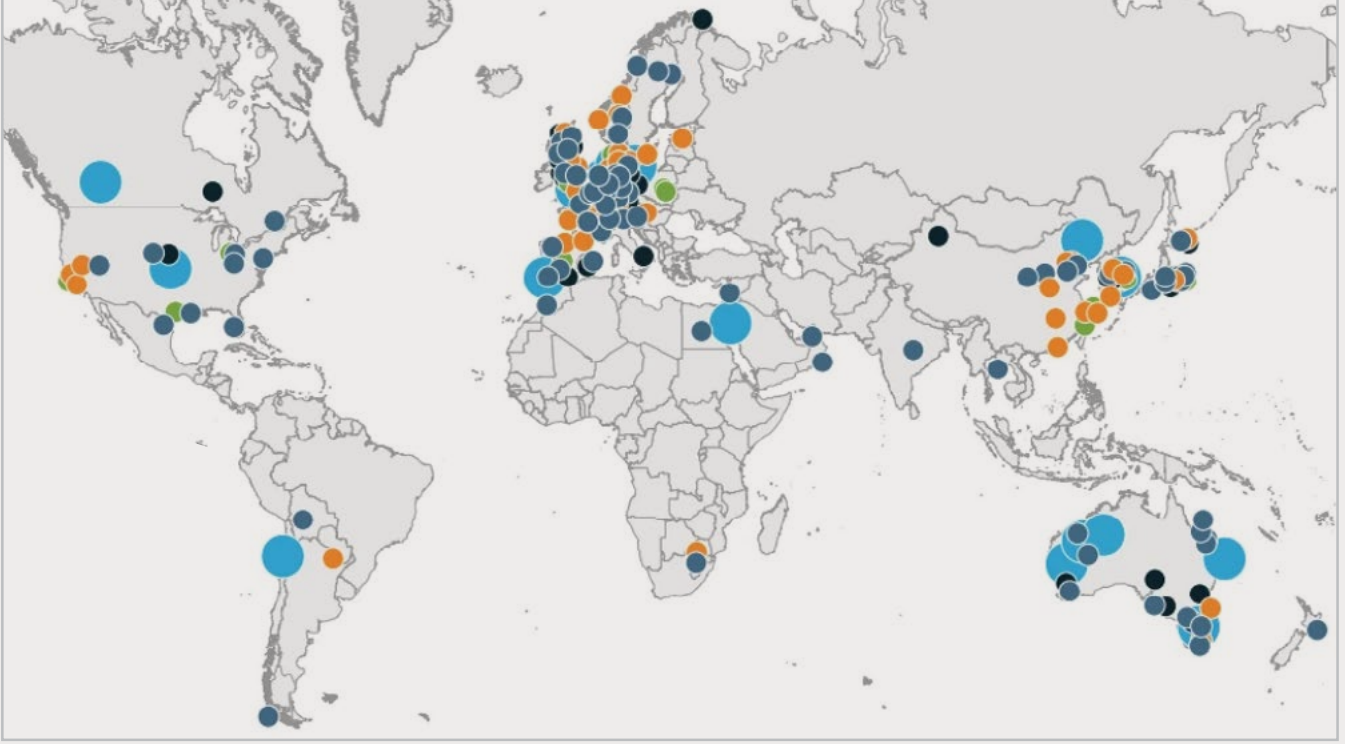
Ülkemizde en yoğun şekilde gri hidrojen kullanan dev kuruluş TÜPRAŞ; 2021 yılı Kasım ayında TÜPRAŞ Stratejik Dönüşüm Planını açıklamış, 2030 yılı itibarıyla faaliyetlerinden kaynaklanan karbon salımını, 2017 yılına göre % 27 oranında azaltmayı ve 2050'de ise karbon nötr olmayı taahhüt etmiştir. Bu kapsamda, TÜPRAŞ'ın yapacağı yatırımların önemli bir kısmını, yeşil hidrojen üretimiyle entegre bir iş modeli oluşturmaktadır.^[43]



European Clean
Hydrogen Alliance



14 Gelecek Hidrojeninde



Kıtalara Göre Büyük Ölçekli Projeler:

- 126** Avrupa
- 46** Asya
- 24** Avustralya
- 19** Kuzey Amerika
- 8** Orta Doğu ve Afrika
- 5** Latin Amerika

