



**TÜRKİYE'DE
YENİLENEBİLİR HİDROJENİN
ETKİNLEŞTİRİLMESİ**

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Hakkında

Avrupa İklim Vakfı (ECF), Agora Energiewende ve İstanbul Politikalar Merkezi (IPC) tarafından Sabancı Üniversitesi'nde kurulan SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, yenilikçi bir enerji dönüşümü platformu aracılığı ile enerji sektörünün karbonsuzlaşmasına katkıda bulunmaktadır. Türkiye enerji sektörünün teknolojik, ekonomik ve politik boyutlarının tartışılması için sürdürülebilir ve geniş çapta tanınan bir platform ihtiyacını karşılamak için çalışmaktadır. SHURA, gerçeklere dayalı analizleri ve bulunabilen en doğru verileri kullanarak enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji vasıtasıyla düşük karbonlu bir enerji sistemine geçiş üzerindeki tartışmaları desteklemektedir. Birçok paydaşın konuya ilişkin bütün bakış açılarını dikkate alarak bu geçişin ekonomik potansiyeli, teknik fizibilitesi ve ilgili politika araçlarına yönelik bir anlayışın oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

Yazarlar: Hasan Aksoy, Rafet Yağız Çalışkan (SHURA).

Teşekkürler

Raporun hazırlanma sürecinde paydaş katılım toplantılarına katılarak vermiş oldukları değerli katkılar için Burak Baykal'a (TTGV), Can Erkey'e (Koç Üniversitesi), Cansu Atılğan'a (GMKA), Çağatay Ölken'e (TÜPRAŞ), Dursun Baş'a (Sabancı Üniversitesi, İstanbul Politikalar Merkezi), Eren Yiğit'e (AKFEN), Fatih Kuşçu'ya (H2DER), Hilal Gümüşlü'ye (TENMAK), Hüseyin Devrim'e (TEK-SİS), İskender Gökalp'e (ODTÜ), Pauline Seyfert'e (Adlera Group), Selmiye Alkan Gürsel'e (Sabancı Üniversitesi), Tuğba Onur Dalgöğüşoğlu'na (TEK-SİS) teşekkür ederiz.

Raporun hazırlanma sürecinde sağlamış oldukları değerli geri bildirimleri için SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Direktörü Alkım Bağ Güllü'ye, SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Kıdemli Enerji Analisti Dr. Sena Serhadlıoğlu'na ve Agora Energiewende Hidrojen Proje Sorumlusu Emir Çolak'a teşekkür ederiz.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, ECF'in bu rapor için sağladığı cömert finansmana müteşekkirdir.

Bu rapor, www.shura.org.tr sitesinden indirilebilir.

Daha ayrıntılı bilgi almak veya geri bildirimde bulunmak için info@shura.org.tr adresinden SHURA ekibiyle temasa geçiniz.

Tasarım

Tasarımhane Tanıtım Ltd. Şti.

Telif Hakkı © 2026 Sabancı Üniversitesi

ISBN 978-625-6956-88-9

Sorumluluk Reddi

Bu rapor ve içeriği, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş kabuller, senaryolar ve 2025 sonu itibarıyla mevcut olan piyasa koşulları doğrultusunda hazırlanmıştır. Bu kabullerin, senaryolar ve piyasa koşullarının değişime açık olması nedeniyle, rapor kapsamındaki gelecek dönem öngörülerinin, gerçekleşecek sonuçlarla aynı olacağı garanti edilemez. Bu raporun hazırlanmasına katkı yapan kurum ya da kişiler, raporda sunulan öngörülerin gerçekleşmemesi ya da farklı şekilde gerçekleşmesinden dolayı oluşabilecek ticari kazanç ya da kayıplardan sorumlu tutulamazlar.

**TÜRKİYE'DE
YENİLENEBİLİR
HİDROJENİN
ETKİNLEŞTİRİLMESİ**



İÇİNDEKİLER

Şekil Listesi	4
Tablo Listesi	4
Kısaltmalar	5
Ana mesajlar	6
Giriş	7
Türkiye’de yenilenebilir hidrojen gelişiminin önündeki zorluklar ve fırsatlar	10
1. Hidrojen Üretimi	11
Türkiye’nin hidrojen üretimi açısından önündeki zorluklar ve fırsatlar	12
1.1 Piyasa belirsizliği ve talep eksikliği	12
1.2 İnsan kaynağı	12
1.3 Yenilenebilir enerji arzı ve elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabet	12
1.4 Yenilenebilir hidrojene yönelik düzenleyici çerçevenin eksikliği	13
1.5 2053 net sıfır emisyon hedefi ve yenilenebilir enerji potansiyeli	13
1.6 Yeni yatırım fırsatları sunan bir pazar alanı	14
1.7 Yenilenebilir hidrojen vadileri	15
1.8 Hidrojenin ihracat potansiyeli	15
1.9 Yenilenebilir hidrojenin üretim maliyeti	16
2. Piyasa Oluşumu ve Finansman	18
Türkiye’de hidrojen piyasası oluşumu ve finansmanı açısından zorluklar ve fırsatlar	19
2.1 Teşvik ve destek mekanizmaları	19
2.2 Yüksek yatırım maliyetleri	20
2.3 Karbon fiyatlaması ve sertifikasyon	20
2.4 Mevcut piyasa tecrübesi ve altyapısı	20
2.5 AB ile entegrasyonu derinleştirme fırsatı	21
3. Altyapı ve İhtiyaçlar	23
Altyapı ve ihtiyaçlar bağlamında Türkiye’nin önündeki zorluklar ve fırsatlar	24
3.1 Ulaştırma sektöründe hidrojen altyapısı gelişimi	24
3.2 Hidrojen dolum istasyonları	24
3.3 Elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabet	24
3.4 Yenilenebilir enerji potansiyeli ve elektrik sistemi altyapısı	25
3.5 Mevcut doğal gaz boru hattı altyapısı ve tecrübesi	26
3.6 Coğrafi konum ve su kaynaklarına erişim	26
3.7 Depolama altyapısı	27

4. Hidrojenin Son Tüketim Noktaları	30
Son tüketim noktaları kapsamında Türkiye’nin önündeki zorluklar ve fırsatlar	31
4.1 Üretim proseslerinde değişiklik gereksinimi	31
4.2 Üretim ve tüketim noktalarının uzaklığı	32
4.3 Depolama ihtiyacı	33
4.4 Yeni yatırım ve maliyet	33
4.5 Gemi ve havayolu taşımacılığında yenilenebilir hidrojen türevlerinin tüketimi	33
4.6 Demir-çelik sektöründe EAF teknolojisinin durumu	34
4.7 Mevcut gri hidrojen talebi	35
4.8 Organize Sanayi Bölgeleri (OSB)	35
5. Standartlar	36
Standartlar kapsamında Türkiye’nin önündeki zorluklar ve fırsatlar	37
5.1 Küresel standartlaşma sürecine uyum	37
6. Teknoloji Gelişimi	39
Teknoloji gelişimi açısından Türkiye’nin önündeki zorluklar ve fırsatlar	40
6.1 Mevzuat, standartlar ve patent kısıtları	40
6.2 Eğitim ve insan gücü eksikliği	40
6.3 Ar-Ge faaliyetlerine yönelik destek	40
6.4 Sanayi altyapısı	41
6.5 Üniversite, kamu ve özel sektör koordinasyonu	42
7. İhracat ve Uluslararası İş Birlikleri	43
İhracat ve uluslararası iş birlikleri açısından Türkiye’nin önündeki zorluklar fırsatlar	44
7.1 Uluslararası rekabet	44
7.2 Standartların oluşturulması	44
7.3 Stratejik konum	45
7.4 Ulaşım ve lojistik altyapısı	45
7.5 Mevcut iş birlikleri	45
Sonuçlar ve Politika Önerileri	46
Türkiye’de Yenilenebilir Hidrojen Gelişimi İçin Öneriler	48
Referanslar	52
Ekler	57
Ek-A	57

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Yenilenebilir hidrojen ekosistemine giden yolda tematik başlıklar	10
Şekil 2. 2053 yılında türüne göre e-yakıt üretimi ve sektörel tüketimi	14
Şekil 3. Türkiye (Batı bölgeleri) ve AB için yeşil ve mavi H ₂ maliyetleri	17
Şekil 4. Hidrojen piyasası gelişimi için düzenleyici çerçeve örneği	19
Şekil 5. Türkiye'de güneş enerjisi elektrik üretimi, elektrik ve doğal gaz talebinin mevsimsellik değerlendirmesi	28
Şekil 6. Farklı teknolojiler için seviyelendirilmiş hidrojen depolama maliyeti	29

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Hidrojen değer zinciri kapsamında belirlenen ISO standartları	57
--	----

KISALTMALAR

°C	Santigrat derece
AB	Avrupa Birliği
ABD\$	Amerika Birleşik Devletleri Doları
Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
BF-BOF	Yüksek fırın – Bazik oksijen fırını (Blast furnaceBasic oxygen furnace)
BOF	Bazik oksijen fırını (Basic oxygen furnace)
COP27	27. Taraflar Konferansı (27th Conference of Parties)
COP28	28. Taraflar Konferansı (28th Conference of Parties)
DRI	Doğrudan indirgenmiş demir (Direct reduced iron)
EAF	Elektrik ark ocağı (Electric arc furnace)
ECE	Avrupa Ekonomik Komisyonu (Economic Commission for Europe)
ENTSO-E	Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Ağı (European Network of Transmission System Operators)
EPDK	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPIAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FiT	Garantili satın alım tarifeleri (Feed-in-Tariff)
GAZBİR	Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
GAZMER	Doğal Gaz Dağıtım Şirketleri Mesleki Gelişim Merkezi
GW	Gigavat
H ₂	Hidrojen
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
ISO	Uluslararası Standart Organizasyonu (International Standart of Organization)
Kg	Kilogram
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (Liquefied Natural Gas)
Mt	Milyon ton
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
PEM	Proton Değişim Membranı (Proton Exchange Membrane)
SBB	T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
TS	Türk Standardı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TWh	Teravat-saat
UHS	Yeraltı Hidrojen Depolama (Underground Hydrogen Storage)
UN	Birleşmiş Milletler (United Nations)

Ana Mesajlar

- **Eklenebilirlik ilkesine dayalı bütüncül bir düzenleyici çerçeve oluşturulmalıdır.**

Yenilenebilir hidrojen üretiminde eklenebilirlik (additionality) ilkesini esas alan bütüncül bir düzenleyici çerçevenin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, hidrojen üretiminin elektrik sektörünün dönüşümüyle rekabet etmesini önlemek açısından kritik bir rol oynar. Bu kapsamda, hidrojen üretiminde mevcut yenilenebilir santrallerin kullanılmasındansa, öncelikli olarak yenilenebilir hidrojen üretimine tahsis edilmiş yeni yenilenebilir enerji yatırımlarının hayata geçirilmesi gerekmektedir. Böylece, elektrik sisteminin karbonsuzlaşması ve doğrudan elektrifikasyon hedefleriyle oluşabilecek rekabetin önüne geçilmesi mümkün olacaktır.

- **Hidrojen kullanımı, doğrudan elektrifikasyonun yetersiz kaldığı ve yüksek katma değer yaratılan sektörlerle odaklanmalıdır.**

SHURA'nın (2025) analizleri doğrultusunda, kısa ve orta vadede yenilenebilir hidrojenin yeşil amonyak (gübre), demir-çelik, kimya ve petrokimya (rafineriler dâhil) sektörlerinde kullanımı önceliklendirilmelidir. Orta ve uzun vadede ise cam ve seramik sektörleri ile uzun mesafe taşımacılık uygulamaları öne çıkmaktadır. Bu tür stratejik bir önceliklendirme, yenilenebilir hidrojenin ölçeklenmesini destekleyerek maliyetlerin düşmesine, teknolojik öğrenmenin hızlanmasına ve daha geniş sektörlerle yayılımın önünü açacaktır.

- **Yenilenebilir hidrojene yönelik talep, politika mekanizmaları ile oluşturulmalıdır.**

Yenilenebilir hidrojen piyasasının gelişebilmesi için, hidrojeni yakıt veya hammadde olarak kullanacak öncelikli sektörlerle yönelik talep oluşturacak sektörel düzenlemelerin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda geliştirilecek politika mekanizmaları, özellikle Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM)'nden etkilenecek sektörlerin yol haritalarında yenilenebilir hidrojenin benimsenmesini hızlandıracaktır.

- **Yenilenebilir hidrojen için açık, bağlayıcı ve öngörülebilir bir yasal çerçeve tesis edilmelidir.**

Yenilenebilir hidrojenin piyasa koşullarında sağlıklı ve şeffaf şekilde gelişebilmesi için, yasal çerçevede açık ve bağlayıcı bir tanıma kavuşturulması gerekmektedir. Bu tanım; yenilenebilir hidrojenin kapsamını, emisyon standartlarını ve sertifikasyon esaslarını netleştirerek yatırımcılar açısından hukuki belirsizlikleri azaltacak ve uzun vadeli yatırım kararlarını destekleyecektir. Ayrıca, ilerleyen aşamalarda geliştirilecek teşvik mekanizmaları ve piyasa düzenlemeleri için güçlü ve tutarlı bir hukuki zemin oluşturacaktır. Bu doğrultuda, yenilenebilir hidrojene ilişkin idari izin süreçlerini ve ilgili destek mekanizmalarını tanımlayacak, sektörler arası üretim ve gelişim planlarını koordine eden bir kamu biriminin oluşturulması önerilmektedir.

Giriş

Küresel enerji dönüşümü, Paris İklim Anlaşması’nın sanayi öncesi döneme kıyasla ortalama küresel sıcaklık artışını iki (2) santigrat derece (°C) ile sınırlandırma hedefinin merkezinde yer almaktadır. Enerji sektöründen kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonları, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Bu durum enerji sektörünü iklim hedeflerine ulaşmada kritik bir konuma taşımaktadır. Paris Anlaşması’na taraf olan ülkeler, net sıfır emisyonlu bir ekonomiye geçiş doğrultusunda yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, elektrifikasyon ve yeni teknolojileri odağına alan kapsamlı dönüşüm stratejileri geliştirmektedir.

