

Derleme Makalesi

Türkiye Hidrojen Enerjisi Stratejilerinin ve Geliştirilen Politikaların Araştırılması

 **Gülbahar Bilgiç Tüzemen**

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir 50300, Türkiye.

Sorumlu Yazar: glbhrblg@nevsehir.edu.tr

Makale Bilgileri:

Geliş: 08/05/2024, Revizyon: 29/05/2024, Kabul: 11/06/2024.

ÖZET

Çevresel etkisinin az olması nedeniyle hidrojen, fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarının değerli bir alternatiftir. Evrendeki en yaygın element olan hidrojen, doğal dünyada serbest halde değil, bileşikler halinde bulunur. Hidrojen, sanayiden ulaşıma, yenilenebilir enerjinin entegrasyonundan yeşil kimyasalların üretimine kadar çok çeşitli alanlarda kullanım alanı bulmaktadır. İklim değişikliğiyle mücadelede teknolojinin ilerlemesi ve küresel ölçekte enerji tüketiminin artması nedeniyle hidrojen teknolojilerine yapılan yatırımların önümüzdeki yıllarda artması bekleniyor. Çalışmada Türkiye'nin 2053 net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda hidrojen teknolojilerinin yerli olarak geliştirilmesine yönelik planlar incelendi. Yayımlanan Türkiye Hidrojen Teknolojileri'nin stratejik yol haritası doğrultusunda mevcut durum, hedefler ve politikalar araştırıldı. Araştırmada ayrıca, küresel ve Türkiye'deki çalışmalar ve sektördeki gelişmeler dikkate alınarak hidrojen üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanımına ilişkin teknolojiler incelendi. Örneğin Türkiye elektrolizörün kurulu güç kapasitesinin 2053 yılında 70 GW'a ulaşması öngörülmüyor. Dahası bu çalışmada hidrojenle ilgili mevcut yasaların gözden geçirilmesi ve uyarlanması, yeşil hidrojenin üretimi ve depolanmasında yerli bileşenlerin kullanımına yönelik sertifikasyon ve teşvik programlarının geliştirilmesi, milli ve yerli teknolojilerin oluşturulmasına yönelik araştırma-geliştirme ile ürün geliştirme çalışmalarının yapılması yapılmaması gerekenlere değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Türkiye, Hidrojen Enerjisi, Fosil yakıtlar, Elektrolizör*

Research of Türkiye Hydrogen Energy Strategies and Developed Policies

ABSTRACT

Due to its low environmental impact, hydrogen is a valuable alternative to energy sources based on fossil fuels. Hydrogen, the most common element in the universe, is found in the natural world not in free form but in compounds. Hydrogen finds use in a wide variety of areas, from industry to transportation, from the integration of renewable energy to the production of green chemicals. Investments in hydrogen technologies are expected to increase in the coming years due to the advancement of technology in the fight against climate change and the increase in energy consumption on a global scale. In the study, plans for domestic development of hydrogen technologies in line with Turkey's 2053 net zero carbon emission target were examined. The current situation, targets and policies were investigated in line with the published strategic road map of Türkiye Hydrogen Technologies. In the research, technologies related to hydrogen production, storage, distribution and use were examined, taking into account global and Turkish studies and developments in the sector. For example, the installed power capacity of electrolyzers in Türkiye is expected to reach 70 GW in 2053. Moreover, in this study, the review and adaptation of existing laws regarding hydrogen, the development of certification and incentive programs

for the use of domestic components in the production and storage of green hydrogen, and the research and development and product development studies aimed at the creation of national and domestic technologies are mentioned.

Keywords: *Türkiye, Hydrogen Energy, Fossil fuels, Electrolyzer*

I. GİRİŞ

Dünyanın artan enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hala fosil yakıtlardan karşılanmaktadır ancak bu kaynaklar giderek tükenmekte, ayrıca havayı ve çevreyi ciddi şekilde kirletmektedir. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, bu sorunların çözümü için umut vadeden alternatif bir enerji kaynağıdır. Son yıllarda hidrojen enerjisine odaklanan çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışmasının olmasının nedeni de budur. Hidrojeni kullanan teknolojiler, enerjinin dönüşümünde bir diğer önemli bileşeni olarak ortaya çıkmaktadır. Halihazırda ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin ulaşım, ısıtma ve elektrik üretimi gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılacağı öngörülmüştür. Ayrıca, özellikle net sıfır emisyon hedefleri kapsamında yeşil hidrojen üretiminin de önem kazanması bekleniyor (SBB, 2023). Gelişmiş ülkeler, dünyanın artan enerji talebinin temiz, yenilenebilir hidrojen enerjisiyle karşılamak son derece kapsamlı, büyük proje ve yatırım yapmaktadırlar.