228 duyurulmuş proje



17 GW

boyutunda elektrolizör ile hidrojen üretimi



90 adet

büyük ölçekli hidrojenin endüstriyel kullanımı projesi



53 adet

hidrojenli ulaşım araçları projesi



45 adet

hidrojen ekonomisinin entegre edilme projesi



23 adet

hidrojenin dağıtımı ve depolanması projesi

Kaynak: Hydrogen Council: Hydrogen Insights 2021

Dünya'daki en prestijli firmaların bir araya gelerek oluşturdukları Hydrogen Council'in, 2021 yılında çıkarttığı Hydrogen Insights 2021 raporuna göre; 30 ülke hidrojen stratejilerini ve bütçelerini ilan etmişlerdir. Bu 30 ülkede; şimdiye kadar toplamı 300 milyar dolara ulaşan, 228 büyük çaplı proje duyurulmuştur.

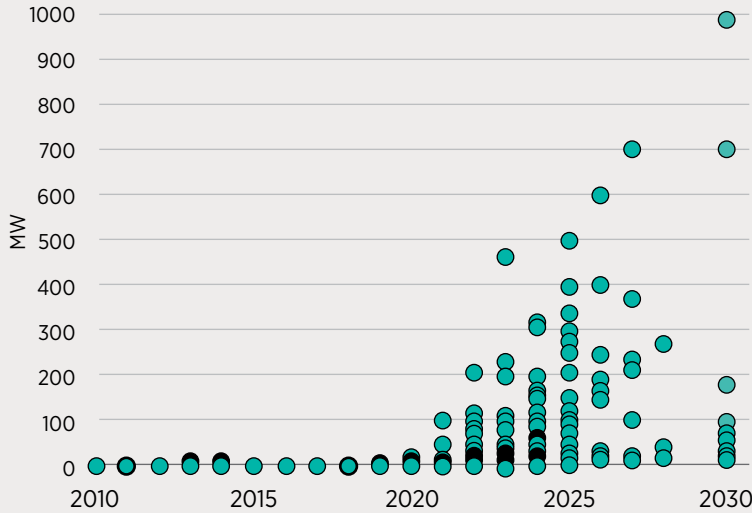
Avrupa ülkelerinde hidrojenin üretimi ve tüketimi üstünde dengeli bir dağılım olsa da; Güney Kore ve Japonya'da ağırlıklı olarak hidrojenin kullanımı (özellikle ulaşım ve endüstride) özelinde projeler açıklanmıştır. Avustralya ve Orta Doğu ise, kendilerini hidrojen ihracatçı ülkeler olarak tanımlamasına uygun hidrojen üretimi ile Avrupa ve Asya ülkelerine ulaştırma projelerini onaylamışlardır.

Özellikle 17 adet GW ölçeğinde elektrolizör projesi olması ise yeşil hidrojenin gelecekteki önemini açıkça ortaya koymaktadır.

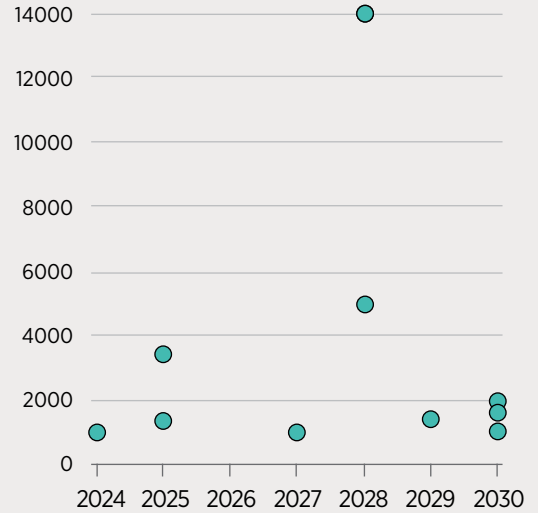
14 Gelecek Hidrojende

Mevcut, yapım aşamasında ve planlı elektrolizör projelerinin büyüklükleri (2010-2030)