Türkiye de bu küresel dönüşüm sürecine uyum sağlama yolunda önemli adımlar atmıştır. Türkiye, Temmuz 2021’de Yeşil Mutabakat Eylem Planı’nı yayımlamış, Ekim 2021’de ise Paris Anlaşması’na taraf olarak 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefini taahhüt etmiştir. Bu gelişmelerle birlikte Türkiye, iklim ve enerji politikalarını enerji dönüşümü ekseninde yeniden yapılandırma sürecine girmiştir.

Net sıfır emisyonlu bir ekonomiye geçiş sürecinde, enerji dönüşümünün üç temel bileşeni olan yenilenebilir enerji kaynakları, elektrifikasyon ve enerji verimliliği; politika belgelerinde belirlenen kısa ve orta vadeli hedeflerin merkezinde yer almaktadır. Bununla birlikte, yüksek proses ısı gerektiren sanayi süreçleri ile uzun mesafe taşımacılık gibi alanlarda doğrudan elektrifikasyon, mevcut teknolojik kısıtlar nedeniyle yeterli bir çözüm sunmamaktadır. Bu sektörlerin karbonsuzlaştırılabilmesi için yenilenebilir (yeşil) hidrojen gibi alternatif ve tamamlayıcı teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir hidrojen, yüksek sıcaklık gerektiren sanayi uygulamalarında ve ulaşım sektörünün belirli alt segmentlerinde fosil yakıtlara ikame oluşturmalarının yanı sıra, bazı sanayi kollarında hammadde olarak da kullanılabilir. Bu çerçevede yenilenebilir hidrojenin, “karbonsuzlaşması zor” olarak tanımlanan sektörlerde ve uygulamalarda önceliklendirilmesi, hem maliyet etkinliği hem de emisyon azaltımının azami düzeye çıkarılması açısından kritik önemdedir. Bu yaklaşım, yenilenebilir hidrojenin enerji dönüşümünde stratejik bir araç olarak konumlandırılmasını sağlamaktadır.

Türkiye, sahip olduğu yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli ve stratejik coğrafi konumu sayesinde, yenilenebilir hidrojenin üretimi ve kullanımı açısından önemli avantajlara sahiptir. Bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi için, politika dokümanları ve yol haritalarında yer alan hedeflerle uyumlu, somut ve uygulanabilir eylem planlarının geliştirilmesi kritik önemdedir. Bu bağlamda, yenilenebilir hidrojenin sorumlu kurumsal bir yapının oluşturulması, kapsamlı bir düzenleyici çerçevenin tesis edilmesi, uygun teşvik ve destek mekanizmalarının geliştirilmesi, piyasa yapısının kademeli olarak inşa edilmesi, hidrojen talebi yaratacak öncelikli sektörlerin belirlenmesi ve gerekli altyapının planlanarak hayata geçirilmesi gerekmektedir.

Yenilenebilir hidrojen piyasasının oluşumunun ilk aşamalarında, destek ve teşvik mekanizmalarının önemli bir kaldıraç işlevi görmesi beklenmektedir. Mevcut durumda üretim maliyetlerinin henüz rekabetçi seviyelere gerilememiş olması, yatırım kararlarının ertelenmesine ve piyasa gelişiminin yavaşlamasına neden olmaktadır. Buna ek olarak, yüksek finansman maliyetleri, taşıma ve depolama altyapısına ilişkin giderler ile mevcut tesislerin dönüşüm maliyetleri, yenilenebilir hidrojenin yaygınlaşmasının önündeki başlıca yapısal engeller arasında yer almaktadır.

Bütün bunlarla birlikte, yenilenebilir hidrojen üretiminin elektrik sektörünün dönüşüm hedefleriyle çalışmıyacak şekilde planlanması kritiktir. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artması, fosil yakıt kullanımının ve enerji ithalatına bağımlılığın azaltılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle yenilenebilir hidrojen üretimi, mevcut yenilenebilir elektrik kapasitesinin yönlendirilmesi veya ikame edilmesi yerine, yalnızca hidrojen üretimi amacıyla devreye alınacak ilave yenilenebilir enerji yatırımlarına dayandırılmalıdır. Bu yaklaşım, uluslararası literatürde “eklenebilirlik” (additionality) ilkesi olarak tanımlanmakta olup, hidrojenin elektrik sektöründeki karbonsuzlaşma sürecine engel olmadan, bu süreci tamamlayıcı ve destekleyici bir rol üstlenmesini sağlamaktadır. Eklenebilirlik ilkesinin mevzuat tasarımı ve planlama süreçlerinde önceliklendirilmesi, hidrojenin gerçek ve ölçülebilir bir emisyon azaltım aracı olarak konumlandırılmasının ön koşuludur. Bu çerçeveye aynı zamanda, yenilenebilir hidrojenin erken aşamada yaygın ve dağınık kullanım alanlarına yönelmesini engelleyerek, sınırlı yenilenebilir kaynakların stratejik ve maliyet-etkin biçimde değerlendirilmesini mümkün kılacaktır.

Yenilenebilir hidrojenin azami fayda sağlayacağı öncelikli sektörlerde kullanılmasının ardından, oluşabilecek olası üretim fazlasının çevre ülkelere ihraç edilmesine yönelik planlamaların uluslararası standartlarla uyumlu biçimde yürütülmesi gerekmektedir. Bu planlamalar, üretim teknolojilerinden hidrojen değer zincirine ve taşıma yöntemlerine bağlı olarak liman, boru hattı ve diğer lojistik altyapı gereksinimlerine kadar bütüncül bir perspektifi kapsamalıdır. Bu yaklaşım, Avrupa’da gelişmekte olan yenilenebilir hidrojen pazarında Türkiye’nin rekabetçi ve stratejik bir aktör olarak konumlanmasına katkı sağlayacaktır.

Öte yandan, küresel ölçekte yenilenebilir hidrojen projelerinin önemli bir kısmı planlanan takvimlerin gerisinde kalmakta veya ertelenmektedir. 2030 yılına kadar kurulması öngörülen projelere dayalı düşük emisyonlu hidrojen üretimi beklentisinin, iptaller ve gecikmeler nedeniyle son bir yılda 49 milyon ton (Mt) seviyesinden 37 Mt’a gerilediği belirtilmektedir. Bu düşüşün %80’inden fazlasının yenilenebilir hidrojen üretimini kapsayan ve elektrolizör teknolojisini içeren Afrika Kıtası, Amerika Kıtası, Avrupa Kıtası ve Avustralya’daki projeler olduğu açıklanmıştır (IEA, 2025). Yetersiz altyapı, düzenleyici çerçevenin eksikliği, teknolojik olgunluğun sağlanamaması ve yüksek üretim maliyetleri bu gecikmelerin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Ayrıca karbon fiyatlandırması gibi piyasa mekanizmalarının ve teşvik mekanizmalarının sınırlı kalması, kısa vadede yenilenebilir hidrojen talebinin oluşmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çerçevede, Türkiye’nin küresel ölçekteki politika, piyasa ve teknoloji gelişmelerini yakından izleyerek hidrojen yol haritasını düzenli olarak güncellemesi, sağlıklı, sürdürülebilir ve rekabetçi bir hidrojen ekosisteminin inşası açısından kritik olacaktır.

SHURA, bugüne kadar hidrojen alanında üç çalışma yayımlamıştır. Şubat 2021’de yayımlanan “Türkiye’nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları” çalışması, Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen potansiyelinin hayata geçilmesi için gerekli stratejik öncelikleri ortaya koymuştur. Aralık 2021’de yayımlanan ve “Türkiye’nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açısından Değerlendirilmesi” başlıklı ikinci çalışma, yenilenebilir hidrojenin yurt içi kullanım ve ihracat potansiyelini 2050 perspektifi ile ele almıştır. Şubat 2025’te yayımlanan “Türkiye’nin Karbonsuzlaşma Sürecinde Yenilenebilir Hidrojen: Öncelikli Uygulama Alanları ve Politika Önerileri”

İse Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin son tüketim sektörlerindeki kullanım alanlarını ve ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmekte, sektörel önceliklendirmeye dayalı fayda-maliyet analizleri sunmaktadır.

Bu çalışma, SHURA’nın yenilenebilir hidrojen odağında yayımladığı ilk üç raporu tamamlayıcı nitelikte olup, Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen ekosistemini oluşturma sürecinde ulusal ve uluslararası ölçekte karşı karşıya olduğu fırsatları ve zorlukları belirli başlıklar altında ele alarak politika ve akademik tartışmalara katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

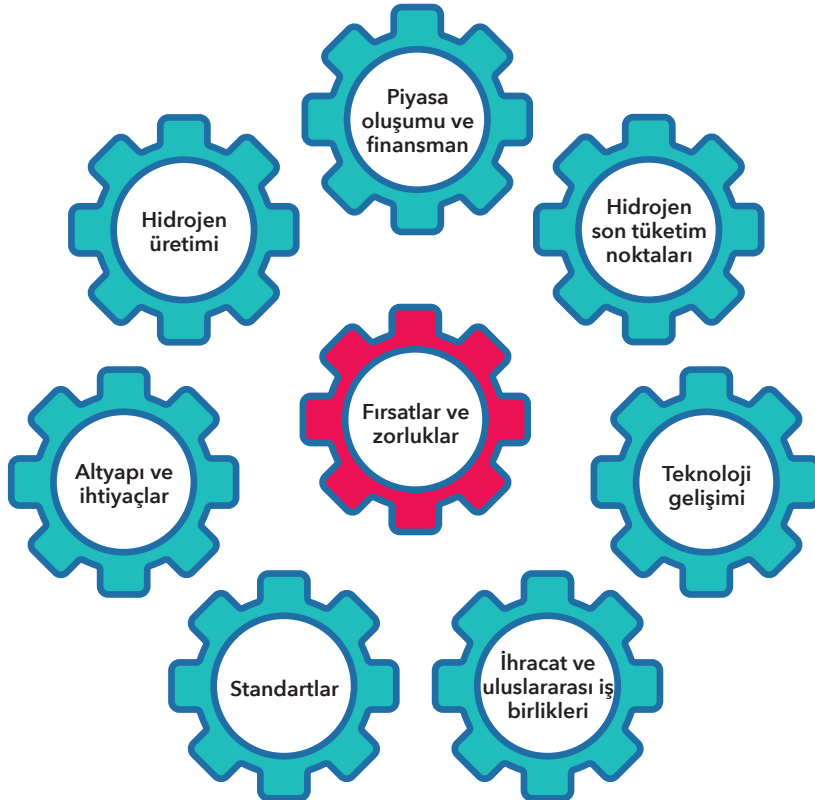


Türkiye'de yenilenebilir hidrojen gelişiminin önündeki zorluklar ve fırsatlar

Yenilenebilir hidrojen, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşma sürecinde, fosil yakıtlara alternatif bir hammadde ve enerji taşıyıcısı olarak önemli bir potansiyel sunmaktadır. Türkiye'nin coğrafi konumu sayesinde sahip olduğu yüksek güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline ek olarak, halihazırda rafineriler ile kimya ve gübre sektörlerinde gri hidrojenin yaygın olarak kullanılıyor olması, yakın gelecekte yenilenebilir hidrojenin benimsenmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (SHURA, 2025). Ancak mevcut teknik altyapının yetersizliği, yüksek hidrojen üretim maliyetleri, düzenleyici çerçevenin belirsizliği ve mevcut bir piyasa oluşumunun bulunmaması gibi çeşitli faktörler bu potansiyelin hayata geçirilmesini sınırlamaktadır.

Bu kapsamda, yenilenebilir hidrojen ekosisteminin oluşturulması sürecinde bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gereken birçok politika ve uygulama alanı bulunmaktadır. Türkiye, bu alanlarda hem önemli fırsatlarla hem de çeşitli yapısal ve kurumsal zorluklarla karşı karşıyadır. Söz konusu fırsat ve zorluklar, bu rapor kapsamında belirli tematik başlıklar altında ele alınmaktadır.

Şekil 1. Yenilenebilir hidrojen ekosistemine giden yolda tematik başlıklar





BÖLÜM 1

Hidrojen Üretimi

Türkiye sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli ve coğrafi konumu dolayısıyla hidrojen üretimi konusunda önemli bir avantaja sahiptir. Yenilenebilir hidrojen üretiminin artması, hem enerji arz güvenliğini artıracak hem de düşük karbonlu ekonomi hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştıracaktır. Bununla birlikte, Avrupa Birliği (AB) başta olmak üzere küresel ölçekte yenilenebilir hidrojene yönelik artan talep, Türkiye’nin bu alanda önemli bir ihracatçı konumuna gelme potansiyelini de ortaya koymaktadır. Öte yandan, yenilenebilir hidrojen üretimi doğrudan elektrifikasyonla rekabet etmemelidir (SHURA, 2025). Başka bir ifadeyle, doğrudan elektrifikasyonun mümkün olduğu alanlarda hidrojenin kullanımı, elektrik sektöründeki dönüşüm sürecini zorlaştırabilir.

Hidrojen teknolojilerinin henüz gelişim aşamasında olması, yüksek maliyetler, uzun vadeli finansman kaynaklarına erişimde yaşanan zorluklar, altyapı eksiklikleri ve düzenleyici çerçevenin belirsizliği, yatırımcılar açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle, Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen üretimi ve piyasa oluşumu sürecinde, mevcut fırsatlarla birlikte çok boyutlu riskleri de dikkatle değerlendirmesi gerekmektedir.

Türkiye’nin hidrojen üretimi açısından önündeki zorluklar ve fırsatlar

1.1 Piyasa belirsizliği ve talep eksikliği

Türkiye’nin hidrojen üretimi konusunda önündeki en önemli belirsizliklerden biri yenilenebilir hidrojene yönelik bir piyasanın henüz oluşmamasıdır. Mevcut durumda, yenilenebilir hidrojen için netleşmiş bir piyasa yapısı, sabit fiyatlı alım garantili mekanizmalar ya da uzun vadeli alım garantileri henüz bulunmamaktadır. Bu durum, yatırımcıların yenilenebilir hidrojen üretimine yönelik hayata geçirecekleri projeleri ekonomik olarak planlamalarını zorlaştırmaktadır.

Fosil yakıtlara yönelik uygulanması beklenen karbon vergisi ya da karbon fiyatlandırması Türkiye’de henüz uygulanmamaktadır. Karbon fiyatlandırması yenilenebilir hidrojenin rekabetçiliği açısından kritik olacaktır. Diğer taraftan, yenilenebilir hidrojenin öncelikli olarak kullanılacağı sektörlerin stratejik olarak belirlenmemiş olması, orta ve uzun vadeli talep projeksiyonlarının oluşturulmaması yatırımcı perspektifinden belirsizlik oluşturmaktadır.