Enerji kaynaklı faktörlerin Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının yaklaşık %70'ini oluşturduğu göz önüne alındığında, yeşil hidrojen gibi alternatif temiz enerji teknolojilerinin kullanılması yoluyla ülke, yeşil ve dijital dönüşüm sürecinde ve dünya çapında daha rekabetçi hale gelecektir (SBB, 2023). Enerjide bağımsız olmak, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçmek ve ileri teknolojiler yaratmak için; Türkiye hidrojen enerjisinin geliştirilmesinden büyük bir fayda görebilir. Bu bağlamda hidrojen enerjisi, Türkiye'nin enerji politikalarını gerçekleştirmek için kullanabileceği güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Yenilikçi teknoloji, teşvik programlarının benimsenmesi ve yasa koyucuların bu alanda yapacakları mevzuat düzenlemeler bu ilerlemeyi mümkün kılacaktır. Bu çalışmada Türkiye'nin hidrojen üretim kapasitesi ve potansiyeli değerlendirilmiştir. Türkiye enerjide dışa bağımlı olduğundan hidrojen enerjisine öncelik verilmesi son derece önemlidir. Türkiye, hidrojen üretim teknolojisinde gerekli araştırma ve geliştirme çalışmalarına başlanıp devam ettirebilirse, ucuz yeşil hidrojen üretebilir ve ithal enerjiye olan bağımlılıktan kurtulabilir.

II. KÜRESEL HİDROJEN ÜRETİMİ VE TÜKETİMİ

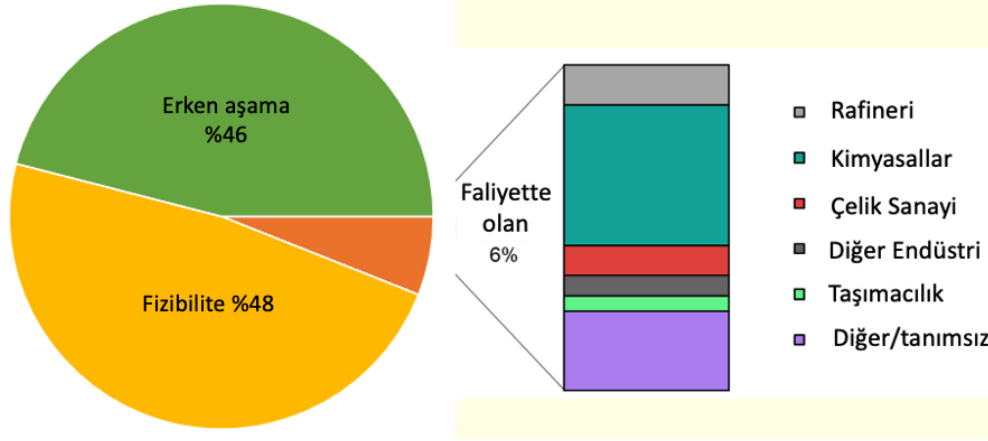
Hidrojenin oluşması için birincil bir enerji kaynağı gereklidir. Bu kaynakların doğasına bağlı olarak hidrojen üretimin çeşitli yöntemleri kullanılmaktadır. Üretilen kaynağa bağlı olarak hidrojen renklere ayrılmıştır. Bunlar "Yeşil hidrojen" yenilenebilir enerji kullanılarak üretilen hidrojeni ; "mavi hidrojen", karbon dioksit (CO₂) yakalama sistemleri kullanılarak fosil yakıtlardan üretilen hidrojeni; "turkuaz hidrojen" piroliz gibi işlemlerle CO₂ içermeyen fosil yakıtlardan üretilen hidrojeni ve "pembe hidrojen" veya doğal hidrojen, nükleer enerji kullanılarak üretilen hidrojeni ifade eder. Gazın yeniden düzenlenmesinden geliyorsa "gri hidrojen", kömürden CO₂ çıkarmak için kullanılan gazlaştırma işleminden geliyorsa "kahverengi hidrojen" olarak adlandırılır. Karbondan arındırılmış hidrojen üretimi, emisyon azaltma hedeflerine ulaşma açısından önemlidir (Amin et al., 2022). Tablo 1 de kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri ve karbon salınımları gösterilmiştir.

2022 yılında dünya çapında yaklaşık 95 mega ton (Mt) hidrojen üretilmiştir. Bu rakam, 2021'e göre %3 artış göstermiştir. Fosil yakıtların aralıksız kullanımı, hidrojen üretimini kontrol altında tutan büyük çoğunluğuna sahiptir. Çoğunlukla Çin'de bulunan azaltılmamış kömür, bu üretimin %21'lik kısmını oluşturmaktadır. Dünya çapındaki hidrojen üretiminin %62'sini karbon yakalama, kullanma ve depolama içermeyen doğal gazdan üretimi oluşturmaktadır. %16'sı, rafinerilerde ve petrokimya sektöründe nafta reformasyonu sırasında ortaya çıkan ve sıklıkla ek rafineri ve dönüşüm işlemleri (hidrokraking ve kükürt giderme gibi) için kullanılan yan ürün olarak oluşan hidrojeni kapsamaktadır (IEA, 2023; IEA, 2023). Şekil 1'de 2030 yılına kadar duruma ve sektöre göre düşük emisyonlu hidrojen üretiminin payı gösterilmektedir. 2030 yılına kadar açıklanan projelerde inşaatı devam eden veya nihai yatırım kararı alınmış olan projeler, üretim bazında açıklanan projelerin yalnızca %6'ünü oluşturmaktadır (IEA, 2024).