1 GW'dan küçük tesisler

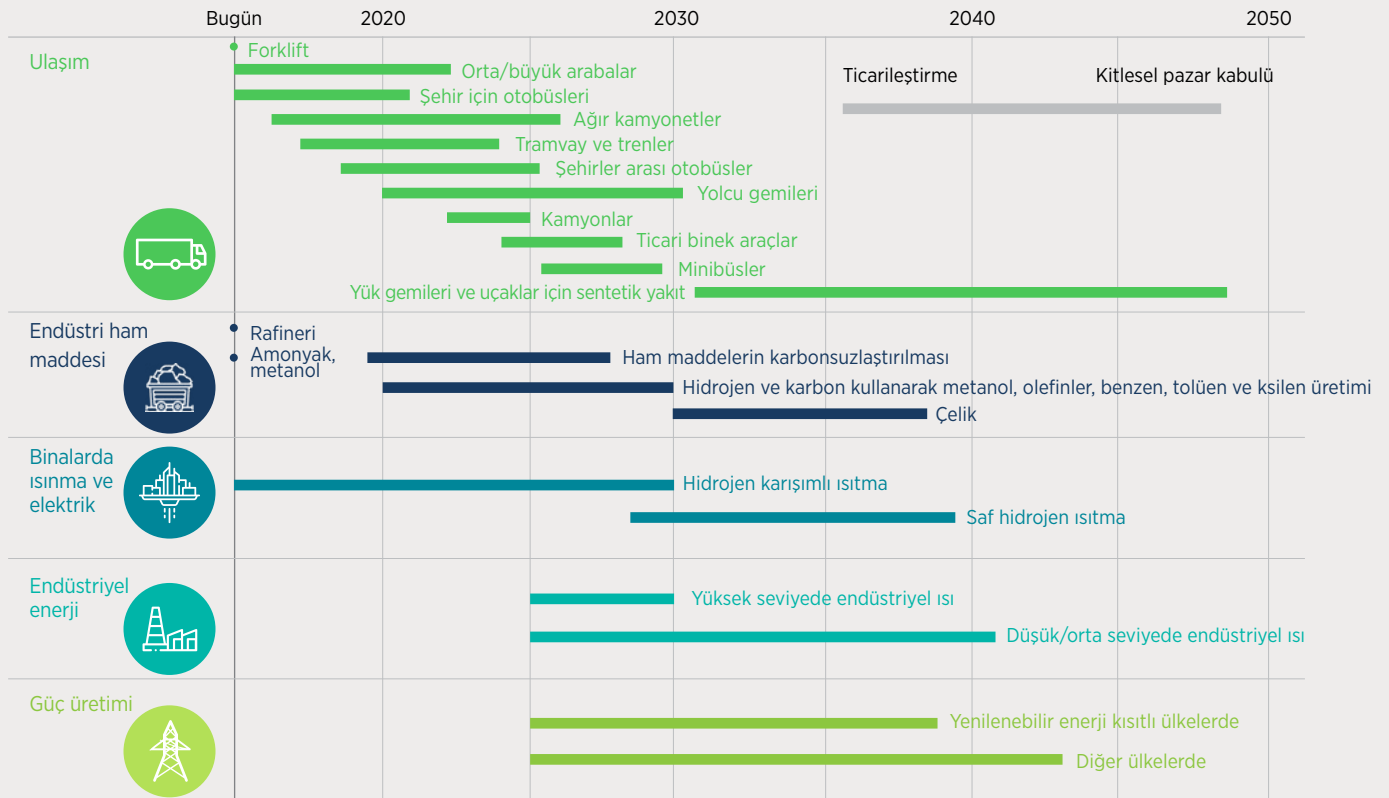


1 GW'dan büyük tesisler



Kaynak: IEA (2021): Hydrogen Projects Database

Hidrojen kullanımının ticarileşmeden kitlesel pazar kabulüne kadar yıl bazında geçen süre



Kaynak: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/hydrogen-the-next-wave-for-electric-vehicles>

15

Ülkemiz için Öneriler

Dr. Can Sındıraç (ASPİLSAN Enerji)