1.2 İnsan kaynağı

Yenilenebilir hidrojen değer zincirinde görev alacak nitelikli insan kaynağı oldukça önemlidir. Hidrojen teknolojileri; enerji sistemleri mühendisliği, malzeme bilimi, kimya gibi disiplinler arası uzmanlık alanlarını içermektedir. Ayrıca, halihazırda gri hidrojen kullanan belirli sektörler (kimya, petrokimya gibi) dışında, sektörel deneyimli teknik uzman kaynağındaki eksiklikler yatırım süreçlerini ve teknolojinin uygulanabilirliğini yavaşlatmaktadır.

1.3 Yenilenebilir enerji arzı ve elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabet

Yenilenebilir hidrojen üretimi için elektrolizör teknolojisi, su ve yenilenebilir enerji kaynakları gerekmektedir. Türkiye’de hâlihazırda yayımlanan politika belgeleri ve eylem planlarında

yenilenebilir enerji kurulu gücüne ilişkin önemli hedefler belirlenmiştir. Bu doğrultuda, başta güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kurulu gücü son yıllarda hızlı bir artış görülmektedir. Öte yandan, mevcut yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesinin büyük bir çoğunluğu öncelikli olarak elektrik sektörü dönüşümü için kullanılmalıdır. Başka bir deyişle, yenilenebilir hidrojen üretimi için gerekli yenilenebilir enerjinin, halihazırda var olan santrallerden ziyade yeni yatırımlardan sağlanması önemli bir strateji olacaktır. Bu nedenle, yenilenebilir hidrojen üretimi için gerekli yenilenebilir enerji kurulu gücü artışının ayrıca planlanması gerekmektedir. Böylelikle, yenilenebilir hidrojen elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabet etmesi engellenecektir.

1.4 Yenilenebilir hidrojene yönelik düzenleyici çerçevenin eksikliği

2023 yılında yayımlanan “Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” politikası ile Türkiye yenilenebilir hidrojene yönelik uzun vadeli hedefler belirlenmiştir. Öte yandan, belirlenen hedefleri destekleyecek bir mevzuatsal altyapısının henüz oluşturulmamış olması, yatırımcıların sürece temkinli yaklaşmasına ve yerli üretime yönelik gelişimin bu durumdan doğrudan etkilenmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, yenilenebilir hidrojen üretiminin sağlanması için Türkiye’nin özel bir hidrojen mevzuatı oluşturması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte, yenilenebilir (yeşil) hidrojenin tanımından başlayarak teşvik mekanizmalarına, sertifikasyon sistemlerinden güvenlik standartlarına kadar uzanan kapsamlı bir düzenleyici çerçevenin oluşturulması gerekecektir. Bu doğrultuda kamu kurumları, özel sektörle birlikte çalışma grupları oluşturarak hidrojenin enerji dönüşümündeki rolünü güçlendirecek yasal altyapının tesis edilmesine yönelik çalışmalarını sürdürmektedir.

Diğer taraftan, hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve nihai kullanım noktalarındaki uygulamalarını bütüncül biçimde koordine edecek merkezi bir kamu otoritesinin bulunmaması, ekosistemin gelişimini yavaşlatabilecek önemli bir yönetim boşluğu oluşturmaktadır.

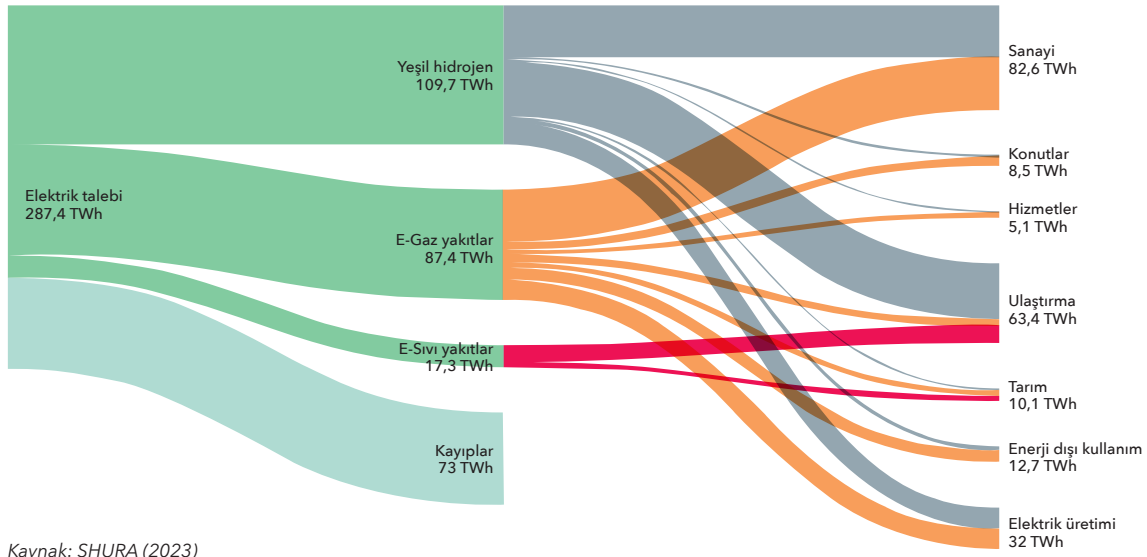
1.5 2053 net sıfır emisyon hedefi ve yenilenebilir enerji potansiyeli

Türkiye, 2021 yılında Yeşil Mutabakat Eylem Planı’nı duyurmuş, akabinde Paris Anlaşması’na taraf olarak 2053 yılına kadar net sıfır emisyonlu bir ekonomiye geçiş taahhüdünde bulunmuştur. Bu gelişmeler doğrultusunda, iklim ve enerji politikaları enerji dönüşümü hedefleriyle uyumlu şekilde şekillenmeye başlamıştır. Bu doğrultuda, yenilenebilir hidrojenin sektörel dönüşümde üstleneceği kritik rol, kamu tarafından belirlenen hedeflerde açıkça vurgulanmıştır.

Doğrudan elektrifikasyonun karbonsuzlaşma sürecinde yetersiz kaldığı sektörlerde yenilenebilir hidrojenin hammadde ve yakıt olarak kullanımı, sanayinin çeşitli alt sektörlerinin ve uzun mesafe taşıma sektörünün net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasına büyük katkı sağlayacağı beklenmektedir. Bu kapsamda, yenilenebilir hidrojenin yerel üretimi için hedefler politika dokümanlarında belirlenmektedir. “Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” dokümanında yenilenebilir hidrojenin ilk aşamada yerinde tüketimi ve sanayi ihtiyacının karşılanmasına yönelik kullanımı öngörülmüş, 2035’de 5 gigavat (GW) ve 2053 yılı itibarıyla 70 GW olmak üzere kademeli elektrolizör kurulu güç artışı hedefi konulmuştur (ETKB, 2023).

SHURA Net Sıfır 2053 çalışmasının temel çıktılarına göre, doğrudan elektrifikasyonla karbonsuzlaşması zor olan son kullanım sektörlerinde yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin kullanımı kritik öneme sahiptir (SHURA, 2023). Model sonuçlarına göre 2053 yılında toplam enerji talebinin %15’i yenilenebilir hidrojen ve türevleri tarafından karşılanmaktadır. 2053 yılında öngörülen talebin karşılanması için ise yaklaşık 70 GW elektrolizör kapasitesine ihtiyaç duyulacağı analiz edilmiştir (Şekil 2).

Şekil 2. 2053 yılında türüne göre e-yakıt üretimi ve sektörel tüketimi



Kaynak: SHURA (2023)

Türkiye’nin sahip olduğu yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli, yenilenebilir hidrojen üretimi için önemli bir maliyet avantajı sağlamaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinde yüksek kapasite faktörleri, hidrojen üretiminde elektrolizörün verimli kullanımını sağlayacaktır. Diğer taraftan, güneş ve rüzgâr kaynaklı ihtiyaç fazlası üretimin elektrolizörlere yönlendirilmesi, yenilenebilir enerji kesintilerini (curtailment) sınırlandırabilir. Ancak düşük maliyetli hidrojen üretiminin sağlanabilmesi için elektrolizörlerin yüksek kapasite kullanım oranlarında çalışması gerekmektedir. Bu durum, ilave yenilenebilir enerji yatırımlarına olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

1.6 Yeni yatırım fırsatları sunan bir pazar alanı

Türkiye, henüz gelişmekte olan yenilenebilir hidrojen pazarı için belirlediği hedefler ve yürüttüğü Ar-Ge çalışmalarıyla yatırımcılar açısından yeni ve stratejik bir pazar olarak öne çıkmaktadır. 2035 ve 2053 yılları için tanımlanan elektrolizör kapasitesi ve kilogram başına yenilenebilir hidrojen maliyeti hedefleri ise Türkiye’nin rekabetçi ve dikkat çekici bir yatırım ortamı oluşturma yönünde önemli bir adım attığını göstermektedir (ETKB, 2023).

Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen kapsamında belirlemiş olduğu hedefler doğrultusunda yaratılacak hidrojen piyasasının getiri ve stratejik katma değer potansiyeli yerli ve yabancı yatırımcıların ilgisini çekecektir. Mevzuatın oluşturulması ve kamu destekli teşvik mekanizmalarının hayata geçirilmesi, yatırım risklerini azaltarak Türkiye’yi yenilenebilir hidrojen üretim projeleri açısından

hem erken yatırım fırsatları hem de uzun vadeli büyüme potansiyeli sunan, yatırımcılar için umut vadeden bir alan haline getirecektir.

Diğer taraftan, hem alıcı hem de üretici tarafında belirsizliklerin yüksek olması, hidrojenin alınıp satıldığı işleyen bir piyasanın oluşmasını engellemektedir.

1.7 Yenilenebilir hidrojen vadileri

Türkiye’nin ilk yenilenebilir hidrojen vadisi kurulması amacıyla yola çıkan “HYSouthMarmara Hidrojen Vadisi” projesi için ilk adımlar 2023 yılında atılmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı öncülüğünde yürütülen projede yıllık 500 ton yenilenebilir hidrojen üretimi hedefi konuşmuştur. Projenin toplam bütçesi 36 milyon EUR olup, Türkiye’nin AB tarafından tek seferde aldığı en yüksek finansman olmuştur (TÜBİTAK, 2023). Bu proje, gelecekte Türkiye’de yenilenebilir hidrojen üretimi amacıyla kurulacak diğer vadi ve tesisler için örnek bir model olma potansiyeline sahiptir. Hidrojen vadisinde faaliyet gösteren şirketler, yenilenebilir hidrojen tüketimine yönelik yatırımları ve dönüşüm süreçlerini hızlandıracaktır. HYSouthMarmara projesi kapsamında üretilen yenilenebilir hidrojenin, cam ve seramik gibi son tüketim sektörlerinde kullanılması beklenmektedir. Dolayısıyla, proje sektörel dönüşüm için bir itici güç oluşturarak yenilenebilir hidrojene olan talebin yıllar içinde artmasını sağlayacak ve böylece fosil yakıt kullanımının azaltılma sürecini hızlandıracaktır. Projede, yenilenebilir hidrojenin üretimi için bölgedeki güneş ve rüzgâr santrallerinin entegre edilecek olması, Türkiye’deki enerji yoğun sanayi bölgelerinde hidrojen üretim tesislerinin yaygınlaşmasına yönelik bir altyapı ve vizyon örneği de ortaya koymaktadır (HYSouthMarmara, t.y.). Böylelikle, organize sanayi bölgeleri ve enerji ihtiyacı yüksek tesislerde yenilenebilir hidrojen ve türevlerine olan talebin artması enerji maliyetlerini düşürerek, sürdürülebilir üretimin önünü açacaktır. Birçok enerji yoğun üretim bölgesinin, kendi yenilenebilir hidrojenini üretmek amacıyla entegre hidrojen üretim tesisi kurma ihtimali artacaktır.

Türkiye’de farklı bölgelerde hidrojen vadisi kurulumu, hidrojenin gelişiminde önemli bir kaldıraç görevi üstlenebilir. Ancak tüketicilerin ve üreticilerin fiyat beklentileri arasındaki uyumsuzluk, altyapı eksiklikleri ve hidrojen destek mekanizmalarının yetersizliği, bu tür hidrojen vadilerinin gelişimini sınırlayan temel zorluklar arasında yer almaktadır.

1.8 Hidrojenin ihracat potansiyeli

Türkiye, stratejik coğrafi konumu ve yüksek yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli sayesinde, yenilenebilir hidrojen ticaretinde kilit bir oyuncu olma potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyelin etkin bir biçimde değerlendirilmesi, tüm plan ve stratejilerin 2053 net sıfır emisyon hedefiyle uyumlu olarak belirlenmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, Türkiye’nin öncelikle ulusal hidrojen ihtiyacını ve kritik sektörlerdeki öncelikleri belirlemesi büyük önem taşımaktadır. İç piyasa dengesinin tesis edilmesini takiben, uluslararası iş birlikleri ve ihracat planları daha sağlam bir zeminde kurgulanabilecektir.

Özellikle Avrupa, Orta Doğu ve Doğu Akdeniz ülkeleriyle kurulacak iş birlikleri hem teknoloji transferi hem de ekonomik gelişim açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu iş birlikleri ayrıca, Türkiye’deki yenilenebilir hidrojen ekosisteminin gelişimine ciddi bir ivme kazandıracaktır. Avrupa’nın yüksek hidrojen talebi ve Türkiye’nin bu pazara olan coğrafi yakınlığı önemli bir avantaj teşkil etmektedir. İleride Avrupa’ya yönelik yenilenebilir hidrojen ihracatında, nispeten düşük nakliye maliyetleri Türkiye’yi ticarette rekabetçi bir konuma taşıyabilir.

Bunun yanı sıra, Orta Doğu ülkelerinden Avrupa’ya yönelmesi muhtemel hidrojen ticaret koridorlarında Türkiye, bir enerji köprüsü veya geçiş koridoru rolünü üstlenebilir. Tüm bu gelişmeler ışığında, Türkiye doğru ve entegre stratejilerle hareket ederse, hidrojen ekonomisinde bölgesel bir merkez haline gelebilir. Bu durum, aynı zamanda hidrojenin üretimini de destekleyecektir. Diğer taraftan, birçok ülkenin oluşması muhtemel küresel hidrojen ticaretinde yer alma isteği, ülkeler arasında ikili anlaşmaların artmasına ve rekabetin yoğunlaşmasına yol açacaktır.