Bu projelerin neredeyse yarısı rafineriler ve kimya endüstrisindeki mevcut hidrojen kullanımlarıyla bağlantılıdır. Açıklanan hidrojen üretim projeleri arasında elektrolizör projeleri öne çıkmaktadır: 2030'da düşük emisyonlu hidrojen üretiminin %70'inden fazlası elektrolizden geleceği öngörülmektedir. Ancak açıklanan elektrolizör projelerinin %55'i geliştirmenin ilk aşamasındadır. Bu projelerin daha da geliştirilmesinin zaman alacağı göz önüne alındığında, önümüzdeki yıllarda gerçekleştirilecek çabalar bu projelerin 2030 yılına kadar faaliyete geçmesini sağlamak açısından kritik öneme sahip olacaktır (IEA, 2024).

Tablo 1. Kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri ve karbon salınımları (SBB, 2023; IEA, 2024;ETKB, 2023a).

Hidrojen Çeşidi	Üretim yöntemi	Enerji kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO ₂ /kgH ₂)	Maliyet (ABD doları/kgH ₂)
Yeşil	Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
Pembe/Sarı	Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
Mavi	Buhar metan reformu	Doğal gaz ve kömür	<4	1,5-3,00
Turkuaz	Piroliz	Fosil yakıt	<3	1,25-2,20
Gri	Buhar metan reformu	Doğal gaz	8-10	0,5-1,70
Kahverengi	Gazlaştırma	Kömür	>20	1,0-2,2



Şekil 1. 2030 yılına kadar duruma ve sektöre göre düşük emisyonlu hidrojen üretimi

Not: "Fizibilite", fizibilite çalışması yapılan projeleri kapsar; "Erken aşama", yalnızca paydaşlar arasında bir iş birliği anlaşmasının açıklandığı projeler gibi çok erken aşamalarda projeleri içermektedir. "Diğer/tanımsız", kullanımı belirtilmeyen projeleri ve diğer hidrojen kullanımlarını içermektedir (IEA, 2024).

Hidrojen tüketimi incelendiğinde, 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 konumundadır. 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 civarındaki tüm yakıt hücreli kamyonların %95'inden fazlasını Çin'dedir. 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. 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. 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 dolardır (IEA, 2023; IEA, 2024).

Türkiye ve dünyada enerji kullanımındaki artış göz önüne alındığında hidrojenin çevre üzerinde önemli bir etkisi olacaktır. Mevcut tahminlere göre, 2030 yılına gelindiğinde endüstriyel uygulamaların ve gaz ağlarının daha fazla düşük karbonlu hidrojene ihtiyaç duyacağı tahmin edilmektedir. Denizcilik, havacılık ve demir-çelik endüstrilerinde daha uzun vadeli kullanımlar öngörülmektedir (ETKB, 2023a; TSKB, 2023).

Hidrojen, doğrudan uygulamasının yanı sıra, yakıt olarak ve birçok endüstriyel süreçte kullanım açısından büyük potansiyele sahip metanol ve amonyak gibi bileşiklerin yapımında da kullanılabilir. Bu hidrojen türevli yakıtlar, taşımaları ve depolamaları daha kolay olduğundan, belirli senaryolarda ve belirli kullanımlar için daha caziptir. Sanayi sektörü üretilen hidrojenli kimyasallar, demir-çelik, çimento, cam ve seramik gibi şeyler için kullanılmaktadır. Bu kimyasallar gaz türbinlerinde olduğu gibi, doğrudan saf veya doğal gazla birlikte kullanılabilir. Ayrıca uzay projelerinde, ulaşım, ev ve endüstriyel kullanımda ve uçaklarda yakıt hücresi uygulamalarında da kullanılmaktadır.

III. KÜRESEL PROJE, VİZYON VE HEDEFLER

Avrupa Birliği'nin uzun vadeli hedefleri arasında, Avrupa'nın enerji tüketimindeki hidrojen oranının 2050 yılına kadar %13-14'e çıkarılması planlanmaktadır (Energy, 2020). Bu stratejilerin kapsamına giren teknolojilerde uzmanlık geliştirerek ve başvuruları tamamlayarak bu hedeflere ulaşmak ve dünya çapında rekabetçi olabilmek amacıyla, AB'nin altıncı büyük ticaret ortağı ve küresel yenilenebilir enerji sektörünün önemli bir katılımcısı olan Türkiye, hidrojen alanında net bir ulusal strateji sunmaya çalışmaktadır. Avrupa Komisyonu'na üye ülkeler tarafından Mart 2022'de açıklanan REPowerEU Planı'na göre fosil yakıtlardan bağımsızlığa ulaşmak için 2030 yılına kadar 10 milyon ton yeşil hidrojen üretilip ithal edilmesi gerekmektedir. Bu teklif ile 2030 yılına kadar 65-80 GW Kurulu elektrolizör kapasitesi hedeflenmiştir (Commission Europa, 2023). Tablo 2 de çeşitli ülkelerinin ve Türkiye'nin yeşil hidrojen üretimi doğrultusunda elektrolizör kapasite hedefleri verilmiştir.