Çalışma Grubu Lideri



- Ülkemizde hidrojen ekosisteminin yaygınlaştırılması için **ilk yapılması gereken** Hidrojen Mevzuatının ve ulusal hidrojen yol haritasının oluşturulmasıdır.
- İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA) ve ENSİA ortaklığında yürütülen **“Best for Energy”** projesindeki **Türkiye’nin ilk Hidrojen Ideathon’u** gibi etkinlikler ile, gençlerin hidrojen konusunda bilinçlendirilmesi sağlanmalı ve bu gençlerin gelecekte hidrojen konularında çalışmaya teşvik edilmesi hedeflenmelidir.
- İZKA’nın düzenlediği Yeşil ve Mavi Dönüşüm gibi ülkemizi karbonsuzlaştırmaya götürecek fonlar acilen oluşturulmalıdır.
- 10 yıl boyunca rüzgar ve güneş enerjisi için sağlanan proje/personel teşviklerinin bir benzeri hidrojen teknolojilerinde çalışan firmalar için de kamu eliyle yapılmalıdır. **ASPİLSAN Enerji, TÜPRAŞ gibi yeşil hidrojene yatırım yapan firmaların sayıları artırılmalıdır.**
- **Hidrojen dönüşümü yapmak pahalı olsa da, hiçbir şey yapmamanın daha pahalı olduğu sıklıkla hatırlatılmalıdır.** Nasıl ki çocuklarımızın ateşi 36,5°C yerine 38°C olduğunda okula göndermekten bile kaçınıyorsak, Dünya’nın 1,5°C ısınmasını toplum ve birey olarak hepimiz önemsemeliyiz. Yeşil hidrojen sadece net sıfır gazı olmayıp, enerji dönüşümünü güçlendiren ve oyunu değiştiren bir elementtir.

Alinda Öykü Akar (Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler A.Ş.)



- **Hidrojen yakıt pili destekli insansız hava araçları ile orman arazileri belirli aralıklarla taranarak yangın tehlikesi azaltılabilir.** Yakın zamanda ülkemizde farklı noktalarda başlayan ve çok hızlı şekilde yayılan yangınlarda bu şekilde önceden fark edilerek önlem alınabilirdi. Yenilenebilir enerji ile bu tarz çevreci yaklaşımlar için AB proje teşviklerine başvurarak destek alınabilir.
- Türk Silahlı Kuvvetlerini Güçlendirme Vakfı (TSKGV) kuruluşları gibi savunma sanayi kuruluşları; Vestel, Toyota gibi özel sektör firmaları; TÜBİTAK gibi araştırma kurumları; üniversiteler bir araya getirilerek **dijital bir platform (havuz) oluşturulabilir.** Tedarikçiler ya da çözüm önerisi sunan kuruluşlar ortak bir veri tabanına eklenebilir. Konu hakkındaki gelişmeler dijital platform üzerinden duyurulabilir, diğer kuruluşlardaki örneklerle ve güncel bilgiye daha kolay ve şeffaf bir iletişim kanalı üzerinden ulaşılması sağlanabilir.
- AB'nin desteklediği ve finanse ettiği kuruluşlar üzerinden **proje teşviği alınabilir.**

Dr. Sezen Gürdağ (BORÇELİK)



- Kamunun kısa/orta/uzun vadeli yol haritasının çıkarılması gerekmektedir. Bu yol haritası tüm paydaşları tanımlamalıdır. Ve tüm paydaşlar bir havuzda toplanmalıdır.
- Yeşil hidrojenin geniş kapsamlı uygulama alanı bulması için önündeki en büyük engelin maliyet olduğu bilinen bir gerçektir. Bu bariyeri aşabilmek için öncelikle karar koyucuların motive edici teşvik metotları geliştiriyor olması gereklidir. Böylece, gri hidrojenden yeşil hidrojene geçiş mümkün olabilir. Sektörlerin kümelenmesinin önü bu şekilde açılmalıdır.
- Finansal kısıtları hariç bırakarak daha etkin çalışma ortamını yaratma yolunda karar alıcıların inisiyatif oluşturarak sektör oyuncuları ve bu konuda etkin çalışma yapan enstitü ve akademi camiasını bir araya getirerek özerk çalışma kümeleri oluşturması ve konulan hedefler ile çalışmalarını takip ediyor olması gereklidir.
- Toplum bilinci oluşturulması gereklidir. Mevcut durumda, yenilenebilir enerji olarak bakıldığında sadece güneş ve rüzgar enerjisi görülmekte ve bunlardan elektrik üretiminin hedef olduğu algısı vardır. Halbuki bu kaynakların bir girdi oluşturarak pek çok sektöre dokunacak yeşil H₂ üretimine yapacağı katkı, konuyla ilgililer haricinde, toplumca bilinmemektedir.
- Bir diğer itici güç ise CO₂ vergilerinin getirilmesi ve üretilen CO₂ miktarı başına vergilendirmenin yapılmasıdır. Dolayısıyla özel sektörün yeşil enerji kaynaklarına yönelmesi konusunda çok daha ciddi şekilde çalışmasını ve yatırımlar gerçekleştirmesini sağlayabilecektir.