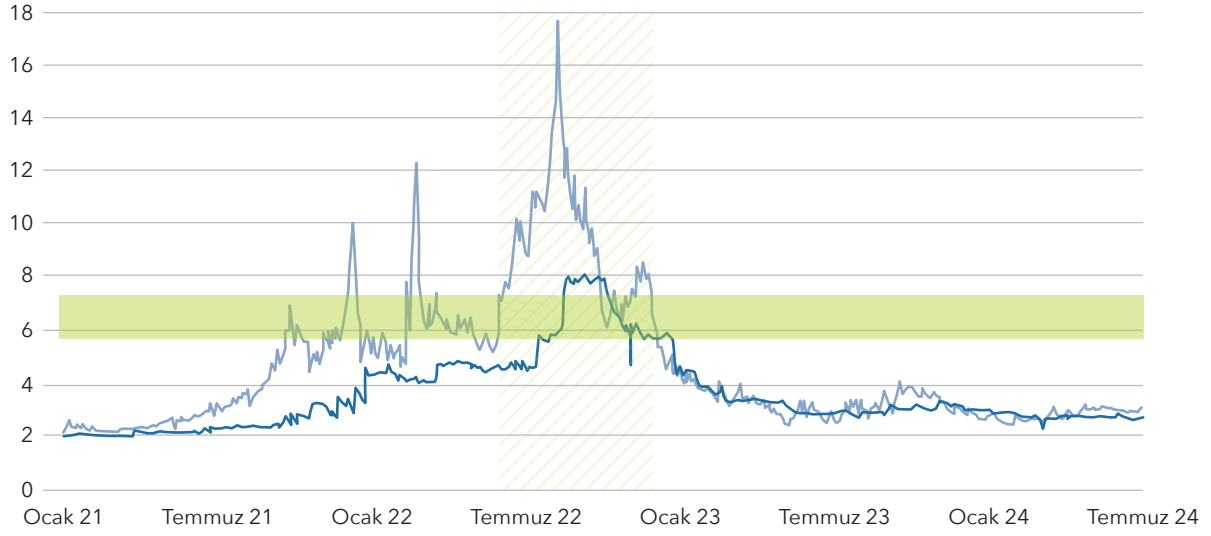
1.9 Yenilenebilir hidrojenin üretim maliyeti

Türkiye’nin güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretim maliyetleri pek çok ülkeye göre düşük olmasına rağmen, yenilenebilir hidrojenin üretim maliyeti, halen fosil yakıt bazlı üretim yöntemleriyle rekabet edebilecek düzeye inmemiştir. Buradaki en önemli etmenlerden biri, elektrolizör yatırım maliyetleridir. Önümüzdeki dönemde elektrolizör maliyetlerinde önemli bir düşüş potansiyeli bulunsa da, ithal teknolojilerin tedarik zinciri sorunları üretim maliyetlerini olumsuz etkileyen unsurlardandır. Yerli ve rekabetçi elektrolizör teknolojisinin olmaması, ithal teknolojilere bağımlılık maliyet belirsizliğini beraberinde getirecektir. Diğer taraftan, yerli teknolojinin uluslararası teknolojiler ile rekabet edebilmesi çok zorlu bir süreç olacaktır. Ayrıca, depolama ve taşıma süreçlerini içeren hidrojen değer zincirine yönelik teknik altyapının henüz başlangıç seviyesinde olması da maliyetleri yükselten diğer etmenler arasındadır.

Şekil 3’te gösterilen yeşil çizgili alanın gerçekleştiği tarihlerde, Türkiye’nin batı bölgesinde yenilenebilir hidrojenin, Türkiye ve/veya Avrupa’da üretilen mavi hidrojenle karşılaştırıldığında, yenilenebilir hidrojenin maliyet açısından rekabetçi bir şekilde üretilbileceğini göstermektedir. Ancak, fosil yakıt fiyatları düşük seyrettiği sürece mavi hidrojen, yenilenebilir hidrojene kıyasla daha maliyet etkin olabilir. Bunun temel nedeni, mevcut durumda yenilenebilir hidrojen üretiminin fosil yakıt bazlı hidrojen üretimine kıyasla küresel ölçekte daha maliyetli olmasıdır. Öte yandan, karbon yakalama ve kullanma (CCUS) teknolojisinin ve doğal gaz fiyatlarının belirsizliği nedeniyle mavi hidrojen, fiyat dalgalanmalarına açık olacaktır. Yenilenebilir hidrojen üretim maliyeti, yenilenebilir elektrik üretimi, elektrolizör yatırım ve işletme maliyetleri ile kapasite kullanım oranlarına bağlıdır. Dolayısıyla, mavi hidrojene kıyasla yenilenebilir hidrojen üretiminde enerji maliyet dalgalanması açısından bir risk oluşmayacağı değerlendirilmektedir. Yenilenebilir hidrojen üretiminin mevcut durumda daha maliyetli olmasının önemli bir nedeni, elektrolizörlerin yatırım maliyetlerinin (CAPEX) oldukça yüksek olmasıdır. Bu, özellikle küresel enflasyon nedeniyle yatırım ve finansal maliyetlerin artmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3. Türkiye (Batı bölgeleri) ve AB için yeşil ve mavi H₂ maliyetleri¹

LCOH (EUR/kg)



Kaynak: SHURA (2025)

- Rüzgâr ve güneş enerjisi kaynaklı yeşil hidrojen üretimi (TR)
- Mavi hidrojen (TR)
- Mavi hidrojen (AB)

¹⁰ Yenilenebilir enerji kaynaklarının tam yük saat verileri İzmir özelinde analiz edilmiştir. Mavi hidrojen, %95 yakalama oranına sahip buhar metan reformasyonuna dayanmaktadır. Yenilenebilir hidrojen üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarına doğrudan bağlantılıdır. İlgili veriler Agora Energiewende'nin LCOH hesaplama aracı ile hesaplanmıştır (2024). Yenilenebilir enerji kaynaklarının tam yükte çalışma saatleri İzmir şehri özelinde alınmıştır; Doğal gaz fiyatları: EPIAŞ Şeffaflık Platformu (TR); TTF (EU).



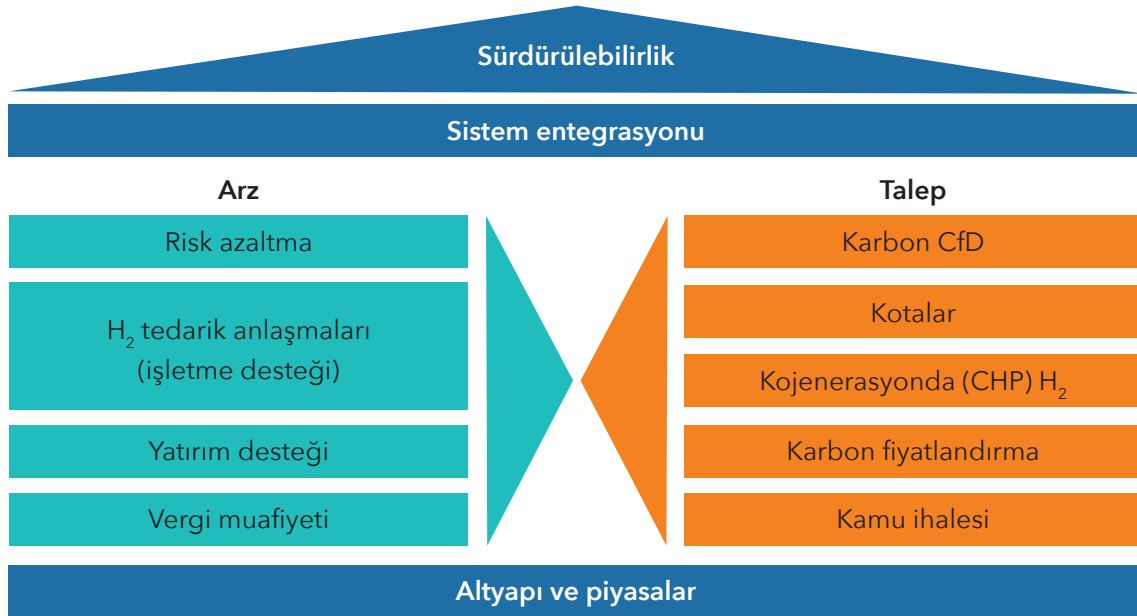
BÖLÜM 2

Piyasa Oluşumu
ve Finansman

Piyasa oluşumu ve finansman, Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin sürdürülebilir gelişimini belirleyici en önemli faktörler arasında bulunmaktadır. Türkiye’nin yenilenebilir hidrojene geçiş sürecinde, bir piyasa oluşması, kamu destek ve teşvik mekanizmalarının devreye girmesi sürecin etkin yönetimi için kritiktir.

Yenilenebilir hidrojen için oluşturulacak finansmanın, hidrojen değer zincirinin tüm halkalarını içermesi gerekmektedir. Bu kapsamda, hidrojenin üretimi, depolanması, taşınması, üretim esnasında kullanılacak ekipmanların imalatı veya ithalatı ve son kullanıcılara ulaştırılmasına yönelik altyapının oluşumunun göz önünde bulundurulması önemli olacaktır. Ayrıca projelere yönelik finansman yapısı ve bankalardan kredi alabilirlik analizi, ülkenin yenilenebilir enerjiye ve mevcut altyapıya erişimi, tesisinin bulunduğu veya bulunacağı lokasyona bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 4. Hidrojen piyasası gelişimi için düzenleyici çerçeve örneği



Kaynak: Agora Energiewende (2021)

Türkiye’de hidrojen piyasası oluşumu ve finansmanı açısından zorluklar ve fırsatlar

2.1 Teşvik ve destek mekanizmaları

Türkiye’de halihazırda yenilenebilir hidrojen yatırımlarına yönelik özel bir teşvik veya destek mekanizması bulunmamaktadır. Bu durum, yenilenebilir hidrojenin erken aşamada piyasa oluşturma potansiyelini sınırlamakta ve yatırımcıların bu alana yönelmesini zorlaştırmaktadır. Oysa yenilenebilir hidrojenin gelişimi, alım garantileri, fark sözleşmeleri (CfD) veya kapasite bazlı destekler gibi doğrudan destek araçlarının yanı sıra, karbon fiyatlaması gibi dolaylı politika mekanizmalarıyla da teşvik edilebilir.

Ancak bu desteklerin tasarımı, yenilenebilir hidrojenin her alanda yaygınlaştırılması yerine, yalnızca karbonsuzlaşması zor son kullanım sektörlerine yönelik olarak ve eklenebilirlik (additionality) ilkesine uygun biçimde kurgulanması kritik önemdedir. Aksi durumda, sınırlı kamu kaynaklarının düşük emisyon azaltım potansiyeline sahip alanlara yönlendirilmesi ve elektrik sektörünün karbonsuzlaşma sürecinin dolaylı olarak zayıflaması riski ortaya çıkacaktır. Bu nedenle destek mekanizmalarının, hem sektör özelinde hem de ilave yenilenebilir enerji kapasite yatırımlarını zorunlu kılan bir çerçevede tasarlanması gerekmektedir.

2.2 Yüksek yatırım maliyetleri

Türkiye'de henüz elektrolizör teknolojisi kapsamında gerçekleştirilen Ar-Ge çalışmaları haricinde yenilenebilir hidrojen değer zincirinde bulunan teknolojilere yönelik bir ekipman/teknoloji üretimi bulunmamaktadır. Dolayısıyla, yenilenebilir hidrojen üretiminde kullanılacak teknolojilerin büyük oranda ithal edilmesi beklenmektedir. Bu bağlamda, elektrolizör ve hidrojen depolama ekipmanlarının tedarik sürecinde yüksek yatırım maliyetleri ile karşılaşılması muhtemeldir.

Bu çerçevede, ölçekleme sürecinin kontrollü ve maliyet etkin bir biçimde ilerlemesi, yenilenebilir hidrojen yatırımlarının öncelikli uygulama alanlara ve doğrudan elektrifikasyonun yeterli olmadığı sektörlerle yönelik yapılmasına bağlıdır. Hidrojenin erken aşamada geniş bir kullanım alanına yayılması, teknolojik öğrenme etkilerinden yeterince faydalanılamaması dolayısıyla maliyetlerin sistem genelinde artmasına yol açabilecektir.

2.3 Karbon fiyatlaması ve sertifikasyon

Türkiye'de henüz karbon fiyatlandırma ve sertifikasyon altyapısının gelişmemiş olması, yenilenebilir hidrojenin fosil yakıtlarla rekabet etmesini zorlaştıran temel etkenler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, oluşturulmakta olan Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ile beraber karbon maliyetlerinin fosil yakıtlı üretim ve tüketim süreçlerine yansıtılması beklenmektedir. Bu gelişme, özellikle sanayi ve ulaştırma gibi karbonsuzlaşması zor son kullanım sektörlerinde, yenilenebilir hidrojenin rekabet gücünü artıracak önemli bir kaldıraç işlevi görecektir.

Ayrıca, Avrupa Birliği'nin (AB) SKDM ve benzeri düzenlemeleri, Türkiye'nin ihracata konu sektörlerinde karbon ayak izine ilişkin şeffaflık ve izlenebilirlik gerekliliklerini artırmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir hidrojenin gerçekten düşük emisyonlu bir seçenek olduğunu ortaya koyan sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi, hem iç piyasa hem de ihracat odaklı uygulamalar açısından kritik önem taşımaktadır.

2.4 Mevcut piyasa tecrübesi ve altyapısı

Türkiye'nin elektrik ve doğal gaz piyasalarında edindiği kurumsal ve teknik tecrübe, yenilenebilir hidrojen için organize bir piyasa yapısının oluşturulması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu kapsamda, Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) tarafından işletilen organize enerji piyasaları, yenilenebilir hidrojenin aşamalı bir biçimde piyasa yapısına entegre edilmesi için kurumsal bir referans noktası oluşturmaktadır.