Tablo 2. Ülkelerin elektrolizör ve yeşil hidrojen kapasite hedefleri (ETKB, 2023a; World-Nuclear, 2023; IEA, 2022)

Ülkeler	Mevcut Durum ve Hedefler
Almanya	2030 yılı için planlanan elektrolizör kapasitesi on gigawatt'tır. Bu elektrolizör kapasitesini korumak için 20 TWh yenilenebilir enerji (güneş veya rüzgardan) gerekmektedir.
İngiltere	2030 yılına kadar 10 GW düşük karbonlu hidrojen üretilmeli ve elektrolitik hidrojen, toplamın en az yarısını oluşturmalıdır.
İspanya	2030 yılı elektrolizör kapasite hedefi 4 GW'tır.
Avustralya	2030 yılına kadar tamamlanması planlanan projelere göre, yaklaşık 50 GW'lık bir elektrolizör kapasitesi öngörülmektedir. 2030 yılına kadar 3,8 milyon metrik ton hidrojen, yani yaklaşık 9,5 milyar Avustralya doları ihraç etme hedefleniyor.
Fransa	2030 yılı için hedef elektrolizör kapasitesi 6,5 GW'tır. Gri hidrojen, 2020 yılı itibarıyla ton CO başına 44,6 euro karbon vergisine tabi olacaktır.
Hollanda	2030 yılına kadar 3-4 GW'lık elektrolizör kapasitesi kurulmalıdır. Hedefler 50 hidrojen dolum istasyonu, 15.000 yakıt hücresi araç ve 3.000 kamyonudur.
Danimarka	2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasite hedefi 4-6 GW'tır.

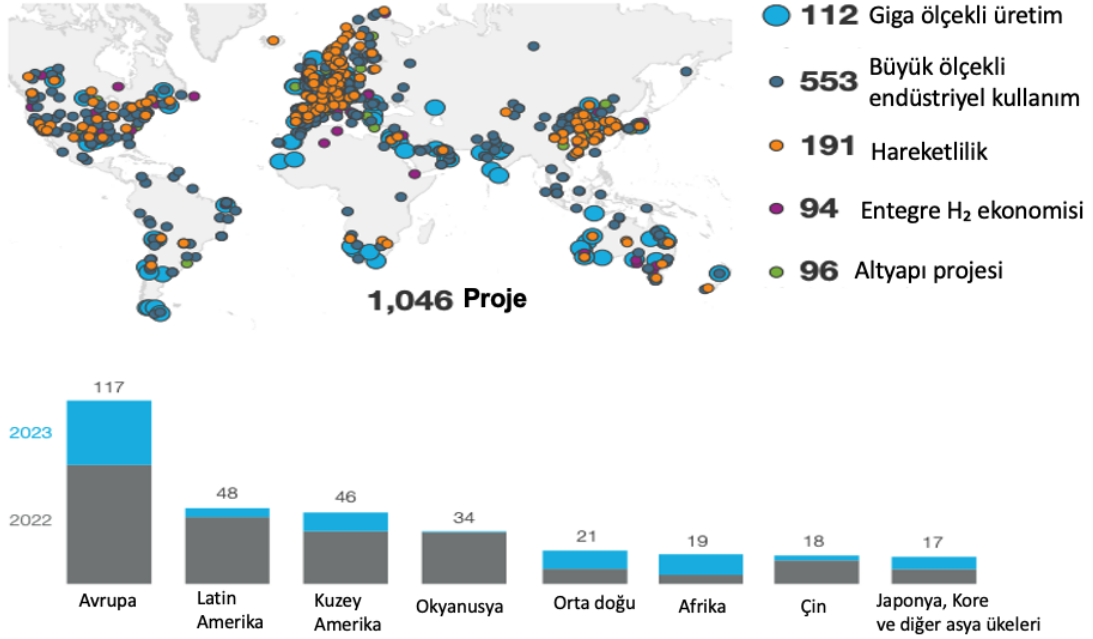
İsveç	2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasite hedefi 5 GW'tır.
Polonya	2030 yılına kadar kurulu elektrolizör kapasite hedefi 2 GW'tır.
Türkiye	Elektrolizörün kurulu güç kapasitesinin 2030'da 2 GW'a, 2035'te 5 GW'a, 2053'te ise 70 GW'a çıkması bekleniyor.
İtalya	2025 yılına kadar 100 MW'lık elektrolizör kurmayı hedefliyor.
Tazmanya	Bell Körfezi'nde hidroelektrik kullanarak 250 MW'lık bir yeşil hidrojen tesisi kurma planlanıyor.
Umman	16 GWe rüzgâr ve 10 GWe güneş kapasitesinden elektroliz yoluyla 1,75 Mt/yıl hidrojen üretilmesi hedefleniyor. İlk üretimin 2028'de yapılması bekleniyor ve kapasite 2038'e çıkması planlanıyor.
Suudi Arabistan	Yılda 237.000 ton yeşil hidrojen ve ardından 2025 yılına kadar yeşil amonyak üretmek için 4 GWe yenilenebilir enerji kullanılması planlanıyor.
Norveç	Nel, Heroya'da 2021 sonlarından itibaren hem AE hem de PEM tipinde, yaklaşık 500 \$/kW fiyatla yılda 500 MW'lık elektrolizör üretmeye hazırlanıyor. 2 GW/yıl'a genişlemeyle birlikte 300 \$/kW'ı hedefliyor.
Kanada	Kanada'da Hydro-Quebec, Quebec'teki Varennes için ThyssenKrupp'tan 88 MW'lık bir elektrolizör sipariş edilmiştir. 2023 yılının sonlarında devreye alınmasının ardından, nakliye yakıtları için bir biyofineriye 11.000 ton/yıl hidrojen tedarik edilmesi bekleniyor.