15 Ülkemiz için Öneriler

Tuğçe Çetin



- Küresel ısınmanın karşısında vaktimiz yok. Bu yüzden gri hidrojeni aktif olarak kullanan firmaların acil olarak 2030 ve 2050 planlarını açıklayarak dönüşümlerini başlatmaları gerekmektedir.
- Küresel iklim olaylarının verdiği acıyı daha az hissetmek için önce toplumun bilinçlendirilmesi gerekmektedir.
- Avrupa Birliği'nin topraktan tabağa sloganıyla başlattığı, sürdürülebilir tarım ve hayvancılık için çiftçilere devlet desteğinin yanında su yönetimine acil çözüm bulunmalıdır.
- 1,5°C'lik ısınma hedefini tutturmak için, yeşil enerjiye dönüşüm yol haritalarımız hemen çıkartılmalıdır. Bunun gelecek nesillere karşı sorumluluğumuz olduğu unutulmamalıdır.

15 Ülkemiz için Öneriler

Cem Açıksarı
(Tüpraş Ar-ge)



Dr. Cüneyt Karakaya
(Tecnalia Research & Innovation)



Ülkemizde son yıllarda yenilenebilir enerji üretiminde önemli aşamalar kat edilmiştir. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal ve biyoyakıtların enerji kaynağı olarak kullanılması, enerjinin büyük bir kısmını ithal eden Türkiye ekonomisi için büyük fırsatları doğuruyor. Fakat, yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu düzensiz ve dolayısıyla elektrik enerjisine dönüşümü nispeten daha zor. Tam da bu noktada, enerjinin arzının güvenliğinin büyük ölçekte alabilecek ve rafinaj, petrokimya, gübre, demir-çelik, ulaşımda temel girdi olabilecek yeşil hidrojen karşımıza çıkıyor.

Ülkemizin yenilenebilir enerji üretim potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda bir çok ülkeye göre avantajlı durumdayız. Bundan dolayı acilen aşağıdaki aksiyonları almamız gerekiyor;

- Ulusal hidrojen stratejilerinin oluşturulması ve açıklanması gerekmektedir.
- Hidrojen ekosisteminde yer alan teknolojiler için üniversite-araştırma merkezi-sanayi işbirliklerini geliştirecek devlet destekli fon mekanizması ile çalışan projelerin oluşturulması gerekmektedir.
- Hidrojen ekosisteminin oluşmasını sağlayacak hibe ve teşvikler için gerekli mevzuatların gözden geçirilmesi/oluşturulması gerekmektedir.

Burak Baykal (TTGV)

Çalışma Grubu Moderatörü



- Ülkemizin yeşil hidrojen üretimi için gerekli verimli elektrolizör teknolojilerini (katı oksit/ polimer/alkali) geliştireceği zamana kadar yaşanacak geçiş döneminde, mavi hidrojen üretimi ve kullanımı konusunda gerekli aksiyon planlarının yapılması ve uygulama için ihtiyaç duyulan inisiyatiflerin alınması gerekmektedir. Bu konuda ülkemiz tarım arazilerini avantaj olarak kullanabilir, biyokütle tarımcılığı ve tarım atıklarının yönetimi konusunda yeni adımlar atılabilir. Ayrıca mavi ve gri Hidrojenin birlikte kullanım senaryolarını da dikkate alarak yenilikçi karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesine daha ciddi yatırım destekleri verilebilir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ülke genelinde yaygınlaşması için atılacak her olumlu adım yeşil hidrojen üretimini de doğrudan destekleyecektir. Bu nedenle yeşil hidrojen konusunda yaşanan global yarışta geri kalmamak adına yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılacak her yeni yatırımla birlikte potansiyel yeşil hidrojen üretim altyapılarını da dikkate almak faydalı olacaktır.
- Hidrojenin taşınması ve depolanması konusunda zengin bor rezervlerimizi daha etkili kullanabiliriz. Ayrıca bu konuda faaliyet gösteren şirketlerimize daha hızlı teknoloji transferi yaparak bu konuyu odağına almış bir ekosistem oluşturabiliriz. Özellikle BOREN Hidrojen Teknolojileri Laboratuvarı (HTL) gibi ulusal araştırma merkezlerinde üretilen teknolojilerin ticarileşmiş endüstriyel uygulamalarını daha sık görmek bu alanda çalışma potansiyeli olan özel sektörü daha da teşvik etmek adına kritik olabilir.