Benzer şekilde, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’nun (EPDK) piyasa düzenleyicisi olarak sahip olduğu deneyim, hidrojen piyasasının erken aşamada şeffaf, öngörülebilir ve eklenebilirlik (additionality) ilkesine dayalı bir düzenleyici çerçeveye şekillendirilmesine katkı sağlayabilecektir.

2.5 AB ile entegrasyonu derinleştirme fırsatı

AB, enerji dönüşümünde hidrojenin kritik bir rol oynayacağını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu kapsamda AB’ye üye ülkeler için düzenlemeler belirlenmekte olup, kısa ve orta vadede oluşacak yenilenebilir hidrojen talebine yönelik öngörü ve altyapı oluşturmaya çalışmaktadır. Bu kapsamda, Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) ve “Fit for 55” paketi kapsamında Hidrojen ve Karbonsuzlaştırılmış Gaz Piyasası Paketi (Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package) yayınlamıştır. Paket, Ağustos 2024 tarihinde kabul edilmiş olup, AB üye ülkelerinin ilgili paketi uygulamaya koymaları için Ağustos 2026 tarihine kadar süre tanınmıştır (European Hydrogen Observatory, 2025).

Paketin temel amacı, kısa ve orta vadede karbonsuzlaşmanın sağlanmasında yenilenebilir hidrojenin önemli bir rol oynaması öngörüsüyle temiz yakıtların kullanımının arttırılmasıdır. Bu kapsamda ilgili paket, mevcut mevzuatı belirli hükümler ile uyumlu hale getirmektedir. Bu hükümler, Temiz Enerji Paketi’ndeki (Clean Energy Package) temiz enerji çözümüne teşvikler, üreten tüketicilerin (prosumer) davranışları ve tedarikçi değişimini kolaylaştırma olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, Komisyon’a bu süreçte düşük karbonlu hidrojenin tanımını yapma yetkisi verilmiştir. Düzenleme kapsamında hidrojen şebekeleri için bağımsız bir yapının kurulması amaçlanmış, bu kapsamda ENTSO-E ile ortak çalışılarak 2025 yılının sonuna kadar faaliyete geçilmesi hedefi konulmuştur. Hidrojenin taşınması, tedariki ve depolanmasına ilişkin ortak kurallar da belirlenmiştir (European Hydrogen Observatory, 2025).

Dolayısıyla, ilgili paket hidrojen doğal gaz sektörünün karbonsuzlaşması yolunda kilit bir unsur olarak açıkça tanımlanmıştır. Ek olarak, hidrojen piyasasının geliştirilmesinin, AB’nin bir sonraki düzenleyici döneminde oluşturulacak bir çerçeve ile hayata geçirileceği belirtilmiştir.

“Fit for 55” Paketi kapsamında ise, 2030 yılına kadar 5,6 Mt yenilenebilir hidrojen üretim öngörüsü yapılmıştır. Avrupa Komisyonu’nun oluşturduğu REPowerEU Plan’ı kapsamında, bu hedefe ek olarak 15 Mt hidrojen üretimi daha eklenmiştir. 2030 yılına kadar öngörülen toplam 20,6 Mt’luk üretim hacmi, talep tarafında eş konumlu elektroliz tesisleri, yenilenebilir enerjiye dayalı merkezi hidrojen üretimi, boru hattıyla ithalat ve amonyak veya metanol gibi hidrojen türevlerinin gemiyle ithalatı gibi çeşitli arz kaynaklarından oluşacaktır. Avrupa Birliği bu süreçte hidrojenin 10 Mt’unu ithal etmeyi, 5 Mt’unu Avrupa’da üretmeyi planlamaktadır (EHB, 2022).

Bu bağlamda, küresel ölçekte yenilenebilir hidrojen ticaretinde yeni gelişmeler gerçekleşmektedir. Birçok ülke, ikili anlaşmalar yoluyla yeşil hidrojen ticareti yapmayı hedeflemektedir. Bu ikili anlaşmalara örnek olarak, Kanada ile Almanya arasında 2022 yılında bir anlaşma imzalanmıştır. Anlaşma, 2025 yılına kadar yenilenebilir hidrojenden üretilen yıllık 500.000 tona kadar olan amonyak ticaretini içermektedir (Uniper, 2022). Almanya’nın Birleşik Arap Emirlikleri gibi diğer ülkelerle de çeşitli iş birlikleri bulunmaktadır. Amerika, İspanya, Avusturalya, Kanada, Hindistan, Japonya ve Mısır gibi birçok ülke yenilenebilir hidrojen üretimi, tüketimi ve ticaretiyle ilgilenmektedir.

Bu gelişmeler ışığında, hidrojen piyasasının oluşturulması, düşük karbonlu yakıtların tanımlanması ve sertifikasyonu ile teknik ve piyasa standartlarının belirlenmesi gibi alanlarda AB ile entegre çalışan bir yapının kurulması önemlidir. Böyle bir yapı, Türkiye'nin hem iç piyasada hem de AB ile ticaretinde yenilenebilir hidrojen alanında rekabetçi bir konuma gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca, AB ile enerji entegrasyonunun derinleştirilmesi için önemli bir fırsat sunmaktadır.





BÖLÜM 3

Altyapı ve İhtiyaçlar

Sektörlerin dönüşüm sürecinde yenilenebilir hidrojenin entegrasyonu, üretim teknolojilerinin yanı sıra kapsamlı ve uyumlu bir altyapının oluşturulması ile mümkündür. Bu süreçte, hidrojen değer zincirini oluşturan üretim tesisleri, taşıma, depolama, dağıtım ve son kullanım noktalarının ihtiyaçlarının kapsamlı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Altyapı ve ihtiyaçlar bağlamında Türkiye'nin önündeki zorluklar ve fırsatlar

3.1 Ulaştırma sektöründe hidrojen altyapısı gelişimi

Hidrojen ekosistemi altyapısının liman ve havalimanlarında uyumlu şekilde oluşturulması, yenilenebilir hidrojenin kullanımı ve potansiyeli konusunda büyük önem taşımaktadır. Altyapı gelişimi kapsamında havalimanlarında sıvılaştırma tesisleri ile boru hatlarının birlikte tasarlanmasına ihtiyaç olacaktır. Ayrıca limanlarda amonyak depolama ve taşınmasını sağlayacak bir altyapıya ihtiyaç vardır.

3.2 Hidrojen dolum istasyonları

Ulaştırma sektöründe emisyonları azaltma yolunda elektrifikasyon ile alternatif yakıtlara yönelim artmaktadır. Bu kapsamda, SHURA (2025) öncelikli olarak elektrifikasyonun artırılmasını, orta vadede ise uzun mesafe taşımacılığında hidrojenin daha yaygın olarak kullanımı öngörüsünü ortaya koymuştur. Bu çerçevede, karayolu hidrojen dolum altyapısının, ulaştırma sektöründe yenilenebilir hidrojenin benimsenmesinin temel koşullarından biri olması beklenmektedir.

Türkiye, hidrojen dolum istasyonları konusunda henüz başlangıç aşamasındadır. Hidrojen yakıt hücreli ve içten yanmalı araçların pazarda henüz bulunmaması, dolum altyapısına yönelik yatırımları da geciktirmektedir. Yüksek kurulum maliyetleri, talep belirsizliği ve mevcut durumda elektrikli araçların yükselişi, hidrojen dolum istasyonlarının kısa vadede ekonomik olarak cazip hale gelmesini de engellemektedir.

3.3 Elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabet

Yenilenebilir hidrojenin, doğrudan elektrifikasyonun teknik veya ekonomik olarak mümkün olmadığı karbonsuzlaşması zor sektörlerde tamamlayıcı bir unsur olarak konumlandırılması, net sıfır hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda yenilenebilir hidrojenin elektrik sektörünün karbonsuzlaşmasını hızlandıran bir araç olarak tasarlanması temel bir politika önceliği olmalıdır.

Bu doğrultuda, yenilenebilir hidrojen üretiminde kullanılacak elektrik enerjisinin, mevcut yenilenebilir enerji santrallerinin üretimini yönlendirmek veya ikame etmek yerine, hidrojen üretimi amacıyla devreye alınacak ilave yenilenebilir enerji yatırımlarına dayandırılması gerekmektedir. Eklenebilirlik (additionality) ilkesinin bu şekilde uygulanması, hidrojen üretiminin elektrik sektöründeki karbonsuzlaşma kazanımlarını aşındırmasını önleyerek, her iki dönüşüm sürecinin birbirini tamamlayıcı biçimde ilerlemesini sağlayacaktır.

Bununla birlikte, yatırımcı perspektifinden bakıldığında, yenilenebilir hidrojen üretimine yönelik hedefli bir teşvik ve destek mekanizmasının bulunmaması, yatırımcıların sınırlı sermayelerini öncelikle elektrik piyasasında gelir görünürlüğü daha yüksek olan yenilenebilir enerji yatırımlarına yönlendirmesine neden olmaktadır. Bu durum, yenilenebilir hidrojen için gerekli ilave kapasite yatırımlarının gecikmesi ve hidrojen ekosisteminin gelişiminin yavaşlaması riskini beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, eklenebilirlik ilkesini esas alan ve hidrojen üretimine tahsis edilen yeni yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik eden politika araçlarının geliştirilmesi, elektrik sektörünün dönüşümü ile uyumlu bir hidrojen piyasasının oluşumu açısından kritik önem taşımaktadır.

3.4 Yenilenebilir enerji potansiyeli ve elektrik sistemi altyapısı

Türkiye, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi gibi temiz teknolojilerde henüz tam olarak değerlendirilememiş büyük bir potansiyel barındıran zengin yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir ülkedir. Bu yüksek potansiyel, yenilenebilir (yeşil) hidrojen üretimi konusunda Türkiye’ye önemli stratejik avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, coğrafi koşullarının elverişliliği sayesinde yenilenebilir hidrojen üretim maliyetlerinin küresel düzeyde pek çok ülkeye göre daha düşük olacağı öngörülmektedir. Türkiye, artan enerji ihtiyacını karşılama ve enerjide dışa bağımlılığı azaltma odağında son yıllarda yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelik önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Başta güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretiminde dikkate değer bir artış yaşanmış, toplam kurulu güç içinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı yıllar içerisinde hızla artış göstermiştir. Aralık 2021 tarihi itibarıyla yenilenebilir enerji kaynakları toplam kurulu gücün %53,3’ünü oluştururken, Eylül 2025’te bu oran %8 artarak %61,4 olmuştur. Elektrik üretiminde ise bu dönem içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı %10 artış göstermiştir (EPDK, 2021; EPDK, 2025).

Enerji politikalarında sürdürülebilirlik hedeflenirken, yenilenebilir enerji tarafında teknolojik gelişmeler ve kamu tarafından verilen teşvikler de bu büyümeyi desteklemektedir. Bu doğrultuda Türkiye, 2053 yılı için ilan belirlediği net sıfır emisyon hedefine paralel olarak uyumlu bir enerji dönüşüm süreci izlemekte ve yenilenebilir enerji yatırımlarını uzun vadeli iklim politikalarının ve eylem planlarının temel unsuru olarak konumlandırmaktadır.

Türkiye’nin geniş coğrafyaya yayılmış olan enterkonnekte elektrik altyapısı, üretilen elektriğin elektrolizörlerin konumlandırılacağı bölgelere etkin bir şekilde iletilmesini kolaylaştıracaktır. Türkiye’nin yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli beraberinde 2035 yılı itibarıyla hedeflenen toplam 120 GW rüzgâr ve güneş kurulu gücü hidrojen üretimi için gerekli olan düşük maliyetli karbon-nötr elektrik üretimini destekleyecektir. Ek olarak, altyapı yatırımları kapsamında uzun mesafelerde kayıpları azaltan yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) sistem kurulumları da planlanmaktadır. Bu bağlamda, 2035 yılına kadar toplam 14.700 km HVDC hat, 40 adet HVDC converter merkezi kurulumu hedeflenmektedir. “Yeşil İletim Altyapısı” hedefi doğrultusunda, 2035 yılına kadar şebekede toplam 28 milyar ABD Doları (ABD\$) tutarında yatırım öngörülmektedir (ETKB, 2024). Somut adımlarla ilerlenen depolama projeleri de sistemin sağlıklı işleyişini sağlayacaktır. Tüm bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, Türkiye elektrik altyapısının yenilenebilir hidrojen ekosistemi desteklemek için önümüzdeki dönemde önemli avantajlar sağlayacağı beklenmektedir.

Türkiye sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli dolayısıyla yenilenebilir hidrojen üretimi için oldukça avantajlıdır. Bu durum, yenilenebilir hidrojen üretimi için gerekli olan düşük maliyetli elektrik üretiminin sağlanmasına olanak tanısa da, bu potansiyelin etkin şekilde kullanımı için yenilenebilir hidrojen özelinde kapsamlı bir altyapı oluşumuna ihtiyaç vardır. Altyapı gelişimiyle birlikte elektrolizörlerin yüksek kapasite faktörlerinde ve düşük maliyetli yenilenebilir enerji fiyatlarıyla çalışması mümkün olacaktır. Böylelikle, hidrojenin yenilenebilir enerji açısından zengin bölgelerden, talep olan bölgelere maliyet etkin bir şekilde taşınması sağlanacaktır. Altyapı oluşturulmasındaki temel zorluk, halihazırda yenilenebilir hidrojen ve türevlerine talebin bulunmaması ve bu alanda yapılacak yatırımların atıl kalma riski barındırmasıdır.

3.5 Mevcut doğal gaz boru hattı altyapısı ve tecrübesi

Türkiye, stratejik coğrafi konumu sayesinde Avrupa, Orta Doğu, Orta Asya ve Rusya arasında kritik bir enerji koridoru işlevi görmektedir. Bu kapsamda mevcut doğal gaz iletim boru hatları aracılığıyla, komşu ve çevre ülkelere doğal gaz arzı ve transit taşıma faaliyetleri etkin bir şekilde sürdürülmektedir. Hidrojenin belirli oranlarda (maksimum %20) doğal gaz ile karıştırılarak şebekede kullanılması ile şebekenin karbon yoğunluğu azaltılabilir. Ancak, hidrojenin doğal gaz ile karışımında özellikle teknik olarak uygun oranların kullanılması, güvenlik standartlarının oluşturulması ve son kullanım cihazları üzerindeki etkilerinin araştırılması önemlidir.