Yeşil hidrojen kapasite hedefleri doğrultusunda Avrupa'da ön sıralarda İspanya, Danimarka, Almanya ve Hollanda yer almakta ve bu dört ülke, Avrupa'nın elektrolitik hidrojen üretiminin neredeyse %55'ini oluşturmaktadır. Güneş, PV ve rüzgar için iyi yenilenebilir kaynaklarından yararlanan Avustralya'nın su elektrolizi yoluyla düşük emisyonlu hidrojen üretimi, 2030 yılına kadar 4 Mt'a yakın bir seviyeye ulaşabilir. Umman'da elektrolizden elde edilen hidrojen üretimi, duyurulan projelere göre 2030 yılına kadar neredeyse 2 Mt'a ulaşması beklenmektedir. Çin, yeşil hidrojen için Avrupa kadar agresif hedefler koymamıştır ancak 2020'de hidrojenle ilgili politika ve hedefler belirgin şekilde artmıştır. Şirketler, üniversiteler ve araştırma enstitülerinden oluşan Çin Hidrojen İttifakı, 2019 yılında hidrojen üretiminin çoğunluğunun ilerleyen yıllarda fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye kayacağını öngörmüştü. Çin'in yılda 22 milyon tonluk hidrojen üretiminin çoğu (dünyadaki toplam temiz hidrojenin üçte biri) kömürden, yalnızca %3'ü ise yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır (World-nuclear, 2023). Şekil 2'de 2030 yılına kadar 1 MW'tan büyük projelerin geliştirilmesi için gerekli hidrojen yatırımları gösterilmektedir. Son açıklanan bilgilere göre Çin'de pek çok proje şu anda inşaat halindedir (üretim seviyesinin neredeyse %40'ı) ve gelecekte daha fazla proje gelişmesi beklenmektedir. Afrika'da ise duyurulan elektrolizör projelerinden hidrojen üretimi 2030 yılına kadar 2 Mt'a ulaşması hedeflenmektedir. Kenya, Moritanya, Fas, Namibya ve Güney Afrika'da elektrolizör kapasitesi 100 MW veya üzerinde olan 20'den fazla proje açıklanmıştır (World-Nuclear, 2023).

Avrupa Kalkınma ve Yatırım Bankası (EBRD), hidrojen değer zincirinin tüm segmentlerine dair olan bütün çalışmalara, öz sermaye yatırımı, garantiler, harman finansman, ayrıcalıklı finansman gibi değişik enstrümanlar ile bu alanda projelere 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. Mısır Afrika'daki ilk entegre yeşil hidrojen tesisi olacak 100MW'lık elektrolizör tesisi için gerekli yatırıma 80 milyon ABD doları finansman sağlama adımını atmıştır. Dünya Bankası Grubu, Enerji Sektörü Yönetim Yardımı Programı 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 (Hydrogencouncil, 2023). Bu bilgiler ışığında yeşil enerjiyi teşvik etmek, uluslararası ortaklıklar kurmak, ticari talebi ve yatırımları teşvik edecek kamu-özel sektör iş birliklerinin oluşturulması, nitelikli işgücünün geliştirilmesi, yeşil hidrojenin tüm sanayilerde kullanımının teşvik edilmesi gibi politikaların belirlenmesi büyük önem taşıyor.

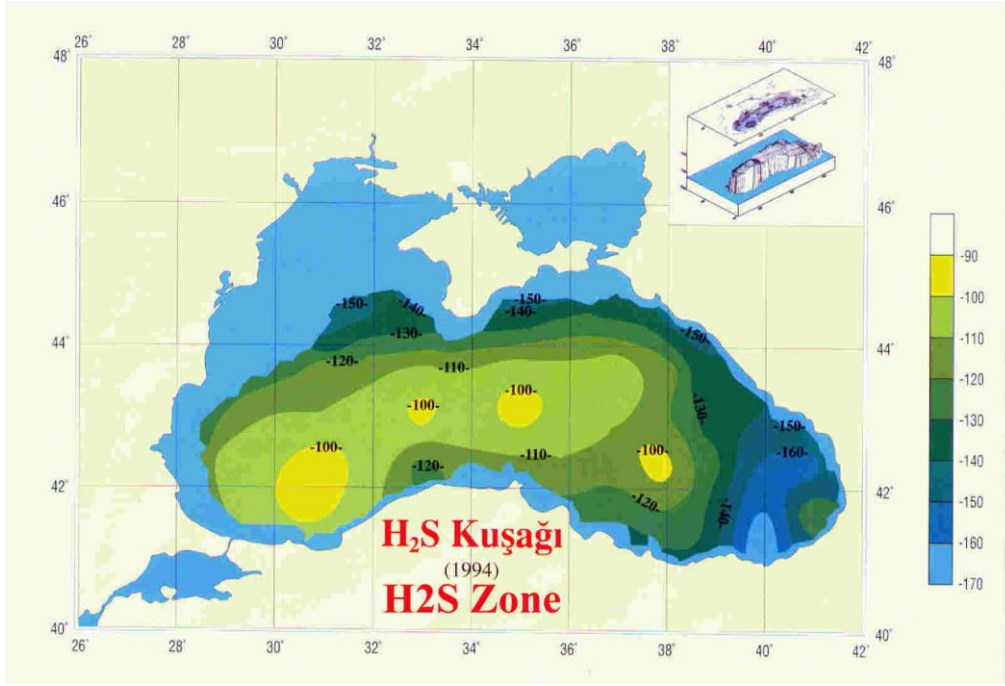
Bu doğrultuda Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmesi için hidrojen enerjisi ve teknolojisinde yetkinleşmesi gerektiği belirlenmiştir. Ek olarak, mevcut bilgi birikiminin ticarileştirme sürecine uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2. 2030 yılına kadar duyurulan 1 MW'tan büyük projelerin geliştirilmesi için gerekli hidrojen yatırımları (Hydrogencouncil, 2023).