Kaynakça

1. <https://renewablesnow.com/news/consortium-secures-eu-grant-for-100-mw-refhyne-ii-hydrogen-electrolyser-756754/>
2. https://www.washingtonpost.com/business/energy/how-steel-could-become-green-and-what-it-would-take/2021/11/09/0c00dbca-4123-11ec-9404-50a28a88b9cd_story.html
3. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>
4. <https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-cost-eu/8549488>
5. <https://www.consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/>
6. <https://www.bbc.com/news/science-environment-24021772>
7. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
8. <https://sponsored.bloomberg.com/immersive/hyundai/the-h2-economy>
9. <https://ekoik.com/2021/08/24/karbon-vergisi-uygulamasinin-turkiyeye-ekonomik-etkileri/>
10. <https://energyminute.ca/single/infographics/269/carbon-emissions-trading>
11. <https://csb.gov.tr/iklimi-korumanin-bedeli-makale>
12. https://www.scottishpower.com/news/pages/green_hydrogen_for_scotland_to_help_reach_net_zero_targets.aspx
13. <https://www.herbertsmithfreehills.com/latest-thinking/hydrogen>
14. <https://fuelcellworks.com/news/sgn-a-world-first-green-hydrogen-project-wins-uk-government-funding/>
15. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>
16. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electrolysis-capacity-becoming-operational-annually-2014-2023-historical-and-announced>
17. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
18. https://www.ntv.com.tr/galeri/teknoloji/nasanin-moxie-araci-marsta-oksijen-uretti-kizil-gezegenin-kolonilestirilmesi-icin-tarihi-adim,OQuJMGdHUkiEzZGKcqbuvQ/Jvr-wuMC_UKz1skpOI8NsQ
19. <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>
20. <https://www.esig.energy/electrolyzer-cost-performance-and-durability-status-and-prospects/>
21. https://yenader.org/tr_tr/
22. Abdalla, A. M., Hossain S.; Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review; Energy Conversion and Management Volume 165, 1 June 2018, Pages 602-627
23. <https://gasforclimate2050.eu/ehb/>
24. THE ROLE OF HYDROGEN AND FUEL CELLS IN FUTURE ENERGY SYSTEMS: A H2FC SUPERGEN White Paper (March 2017)
25. <https://cleangascenter.com/>
26. Hydrogen Scaling Up: A sustainable pathway for the global energy transition, Hydrogen Council
27. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/7/worlds-first-hydrogen-filling-station-passenger-trains-be-built>
28. Shell, 2017 Hydrogen Study: Energy of The Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2
29. <http://www.fuelcellindustryreview.com/>
30. <https://insideevs.com/news/539512/toyota-mirai-guinness-record-845miles/>
31. <https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/>
32. <https://heavenn.org/>
33. <https://www.h2v.eu/>
34. <https://www.euronews.com/green/2021/07/21/japan-hydrogen-economy-to-power-the-tokyo-olympic-games>
35. <https://www.nrdc.org/experts/christian-tae/hydrogen-safety-lets-clear-air>
36. <https://hydrogen.wsu.edu/2017/03/17/so-just-how-dangerous-is-hydrogen-fuel/>
37. Shura Raporu: Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları 2021 subat
38. <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/090221-platts-launches-hydrogen-pump-prices-in-germany-japan-and-california>
39. <https://hydrogeneurope.eu/directory/national%20association>
40. <https://hydrogencouncil.com/en/>
41. <https://www.futurenetzero.com/2021/11/23/middle-east-plans-44bn-hydrogen-investment/>
42. <https://www.consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/>
43. <https://www.tupras.com.tr/basin-bultenleri?detay=basin-bulteni-24112021>