Türkiye’nin doğal gaz şebekesi birçok ülkeye göre gelişmiş olmasına karşın bu süreçte hidrojen ile uyumluluğu detaylıca incelenmelidir. Hidrojenin, doğal gaz şebekesinde kullanılan çelik, alüminyum, titanyum gibi elementleri içeren komponentleri ve çelik boru hatlarını kırıncılaştırma eğilimi bulunmaktadır (Hafsi ve diğerleri, 2018). Bu yüzden, hidrojenin doğal gaz şebekesine karıştırılma oranı her bir sistem bileşeninin toleransına göre belirlenmektedir. Dolayısıyla, altyapı güvenliği için tüm şebeke kapsamında her bir bileşenin hidrojen duyarlılığına ilişkin testlerinin yapılması gerekmektedir.

Diğer taraftan, doğal gaz boru hatlarının inşaatı ve işletilmesinde elde edilen deneyimlerin, hidrojen boru hatlarının inşaatı ve işletilmesi konularında önemli faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

3.6 Coğrafi konum ve su kaynaklarına erişim

Yenilenebilir hidrojen üretiminde temel girdilerden biri sudur. Türkiye’nin su kaynakları başta tarım olmak üzere kendi iç ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Ancak son yıllarda yaşanan kuraklık, barajlardaki su seviyelerinde önemli düşüklere neden olmuştur. Dolayısıyla, hidrojen üretiminde kullanılacak temiz suya erişim konusu değerlendirilmesi gereken temel zorluklardandır. Türkiye’nin belli bölgelerindeki su kaynaklarının mevcut durumunun, özellikle tarımsal su tüketiminin fazla olduğu bölgelerde, hidrojen üretimini kısıtlama ihtimali de bulunmaktadır. Dolayısıyla, hidrojen üretim tesisi için seçilecek bölgenin çevresindeki su stresi ve ilgili sektörlerin su ihtiyaçları değerlendirilmelidir. 2030-2050 dönemi için su kıtlığının önemli bir parametre haline geleceği öngörülmekte ve haliçler ile dere ağızlarında su dostu hidrojen projelerinin geliştirilmesi önemli hale gelecektir (SHURA, 2021).

Alternatif olarak, Türkiye’nin coğrafi konumu dolayısıyla üç tarafı denizler ile çevrili olması, hidrojen üretim tesislerinin denize yakın bölgelerde konuşlandırılması durumunda avantaj yaratacaktır. Kıyı bölgelerde deniz suyunun arıtılması veya atık suların geri kazanımı yoluyla elde edilecek alternatif su kaynakları, yenilenebilir hidrojen üretim tesislerinin sürdürülebilirliğini destekleyecektir.

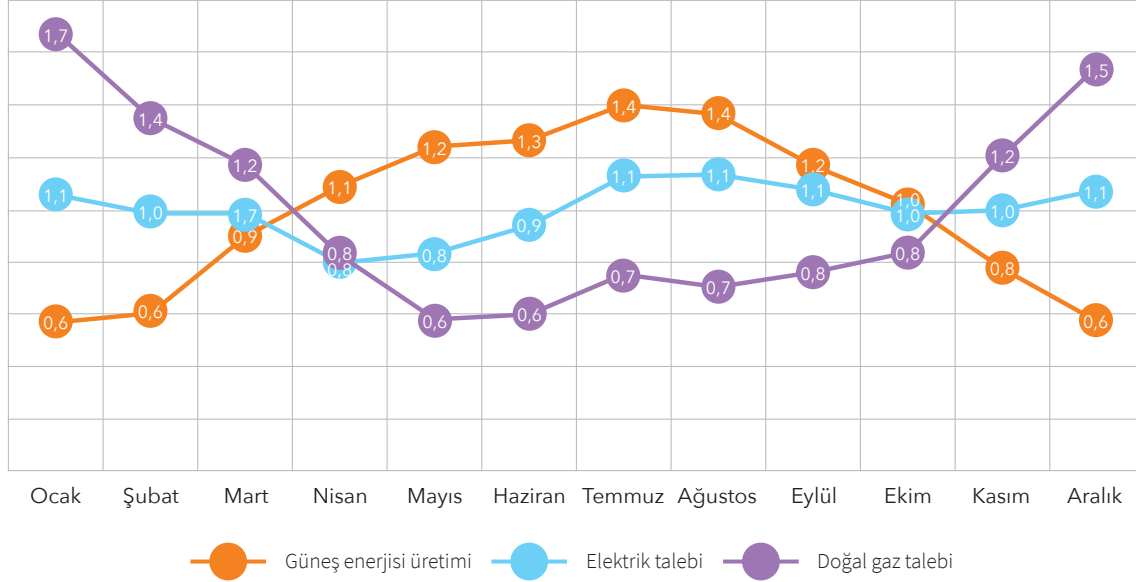
SHURA’nın (2021) “Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi” çalışmasında yapmış olduğu analizlerde, 2050 yılına doğru kıyı bölgelerde deniz suyunun tuzdan arındırılmasının, Türkiye’nin yaşaması muhtemel su problemine karşı bir alternatif olduğu belirtilmektedir.

3.7 Depolama altyapısı

Yenilenebilir enerji kaynakları ve çeşitli sektörlerde hidrojen kullanımı için net hedefler bulunmasına rağmen, büyük ölçekli hidrojen depolamanın rolü tam olarak tanımlanmamıştır. Bu boşluğu doldurmak ve hidrojenin küresel enerji pazarına yaygın entegrasyonuna sağlam bir temel oluşturmak için kapsamlı planlama ve Yeraltı Hidrojen Depolama (Underground Hydrogen Storage - UHS) projelerine yönelik yatırımlar öne çıkan konulardandır. Yeraltı hidrojen depolamanın zorluğu yalnızca altyapı ve proje geliştirmeye sınırlı değildir. Depolama sırasında kaya-sıvı etkileşimleri sürecin güvenliği ve verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Miocic ve diğerleri, 2023; Perera, 2023).

Yenilenebilir hidrojenin depolama işleminden sonra tekrar elektriğe dönüştürülmesi maliyet açısından verimli olmayabilir. Bunun temel nedeni, hidrojen depolama tesisleri inşa etmenin yatırım maliyetleri ve enerjinin form değiştirmesinden kaynaklanan enerji kayıplarıdır. Ancak hidrojen depolama ve hidrojenden elektrik üretmek, Türkiye’de yenilenebilir enerji entegrasyonunda önemli bir tamamlayıcı bileşen olabilir. SHURA (2023), Türkiye enerji sektörünü dikkate alarak 2053 yılında hidrojen ve yenilenebilir hidrojen türevlerinden 32 teravat-saat (TWh) elektrik üretilebileceğini ve bunun elektrik üretim karışımının yaklaşık %4’ünü karşılayabileceğini analiz etmiştir. Özellikle yaz aylarından kış aylarına geçişte güneş enerjisinde yaşanan üretim kaybı, hidrojenin mevsimsel olarak depolanmasıyla telafi edilebilir. Türkiye’nin ulusal hidrojen stratejisinde, alternatif bir enerji depolama aracı olarak (yenilenebilir enerji kesintilerini önlemek için) ihtiyaç fazlası elektriğin hidrojen üretimi için kullanılmasının önemini belirtilmektedir. Stratejide ayrıca hidrojenin yeraltı tuz mağaralarında depolanması ihtimalinin de araştırılmasına dikkat çekilmektedir (ETKB, 2023).

Şekil 5. Türkiye’de güneş enerjisi elektrik üretimi, elektrik ve doğal gaz talebinin mevsimsellik değerlendirmesi

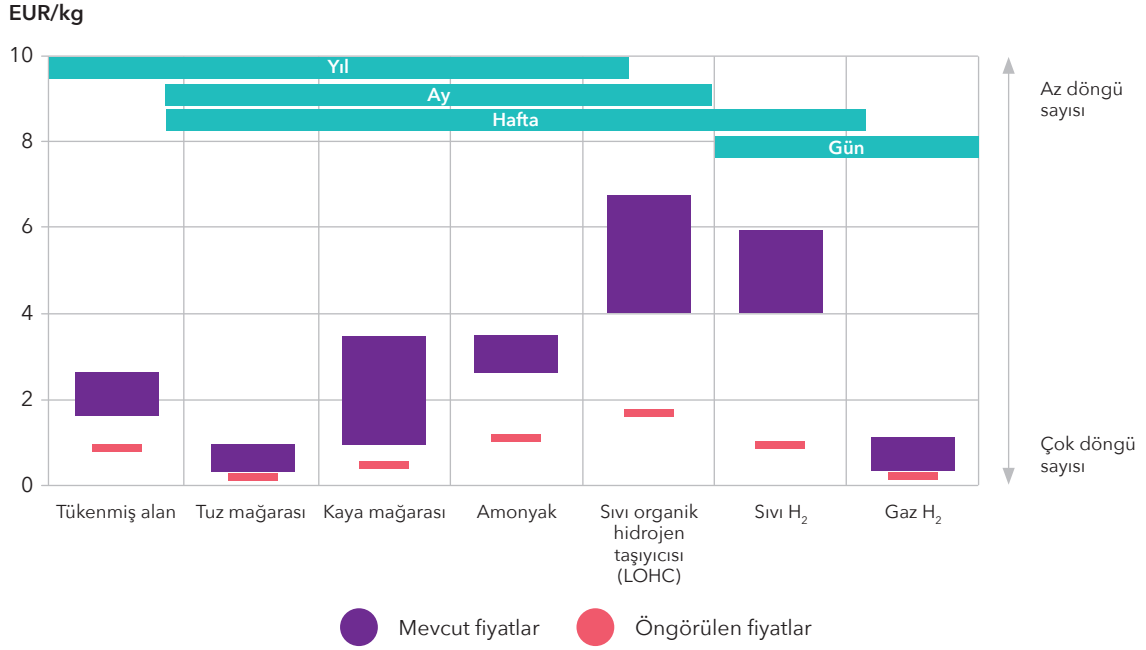


Kaynak: SHURA (2021)

Türkiye, halihazırda mevcut rezervuarları ve doğal gaz depolama tecrübesi nedeniyle jeolojik depolama sahaları geliştirme avantajına sahiptir. En büyük doğal gaz depolama sahası, ana talep merkezi olan İstanbul’un batısındaki Silivri’de bulunmaktadır. Doğal gaz için uygun olan alanlarda hidrojen de depolanabilmektedir. İkinci büyük yer altı doğal gaz depolama alanı ise Tuz Gölü’dür. Mevcut araştırmalar, Tuz Gölü’nün mevcut mağaralarında yaklaşık 2,5 TWh² hidrojenin depolanabileceğini göstermektedir (Şan ve diğerleri, 2021). Türkiye’nin tuz mağaraları büyük ölçekte hidrojen depolama potansiyeline sahiptir. Ayrıca, doğal gaz depolama sahalarından elde edilen deneyimler, benzerlikleri nedeniyle gelecek nesil hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkı sağlayacaktır (Dinçer ve diğerleri, 2020).

Tuz mağaralarının, daha uzun depolama süreleri dikkate alındığında diğer depolama yöntemlerine göre daha uygun maliyetli olduğu düşünülmektedir (Şekil 6). Tuz mağaraları ayrıca diğer jeolojik oluşumlarla karşılaştırıldığında daha yüksek döngü oranlarına sahiptir, bu da daha fazla sistem esnekliği anlamına gelmektedir.

² Moleküler ağırlığı nedeniyle doğal gazda bu değer 12 TWh’dır.

Şekil 6. Farklı teknolojiler için seviyelendirilmiş hidrojen depolama maliyeti



BÖLÜM 4

Hidrojenin Son Tüketim Noktaları

Yenilenebilir hidrojen, sektörlerin enerji dönüşümü planlamalarında hammadde ve yakıt alternatifi olan bir enerji taşıyıcısı olma potansiyeli nedeniyle önemlidir. Sanayi, ulaştırma, elektrik sektörü gibi çeşitli son kullanım sektörleri, bu potansiyelden faydalanabilecek öncelikli alanlardır. Özellikle doğrudan elektrifikasyonun karbonsuzlaşması zor sektörlerde yetersiz kaldığı alanlarda yenilenebilir hidrojenin fosil yakıtlara alternatif olması beklenmektedir. Böylelikle yenilenebilir hidrojen, tüm ekonominin karbonsuzlaşması için tamamlayıcı bir araç olacaktır.

Son tüketim noktaları kapsamında Türkiye'nin önündeki zorluklar ve fırsatlar

4.1 Üretim proseslerinde değişiklik gereksinimi

Demir-çelik sektörü

Demir-çelik sektöründe fosil yakıt kullanılmayan bir değer zinciri oluşturmak için üretimde yüksek fırın teknolojisinin (BF) ve bazik oksijen fırını teknolojisinin (BOF), hidrojen kullanabilir bir tesise dönüşebilmesi gereklidir. Diğer önemli husus, elektrik ark ocaklı (EAF) tesislerin DRI teknoloji kullanarak fosil yakıt kullanımını sınırlaması olacaktır.

Türkiye, 2023 yılında 33,7 milyon ton (Mt) üretim kapasitesi ile dünyanın en büyük sekizinci çelik üreticisi ve dokuzuncu büyük ihracatçısı olmuştur (Çelik İhracatçıları Birliği, 2025). Bu başarıyı elde ederken, diğer ülkelerin aksine halihazırda üretimin %70'ten fazlasının EAF teknolojiyle sağlanması, Türkiye'nin elektrifikasyon açısından dünya ortalaması (~ %35) karşısında daha iyi bir konumda olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu sektör kapsamında Türkiye'de dünya geneline göre daha düşük karbon yoğunluğu oluşmaktadır. Demir-çelik sektöründe emisyonların büyük bölümünü oluşturan BF ve BOF teknolojisinin H₂-DRI dönüşümü kritik olacaktır. Bunlarla birlikte, Türkiye'de henüz doğrudan indirgenmiş demir teknolojisinin bulunduğu EAF teknoloji (DRI-EAF) tesis bulunmamaktadır. Hidrojenin sektöre entegre edilmesi (H₂-DRI-EAF) ile de karbonsuzlaşma süreci hızlanacaktır. Buradaki en temel zorluk, bu dönüşümlerin yüksek yatırım maliyetlerini içermesidir.