IV. TÜRKİYE'DEKİ HİDROJEN ENERJİSİ GELİŞMELERİ

Türkiyede 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 (Resmî Gazete, 2007). Türkiye, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) da desteği ile 2011 yılında "Bozcaada Hidrojen Adası Projesi" gerçekleştirilmiştir. Ekim 2011 tarihinde devreye giren proje ile Bozcaada Kaymakamlık binası ve sağlık ocağının elektrik ihtiyacı üretilen hidrojen ile karşılanmıştır. Buna rağmen projenin devamı getirilmemiştir ve hidrojen üretimi sonlandırılmıştır. Ayrıca, 2011 yılında hidrojen yakıtlı araçlara ilişkin bir yönetmelik çıkarılmıştır. Söz konusu yönetmelikle, hidrojen yakıtıyla çalışan araçların tip onayına yönelik düzenleme yapılmıştır ve bu araçların bir süre sonra gündeme olacağı beklentisiyle bir ön hazırlık gerçekleştirilmiştir. 2020 yılı ocak ayına kadar hidrojen, Türkiye'nin enerji politikalarında yerini alsada ciddi bir ilgi görmemiştir. 2000'li yıllarında başında ulusal program belgelerinde 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 (ETKB, 2023a).



Şekil 3. Karadeniz'de var olan H₂S Dağılımı (Kastamonu Gazetesi, 2023).

Bazı tahminlere göre, Karadeniz'in dip sularındaki aşırı kirliliğin ürettiği hidrojen sülfür miktarı, bölgenin 350 yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek miktarda olduğu keşfedilmiştir. Uzun bir kıyı şeridine sahip olan Karadeniz'in dibinde kimyasal olarak depolanan hidrojen nedeniyle Türkiye'nin hidrojen üretme olasılığı yüksek olduğu öngörülmüştür (Bakınız Şekil 3.). Bilim insanları, Karadeniz'in dip sularından hidrojen sülfürün tamamen ayrıştırılması durumunda 268 milyar 823 milyon ton hidrojen elde edilebileceğini öngörmüşlerdir. Karadeniz Bölgesi'nde 10 milyon ailenin ikamet ettiği ve ortalama bir hanenin yıllık enerji tüketiminin 3600 kWh olduğu varsayıldığında kitlenin toplam yıllık enerji ihtiyacının 36 milyar kWh olacağı belirlenmiştir. Bu enerji ihtiyacının tamamının Karadeniz'in dip sularından çekilen hidrojen yakıtı ile karşılanması halinde, bu bölgenin enerji ihtiyacının yaklaşık 180 yıl boyunca karşılanabileceği tahmin edilmektedir. Bu keşifin ardından bu bölgelerde hidrojen yatırımı yapılmaya başlanmıştır (Kastamonu Gazetesi, 2023).

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. 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 (GMKA, 2023).



Şekil 4. Türkiye'nin HYSouthMarmara Projesi kapsamında belirlenen İlk Yeşil Hidrojen üretim hattı (GMKA, 2023).

Türkiye'de atılan en önemli adımlardan biri HYSouthMarmara (Güney Marmara Hidrojen Kıyısı) projesidir. Şekil 4'te Türkiye'nin HYSouthMarmara Projesi kapsamında belirlenen İlk Yeşil Hidrojen üretim hattı gösterilmektedir. Ufuk Avrupa Çerçeve Programı kapsamında hak kazanılan 8 milyon Euro hibe desteğinden sonra vadiye ve bölgenin hidrojen ekonomisine yerli ve yeni bir katkı daha sunması beklenmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü koordinasyonunda çalışan Güney Marmara Kalkınma Ajansı tarafından hibe desteği sağlanan ve Eti Maden ile Enerjisa Üretim'in eşfinansman sağladığı projenin sözleşmesi 15 Mart 2023 tarihinde imzalanmıştır. Tamamlanması beş yıl sürmesi beklenen projenin performansı nedeniyle Türkiye, ülke tarihindeki en büyük ödül olan ve Türkiye Çerçeve Programları açısından bir ilk olan 8 milyon Euro'luk AB hibesini almıştır. Projenin hayata geçirilmesiyle 2053 yılına kadar TR22 Güney Marmara Bölgesi, Türkiye'de karbon nötr ekonomiye ulaşan ilk bölgeler arasında yer alacaktır. Bölge aynı zamanda hidrojen ve türevlerini Avrupa'daki ülkelere ihraç etme konusunda da üst sıralarda yer almaya aday olacaktır. Bu projeye, Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin %13'ünü üreten ve yenilenebilir enerji kurulu gücü 3 GW'ı aşma yolunda ilerleyen bölgedeki hidrojen ekonomisi büyüyecektir. Bu girişim ile yeşil hidrojenin yanı sıra sıvı ve katı hidrojen türevlerinin de üretilmesi planlanmaktadır. Projenin amaçlarından biri, Türkiye'nin ithal ettiği metanol ve amonyak dahil üzere hidrojen türevlerini üretmek için sürdürülebilir teknolojilerin ve yerel kaynakların kullanılmasıdır. Proje kapsamında eş zamanlı olarak Türkiye'nin ilk sodyum borat hidroksit tesisi de geliştirilecektir (ETKB, 2023a; GMKA, 2023).