Kimya ve Petrokimya sektörleri

Kimya sektörü ağırlıklı olarak petrokimya, gübre, ilaç vb. çeşitli ürünlerin üretiminin gerçekleştirildiği tesislerden oluşmaktadır. Türkiye'de kimya sektöründe kullanılan hammaddenin %70'i ithal edilmekte olup, sektör 2022 yılında 45,5 milyar ABD\$ değerinde ihracat gerçekleştirmiştir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024). Sektörün toplam enerji tüketiminin %64'ünü hem hammadde hem de yakıt olarak kullanılan fosil yakıtlar oluşturmaktadır (ETKB, 2023). Türkiye'de gri hidrojen (fosil yakıt bazlı) halihazırda çoğunlukla rafinerilerde olmak üzere petrokimya sanayisindeki bazı uygulamalarda, kimya sektöründe ve amonyak üretiminde kullanılmaktadır. Yenilenebilir hidrojen, kimya sektörünün birçok alt sektöründe hem hammadde hem de yakıt alternatifi olarak kullanılabilir. Özellikle, gri hidrojenden yenilenebilir hidrojene geçişin, mevcut altyapı ve kullanım alışkanlıkları nedeniyle daha kolay olabileceği öngörülmektedir. Bu dönüşüm, sektör kaynaklı emisyonların önemli ölçüde azalmasına katkı sağlayabilir. Fakat bu durum, ilgili sektörlerin üretim süreçlerinde belirli değişiklikleri ve ilave yatırımları da beraberinde getirecektir.

Ek olarak, sektörün metanol ihtiyacının tamamının ithalat yoluyla karşılandığı göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir hidrojen ile beraber yeşil metanolün Türkiye kimya sektörünün dönüşümünde bir fırsat olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.

Cam ve seramik sektörleri

Cam ve seramik sektörleri hem üretim konusunda hem de son yıllarda artırdığı ihracat başarısı ile Türkiye’nin önde gelen sanayi alt sektörleri arasında yer almaktadır. Her iki sektörün de üretim proseslerinde fırınlarda yüksek ısı gereksinimi bulunmakta olup, bu ihtiyaç genellikle doğal gazın yakıt olarak kullanımı ile sağlanmaktadır.³ Her iki sektörün de oluşturduğu emisyonların büyük bir kısmının yakıt kaynaklı olması dolayısıyla yenilenebilir hidrojenin doğal gazın yerine yakıt olarak kullanımı emisyonları büyük ölçüde azaltacaktır. Fakat, bu süreçte her iki sektörün üretim prosesinin hidrojene uyumlu hale getirilmesi için teknik fizibilite çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir. Cam sektörü özelinde fırın teknolojilerinin ve yanma süreçlerinin hidrojen alevine uygun hale getirilmesi, seramik sektöründe ise farklı kalorifik değere ve yoğunluğa sahip olması dolayısıyla hidrojene uygun olan brülör teknolojisinin kurulumu gerekmektedir. Ayrıca, tamamen doğal gaz tüketiminden, doğal gaz ve hidrojen karışımına geçiş sürecinde boru hattı ve bağlantı parçası değişim ihtiyacı doğabilir (Kamps ve diğerleri, 2021). Bu değişiklikler belirli yatırım maliyetlerini de beraberinde getirecektir.

4.2 Üretim ve tüketim noktalarının uzaklığı

Yenilenebilir hidrojen değer zincirinin ilk ve son aşamalarını oluşturan üretim ve tüketim noktalarının birbirine yakın ya da uzak bölgelerde konumlanması, özellikle başlangıç dönemlerinde çeşitli zorlukların ortaya çıkmasına neden olabilir. Yenilenebilir hidrojen üretim ve tüketim noktalarının farklı bölgelerde konumlandığı durumlarda hidrojenin son tüketim noktalarına taşınması gerekmektedir. Bir başka deyişle, Türkiye’nin halihazırda güçlü bir doğal gaz boru hattı altyapısına sahip olmasına karşın, hidrojene yönelik özel değişiklikler yapılmadığı takdirde boru hatları ile taşıma yapılması kısa-orta vadede pek mümkün değildir. Hidrojenin doğal gaz ile karıştırılması durumunda bile çalışmalar, hidrojen içeriğinin karışımda maksimum %20 oranında olabileceğini göstermektedir. Bu durumda, hidrojenin sıkıştırılarak veya sıvılaştırılarak taşınması öne çıkmaktadır. Bu seçenekler ise maliyetli ve enerji kayıplarına yol açan alternatiflerdir. İç tüketimde hidrojenin taşınmasında karayolu kullanılarak son tüketim noktalarına hidrojenin ulaştırılması için de belirli lisanslama gereksinimleri, sertifikasyon gibi izinlerin alınması gerekecektir.

Bu bağlamda, ilk aşamada yenilenebilir hidrojen üretim ve tüketim noktalarının aynı bölgede konumlanması, altyapı ihtiyaçlarını azaltılmasında fayda sağlayabilir. Özellikle enerji talebinin yoğun olduğu alanlarda, yenilenebilir enerji projeleriyle entegre merkezi bir elektrolizör tesisi kurulması, sanayi sektörüne doğrudan kullanım için ilk aşamada görece güvenilir ve kesintisiz bir tedarik sağlayabilir. Yerinde üretim, taşımadan kaynaklı enerji kayıplarını ve güvenlik risklerini ortadan kaldırırken, üreticilerin karbon ayak izini azaltmasına olanak tanır.

³ 2023 yılında cam sektörünün toplam enerji tüketiminin %72’sini, seramik sektörünün %58’ini doğal gaz oluşturmuştur (ETKB, 2024).

4.3 Depolama ihtiyacı

Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin son tüketim sektörlerinde kullanımının önündeki uzun vadeli ve kritik engellerden biri, güvenilir bir depolama altyapısının henüz oluşturulmamış olmasıdır. Mevcut durumda hidrojen depolama yatırım maliyetleri yüksek olmakla birlikte, depolama standartları ve düzenleyici çerçeve henüz tam olarak belirlenmemiştir.

Türkiye, halihazırda mevcut rezervuarları ve doğal gaz depolama tecrübesi nedeniyle jeolojik depolama sahaları geliştirme avantajına da sahiptir. Fakat bu tip depolama yöntemleri için de yenilenebilir hidrojen özelinde belirli mevzuat ve standartların oluşturulması gerekmektedir. Tüm bu unsurlar, Türkiye’nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecinde depolamayı hem stratejik bir konu hem de kurulması planlanan hidrojen ekosisteminin temel altyapı ihtiyaçlarından biri haline getirmektedir.

4.4 Yeni yatırım ve maliyet

Son tüketim sektörlerinde yenilenebilir hidrojen kullanımına geçiş, mevcut teknolojilerin ve süreçlerin hidrojenle uyumlu hale getirilmesini gerektirdiğinden önemli ek yatırım ve maliyetleri beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda, Türkiye’deki son tüketim sektörlerinin yenilenebilir hidrojen kullanımına yönelik teknik altyapı ve üretim proseslerinde belirli değişiklikleri planlamaları gerekmektedir. Bu süreç, ekipman değişiminin yanı sıra, mevcut üretim hatlarının hidrojenin farklı yanma özellikleri ile basınç ve güvenlik gerekliliklerine uyum sağlayacak biçimde yeniden düzenlenmesini de kapsamaktadır. Bu değişiklikler bazı yeni yatırım ve ek maliyetleri de beraberinde getirecektir. Türkiye’de halihazırda gri hidrojen kullanılan petrokimya gibi sektörlerde, bu dönüşüm sürecinde oluşacak ek maliyetlerin diğer sektörlerle göre kıyasla daha düşük olması beklenmektedir.

Tüm bu dönüşümlere ek olarak, işletmelerin çalışanları için hidrojen teknolojilerine yönelik eğitim programları oluşturmaları, yeni güvenlik prosedürleri geliştirmesi ve bakım-onarım altyapılarını güncellemesi, operasyonel maliyetlerin artmasına yol açabilecektir. Bu nedenle yenilenebilir hidrojen, uzun vadede önemli fırsatlar sunsa da kısa ve orta vadede son tüketim sektörleri açısından belirli bir ekonomik ve teknik uyum maliyeti yaratması beklenmektedir.

4.5 Gemi ve havayolu taşımacılığında yenilenebilir hidrojen türevlerinin tüketimi

Ulaştırma sektörü, özellikle uzun mesafe taşımacılığı, Türkiye’nin uluslararası ticareti açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye İstatistik Kurumu’nun (TÜİK) verilerine göre, 2024 yılında ihracatın %65,7’si (%55,8 denizyolu, %9,9 havayolu), ithalatın ise %68,3’ü (%54,5 denizyolu, %13,7 havayolu) uzun mesafe taşımacılığı ile gerçekleştirilmiştir (TÜİK, 2025). Bu veriler, ülkemizdeki limanlar ve havalimanlarının dış ticaret etkinliği açısından stratejik önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Kısa vadede, ulaştırma sektöründe doğrudan elektrifikasyonun öncelikli bir strateji olacağı değerlendirilmektedir. Özellikle düşen batarya maliyetleri, binek otomobillerin elektrifikasyonu için cazip bir çözüm sunmaktadır. Orta vadede ise, uzun mesafe taşımacılığında hidrojen ve türevlerinin daha yaygın şekilde kullanılması beklenmektedir. Gemi ve havayolu taşımacılığının karbonsuzlaşmasında yenilenebilir hidrojen ve türevleri, orta ve uzun vadede önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Bu doğrultuda, yenilenebilir hidrojen türevlerinin özellikle havayolu ve denizyolu taşımacılığında kullanımı orta-uzun vadede teşvik edilmelidir. Örneğin, AB ReFuelEU Havacılık girişimi kapsamında havayolu taşımacılığı için örnek bir uyum paketi hazırlanmıştır. Bu çerçevede kabul edilen tüzük, Avrupa'ya incek her uçakta belli bir oranda Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (Sustainable Aviation Fuel, SAF) tüketimini zorunlu kılmaktadır. SAF kullanım oranı 2025 yılında %2 ile başlayacak, 2030 yılında %6'ya ve 2050 yılında ise %70'e ulaşacaktır. Ayrıca, 2030 yılından itibaren yakıtların %1,2'sinin, 2050 yılı itibarıyla ise %35'inin sentetik yakıtlardan oluşması gerekecektir (T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı, 2023). Paketin ana hedefi, fosil yakıt kaynaklı üretilen kerosene göre daha düşük karbondioksit (CO₂) emisyonuna sahip olan SAF'ın hem talebini hem de arzını artırmak ve AB hava taşımacılığı pazarında adil bir rekabet ortamı sağlamaktır. SAF kullanımının yaygınlaştırılmasıyla havayolu taşımacılığı kaynaklı karbon salınımının azaltılması hedeflenmektedir. Denizyolu taşımacılığı kapsamında ise 27. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Taraflar Konferansı (COP27) sürecinde bu yönde adımlar atılmıştır. Mevcut durumda küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %3'ünü oluşturan denizyolu nakliye taşımacılığı, herhangi bir müdahale olmaması durumunda 2050 yılında bu oranım %50'ye kadar ulaşacağı belirtilmektedir. COP27'de yapılan anlaşma doğrultusunda, 2030 yılına kadar denizyolu taşımacılığında kullanılmak üzere yenilenebilir hidrojen üretiminin yılda 5,5 milyon tona (Mt) çıkması ve en geç 2050 yılına kadar denizyolu taşımacılığının tamamen karbonsuzlaştırılmasında mutabık kalınmıştır.

Türkiye'nin uluslararası ticareti için kritik öneme sahip denizyolu ve havayolu taşımacılığında yenilenebilir hidrojen kullanımının, belirlenecek kotalar ve planlamalar doğrultusunda orta vadeli hedeflerin arasına alınması, bu sektörlerdeki dönüşüm için itici güç olabilir.

4.6 Demir-çelik sektöründe EAF teknolojisinin durumu

Türkiye, demir-çelik sektörünün karbonsuzlaşmasında diğer ülkelere kıyasla öncü bir rol üstlenmektedir. Mevcut durumda Türkiye'deki toplam 44 demir-çelik üretim tesisinin 30 tanesi EAF teknolojisine sahip tesislerdir (Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2025).

Küresel ölçekteki çelik üretiminin aksine, Türkiye'deki toplam üretim kapasitesinin yıllık ortalama %65'i EAF tesislerinde hurda çelik kullanılarak üretilmektedir (SHURA, 2023). Bu nedenle, Türkiye çelik üretiminde halihazırda yüksek bir elektrifikasyon oranına sahip olup, sektörde dünya geneline göre daha düşük karbon yoğunluğu gerçeğleşmektedir.

Toplam üretimin ve tesis tipi dağılımının büyük çoğunluğunu EAF teknolojisinin oluşturması, Türkiye'de hidrojenin demir-çelik sektörüne entegrasyonunu kolaylaştıracaktır. Bu süreç, öncelikle doğrudan indirgenmiş demir (DRI) teknolojisinin uygulanması ve ardından hidrojen bazlı DRI teknolojisine devreye alınmasıyla ilerleyecektir. AB'nin karbon düzenlemelerinde öncü rol oynayan Sınırdan Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) kapsamında yenilenebilir hidrojenin stratejik bir seçenek olacağı düşünüldüğünde, Türkiye demir-çelik sektörünün dönüşümünde diğer ülkelere kıyasla avantajlı bir konumda olacaktır.

4.7 Mevcut gri hidrojen talebi

Türkiye’de petrokimya sektöründe, özellikle rafinerilerde, bazı uygulamalarda ve amonyak üretiminde gri hidrojen kullanılmaktadır. Bu sektörlerdeki hidrojen tüketimine yönelik mevcut altyapı ve operasyonel deneyim sayesinde, halihazırdaki kullanıcılar yenilenebilir hidrojeni üretim süreçlerine entegre etmeye daha yatkın olacaktır. Ancak, gri hidrojene kıyasla farklı basınç ve saflık seviyesi gereksinimlerinin karşılanması ihtimaline karşın analizler gerçekleştirilmesi ve proses ekipmanlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Buna rağmen, halihazırda var olan gri hidrojen talebi, yenilenebilir hidrojen üreticileri için güvenilir bir pazar oluştururken aynı zamanda dönüşüm sürecinde diğer sektörlerle öncülük edecektir.