V. SONUÇLAR VE TARTIRŞMA

A. İhtiyaç ve Çözümler

Yeşil hidrojen ve yenilenebilir enerji teknolojileri, dünya çapındaki teknolojik trendlere göre hem dijital hem de yeşil dönüşümü kolaylaştıran yenilikçi araçlardır. Hidrojenin potansiyel olarak kritik rolü dünya çapında ve Türkiye'de artmaktadır. Bu nedenle hidrojenin geleceğine yön verecek strateji belgeleri ve yönetmelik çalışmaları artarak devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda hidrojenin üretilmesinden son kullanımına kadar devam eden tüm süreçleri kapsayan değer zincirindeki mevcut boşluklar üzerinde fazlaca durulmaktadır. Özellikle net sıfır emisyonla ulaşmadaki önemli argümanlardan biri olan hidrojenin hayatımıza büyük bir değer katacağı bilinmektedir. Hidrojen teknolojileri konusunda tüm paydaşlarla birlikte ulusal ve yerel yönetimler arasında bilgi alışverişi için forumların oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Söz konusu teknolojiler, ekosistemde bulunan birçok oyuncuyu ilgilendirdiğinden, konu hakkında tüm paydaşların dahil edilerek bilgilendirilmesi ve kapsayıcı çalışmaların yapılması önemlidir. Hidrojen altyapısının; mevzuat ile belirlenecek düzenlemeleri

uygulayacak, teknoloji geliştirecek ve geliştirilmesine fon sağlayacak, depolama ve dağıtım sorumluluğunu taşıyacak tüm oyuncuların etkili iletişim içinde bulunarak başarılı bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Türkiye’de yerli bir yeşil hidrojen piyasasının gelişmesi için mevcut mevzuatı uygun hâle getirerek hidrojenden elde edilecek enerji ile ilgili gelecek öngörüsü ile birlikte yeşil hidrojenin üretim, dağıtım, depolama ve son kullanım süreçleri hususunda uluslararası standartlarla uyumlu teknik standartların geliştirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, önümüzdeki yıllarda hidrojen teknolojilerinin gerekli seviyelerde etkin bir şekilde benimsenmesini sağlamak için yürütülecek çalışmaların sinerjik bir yapıda sürdürülmesi gerekmektedir. Dünyada yapılan çalışmalar ile Türkiye’nin ihtiyaç ve çözüm önerileri değerlendirilerek hazırlanan hedefler ve politikalar aşağıda sunulmuştur (SBB, 2023; ETKB, 2023a; IRENA, 2022a).

Bunlar ;

- Elektrolizör teknolojisinin yerleştirilmesi ve millileştirilmesi için sistem alt bileşenlerinin ArGe/Ür-Ge çalışmalarıyla pilot tesis ve ticari ölçeğe taşınması gerekmektedir.
- Elektrolizörlerin üretimine yönelik eksiklikler tespit edilecek ve bu kapsamda özel proje çağruları oluşturularak elektrolizörlerin geliştirilmesi sağlanacaktır. Bu sayede elektrolizör teknolojilerinde dışa bağımlılık ortadan kalkacaktır.
- Yakıt hücresi teknolojisinin yerleştirilmesi ve millileştirilmesi için sistem alt bileşenlerinin Ar-Ge/ Ür-Ge çalışmalarıyla pilot tesis kurulması ve sonrasında ticari ölçeğe taşınması Yerli kaynaklardan (doğal gaz, linyit ve organik atıklar) hidrojen üretim çalışmalarının yapılması Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretecek sektör oluşturulması gerekmektedir.
- Hidrojen bazlı motorlar ve yakıt hücreleri ile bunların bileşenleri için teknoloji ve yatırım yaratılmasına yönelik araştırmalar yapılacak.
- Yakıt hücreleri ile ilgili çalışan firmalar, akademisyenler, araştırma merkezleri ve girişimciler buluşturulacak, ihtiyaçlar belirlenecek ve iş birlikleri oluşturulacaktır.
- Yakıt hücresi üretiminde gerekli olan nadir element kategorisindeki ham maddelerin ülke içindeki rezervlerinin belirlenmesi ve geleceğe dönük üretimlerinin aksamaması adına önceden planlama yapılarak ihtiyaç miktarına göre tedarik zincirinin oluşturulması gerekmektedir.
- Linyitten hidrojen üretimi ile ilgili mevcut durum ve gerekli altyapı ve destekler tespit edilecektir. Bu sayede hidrojen ihtiyacının bir bölümü karşılanırken, yerli kömür gazlaştırma ve hidrojen üretim teknolojileri de geliştirilmiş olacaktır.
- Başta amonyak ve hidrojen olmak üzere kimyasal ve yakıt üretimine yönelik yeşil teknolojiye dayalı yatırımlar teşvik edilmelidir.
- Gazlaştırma ile hidrojen üretilen organik atıkların envanteri yapılacak, gerekli destekler ve altyapı belirlenecektir. Ülkenin mevcut yerli kaynakları ve organik atıklar en verimli şekilde kullanılarak hidrojen üretilmesi için pilot tesislerin faaliyete geçirilmesi, teknoloji seviyesinin yükseltilmesi, bu konuda yan sanayi kabiliyetlerinin geliştirilmesi ve akademik araştırmaların artırılması sağlanacaktır.
- Yenilenebilir enerji santralleri ile bütünleştirilmiş hidrojen üretim tesislerinin kurulması; verimlilik, depolama, iletim ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlayacaktır. Uygun maliyetli yeşil hidrojen üretimi için rüzgâr, güneş ve hidroelektrik enerjisi potansiyeli yüksek sahaların hidrojen üretim bölgeleri olarak belirlenmesi önem arz etmektedir.

B. Hidrojenin Üretiminin Artırılmasının Önündeki Engeller

Aşağıdaki engeller şu anda temiz hidrojenin enerji dönüşümüne daha büyük bir katkı yapmasını engellemektedir (SBB, 2023; IRENA,2022b; ETKB, 2023b):

- Maliyet: Temiz hidrojenin, özellikle de yeşil hidrojenin maliyeti, yüksek karbonlu yakıtlara göre hala yüksektir. Sadece üretim maliyeti değil, hidrojenin taşınması, dönüştürülmesi ve depolanmasının maliyetleri de yüksektir.
- Temiz hidrojen teknolojilerinin son kullanımlar için benimsenmesi pahalı olabilir ve CCS henüz geniş ölçekte kullanıma sunulmamıştır.

- Teknolojik olgunluk: Hidrojen değer zincirinde karbondan arındırma için gereken bazı teknolojilerin teknolojik hazırlığı hala düşük seviyededir ve geniş ölçekte kanıtlanması gerekmektedir.
- Verimlilik: Hidrojen üretimi ve dönüşümü, üretim, taşıma, dönüşüm ve kullanım da dahil olmak üzere değer zincirinin her aşamasında önemli enerji kayıplarına neden olur. Üstelik mavi hidrojenin üretimi enerji yoğun olduğundan genel enerji talebini artırıyor.
- Yeterli yenilenebilir elektrik: 2050 yılına kadar elektrolizörlerle hidrojen üretimi için elektrik tüketimi 21.000 TWh'ye yakın – bu neredeyse bugün küresel olarak üretilen elektrik kadardır (IRENA, 2022a). Daha fazla son kullanım sektörü elektrikli hale geldikçe, yeterli miktarda yenilenebilir elektriğin bulunmaması, yeşil hidrojen için bir darboğaz haline gelebilir.
- Politika ve mevzuat belirsizliği: Her ne kadar 140'tan fazla ülke önümüzdeki yıllarda net sıfır emisyonla ulaşma sözü vermiş olsa da bu hedeflere ulaşma hızı belirsizliğini koruyor.
- Standartlar ve sertifikasyon: Ülkeler, hidrojenin herhangi bir tonunun üretimini ve tüketimini takip edecek ve özelliklerini (örneğin menşei ve yaşam döngüsü emisyonları) tanımlayacak kurumsallaşmış mekanizmalardan yoksundur. Üstelik hidrojen resmi istatistiklerde sayılmıyor toplam nihai enerji tüketimi ve temiz hidrojenin emisyon azaltımlarına katkısının ekonomik değeri kabul edilmiyor.
- Talep olmadan, maliyetleri azaltılabilecek geniş ölçekli üretim için yatırımlar çok riskli olmaya devam ediyor, ancak ölçek ekonomisi olmadan teknoloji çok maliyetli olmaya devam ediyor.

KAYNAKLAR

- Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Rahman Farooqi, Z. U., & Lee, C. (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 33112–33134.
- Commission Europa. (2023). [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en
- Energy. (2020). [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf
- ETKB. (2023a). [Online]. Available: https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKBHidrojenStratejik_Plan2023.pdf
- ETKB. (2023b). [Online]. Available: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerjide-arama-etkinlikleri-ve-belgeler>
- GMKA. (2023). [Online]. Available: <https://www.gmka.gov.tr/haber/turkiyenin-ilk-yesil-hidrojen-vadisi-kuruluyor>
- Hydrogencouncil. (2023). [Online]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>
- IEA. (2022). [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>
- IEA. (2023). [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- IEA. (2024). [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/northwest-european-hydrogen-monitor-2024/executive-summary>
- IEA. (2023). [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/Information-Library/Energy-and-the-Environment/Hydrogen-production-and-uses>
- IRENA. (2022a). [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>
- IRENA. (2022b). [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a
- Kastamonu Gazetesi. (2023). [Online]. Available: <https://www.kastamonugazetesi.com.tr/karadenizde-dev-enerji-kaynagi/>
- Resmi Gazete. (2007). [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.html>
- SBB. (2023). [Online]. Available: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf
- TSKB. (2023). [Online]. Available: <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/bilgi-notu-guncelleme-hidrojen-enerjisi-final.pdf>
- World-Nuclear. (2023). [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/Information-Library/Energy-and-the-Environment/Hydrogen-production-and-uses>