4.8 Organize Sanayi Bölgeleri (OSB)

İlk aşamada kurulacak elektrolizör tesislerinin, son tüketim sektörlerinin üretim yaptığı fabrikalara yakınlığı, hem maliyet hem de altyapı kurulumu açısından önemli olacaktır. Bu noktada organize sanayi bölgeleri (OSB) çok sayıda son tüketim sektörünü barındırmaları ve enerji altyapısı açısından sundukları avantajlarla öne çıkmaktadır. Türkiye’de çeşitli illerde OSB’lerin bulunması, pilot tesis kurulacak ilin seçimi için birden fazla alternatif sunmaktadır.

İzmir OSB’nin, hidrojeni doğrudan tüketebilecek demir-çelik ve kimya sektörlerine yönelik tüketicileri barındırması ve ilin yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli ile elektrolizör tesisi kurulumu için bir alternatif olabilir. Böylelikle, hidrojenin depolanması ve taşınması gibi maliyetli süreçlerin de önüne geçilebilecektir. İzmir OSB’de bulunan yüksek gerilim elektrik hatları, elektrolizör teknolojisinin yüksek elektrik tüketimi göz önünde bulundurulduğunda avantaj sağlayacaktır. Ayrıca, ilgili OSB’de atık su yönetimi konusunda altyapı da bulunmaktadır. Kimya sektörünün OSB’lerden sonra en çok doğal gaz tüketen sektör olması nedeniyle, İzmir OSB’nin sahip olduğu doğal gaz altyapısı sektörün kademeli geçişine de yardımcı olacaktır. Bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda, İzmir OSB’de bulunan ve gerekli teknik altyapının geliştirilmesi sonrası yenilenebilir hidrojeni tüketecek fabrikalar bu dönüşümde ilgili sektörlerle öncülük edecektir.



BÖLÜM 5

Standartlar

Yenilenebilir hidrojenin üretiminden son tüketim sektörlerindeki tüketimine kadar olan tüm aşamaları kapsayan hidrojen değer zincirinin belli standartlar çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda başta ISO 14687:2025 olmak üzere CertifHy, ISO/TS 19870 gibi standartlar hidrojenin kalite gereksinimleri, sertifikalandırma süreçleri ve izlenebilirlik gibi teknik ve çevresel kapsamdaki konularda uluslararası düzeyde ortak bir zemin oluşturmayı amaçlamaktadır.⁴ Dolayısıyla, bir ülkedeki yenilenebilir hidrojenin standartlarla uyum düzeyi hem ulusal düzeyde belirlenen hedeflere ulaşım ile enerji politikaların etkinliği ve uluslararası ölçekteki pazarlara katılım kapasitesi açısından önemli bir gösterge niteliği taşımaktadır. Bu kapsamda Türkiye’de yenilenebilir hidrojen değer zincirinin uluslararası standartlara ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi dış ticaret odaklı düzenlemelere uygun bir şekilde oluşturulması, küresel hidrojen pazarında rekabetçi bir konuma gelmesini kolaylaştıracaktır.

Standartlar kapsamında Türkiye’nin önündeki zorluklar ve fırsatlar

5.1 Küresel standartlaşma sürecine uyum

Yenilenebilir hidrojenin yaygınlaştırılması için birçok ülke ve bölge, üretimden son tüketim noktalarına kadar tüm değer zincirine yönelik kapsamlı standartlar geliştirmektedir. Bu standartlar, hem yatırım güvenliği hem de uluslararası ticarete karşılıklı tanınabilirliğin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Ayrıca bu standartlar çerçevesinde hidrojen üretim yöntemleri, karbon ayak izi, saflık derecesi ve değer zincirinin aşamalarında güvenlik sağlanması kapsamındaki kriterler de bulunmaktadır.

Bu bağlamda ülkeler kendi iç düzenlemelerini geliştirmekte olup, uluslararası standartlara uyum ve uluslararası anlaşmalara katılım sağlama yönünde adımlar atmaktadır. Örneğin, Uluslararası Standardizasyon Örgütü’nün (ISO) Hidrojen Teknolojileri Teknik Komitesi Alt Komitesi (ISO/TC197 SC1) COP28’de, hidrojen üretimi ve taşınmasındaki sera gazı emisyonlarının belirlenmesine ilişkin taslak teknik şartnameyi (ISO/TS 19870:2023) sunmuştur (ISO, 2023). İlgili şartnamenin, tedarik zincirinin tamamını kapsayacağı belirtilmektedir. Türkiye’nin bu standarda uyum potansiyeli, hem teknik kapasitesi hem de belirlediği stratejik hedefler doğrultusunda oldukça yüksektir. Ancak bu potansiyelin gerçeğe dönüştürülmesi için, yenilenebilir hidrojen özelinde bir sertifikasyon altyapısının oluşturulmasına yönelik adımlar atılması gerekmektedir. Örneğin Hollanda, Avrupa’da faaliyet gösteren ve ISO/TS 19870 sertifikasyonu ile uyumlu yenilenebilir hidrojen garanti sertifikaları sunan CertifHy sistemi üzerinden çalışmaktadır (CertifHy, t.y.). Bu sistem, yenilenebilir hidrojenin kaynağı, sera gazı yoğunluğu gibi bilgiler şeffaf ve doğrulanabilir bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır. İlgili sertifikasyon, dünyada hidrojen için ilk hükümet dışı menşe garantisi planının temelini oluşturmuştur (Clean Hydrogen Partnership, 2020).

AB, “Renewable Energy Directive” (RED) altında hidrojenin yenilenebilir olarak kabul edilebilmesi için üretim sürecinde çevresel kriterler ve karbon emisyon hedefleri belirlemiştir. Bu kapsamda hidrojen su elektrolizi ile yenilenebilir elektrikten üretildiğinde “Biyolojik Kökenli olmayan Yenilenebilir Sıvı ve Gaz Yakıtlar” (Renewable Liquid and Gaseous Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO) olarak kabul edilmektedir (Avrupa Parlamentosu, t.y.). Bu terim, biyokütle dışında yenilenebilir

⁴ ISO 14687:2025, PEM yakıt hücreleri ve içten yanmalı motorlar gibi teknolojilerde hidrojen yakıtının güvenli ve verimli kullanımının desteklenmesini sağlamak için kalite standardını desteklemektedir (ISO, 2025). ISO/TS 19870:2023 ise çeşitli hidrojen üretim yollarında sera gazı emisyonu değerlendirmesinin standartlaştırılması açısından kritik öneme sahiptir (ISO, 2023).

enerji kaynaklarından üretilen yenilenebilir hidrojeni ve biyokütle kullanılmadan üretilen diğer yenilenebilir yakıtları kapsayan genel bir terimdir. Bu düzenleme kapsamında 3,38 kg CO₂e/kg H₂ olan yaşam döngüsü bazlı emisyon sınırı altında olduğu takdirde yeşil kabul edileceği belirtilmektedir. Ayrıca, bu süreçte %70 oranında sera gazı emisyonu azaltımı beklenmektedir (Avrupa Parlamentosu, 2023).

AB, “Guarantees of Origin” (H-GOs) kapsamında yenilenebilir hidrojenin üretimi sürecinde kullanılan elektriğin yenilenebilir olma niteliğini ve üretilen hidrojenin kaynağını belgeleyen sistemler oluşturmaktadır (Emissions-EUETS, 2025).

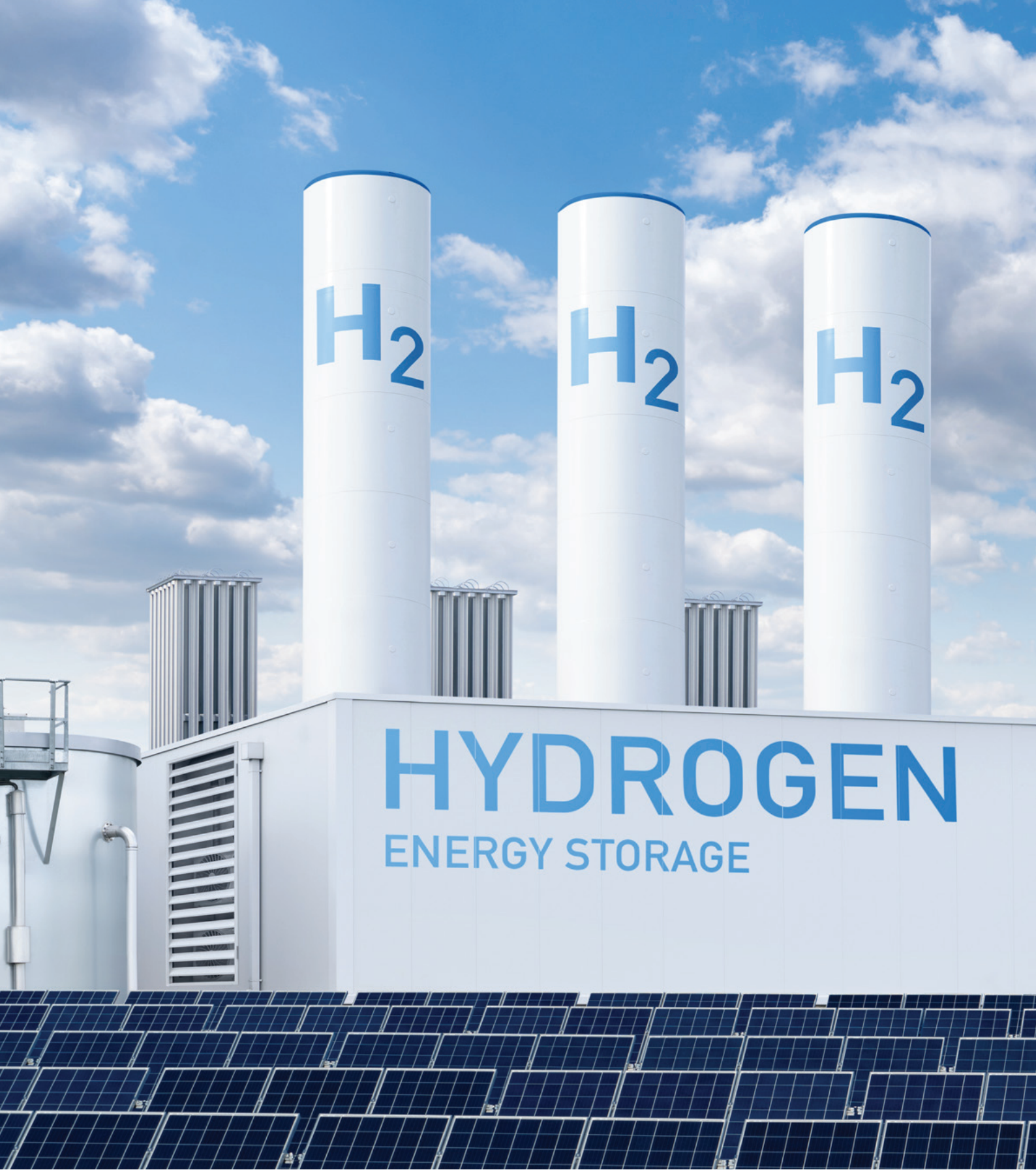
Almanya, “Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies” yol haritası ile yenilenebilir hidrojen de dahil olmak üzere hidrojen teknolojilerine ilişkin teknik düzenlemeleri belirlemiştir. Bu düzenlemeler, altyapı, üretim, taşıma, kalite ve güvenlik standartlarını kapsayacak şekilde ulusal ölçekte koordineli bir yol haritası sunmaktadır. Hidrojen teknolojilerine ilişkin nihai standardizasyon yol haritasının 2025 yılı sonunda yayınlanması planlanmaktadır (DIN, 2025).

Yeni Zelanda ise hidrojenin üretimine, tüketimine ve güvenlik standartlarına ilişkin 13 adet ISO standardını⁵ benimseyerek ölçeklendirilmiş yerel üretim ve ihracat için yol haritası oluşturmuştur. Atılan bu adım ile, yenilenebilir hidrojen ticaretinin önünün açılması ve enerji dönüşümünün en etkili ve verimli yolu olduğu belirtilmiştir. Bir sonraki aşamada, doğal gaz şebekesinin dağıtım hattına yaklaşık %20 oranında hidrojen entegrasyonu planlanmakta ve ağır hizmet araçlarının yakıt ikmalini desteklemek amacıyla elektroliz ve yerinde hidrojen üretimini kapsayan 10 adet ek standardın kabulüne odaklanılmaktadır (Standards New Zealand, 2024).

2023 yılının sonunda Dubai’de gerçekleştirilen COP28’de Hidrojen Deklarasyonu (COP28 Declaration of Intent) gündeme gelmiş, ilgili deklarasyon 37 ülkenin imzası ile hayata geçirilmiştir (COP28, 2023). Bu deklarasyonun özünde, katılımcı ülkeler yenilenebilir ve düşük karbonlu hidrojen (ve türevleri) için karşılıklı tanınabilir sertifikasyon sistemleri geliştirme ve küresel ticaretin önünü açma konusunda iş birliği yapma niyetlerini ortaya koymaktadır. Bu süreçte ISO’nun hidrojen üretim ve taşımadaki sera gazı emisyon metodolojisi gibi uluslararası kabul görmüş standartların dikkate alınacağı, ilerlemelerin her yıl düzenli olarak takip edileceği belirtilmiştir.

Küresel yenilenebilir hidrojen standartlarının, karbon yoğunluğu, izlenebilirlik, güvenlik ve sertifikasyon uyumluluğu başlıklarına odaklandığı görülmektedir. Hem iç tüketim hem de ihracat potansiyeli açısından önemli bir konumda olan Türkiye’nin bu potansiyele ulaşabilmesi için standartlaşma ile uluslararası uyumun, mevzuat ve altyapı gelişimiyle birlikte eş zamanlı olarak planlanması ve hayata geçirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir hidrojen ihracatında hedef pazarların yüksek kalite ve belli sertifikasyon standartlarına sahip hidrojen talep etmelerinden ötürü, Türkiye’nin başlangıç aşamasında uyum maliyetlerinin yüksek olacağı öngörülmektedir. Türkiye bu standartlarla uyumlu bir yenilenebilir hidrojen ekosistemi kurmak için önemli potansiyele sahip olsa da, ulusal yenilenebilir hidrojen standartlarını ve sertifikasyon sistemini oluşturulması gerekmektedir. Bu standartlar oluşturulurken, Avrupa pazarına ihracat potansiyelini değerlendirebilmek için ISO standartları ve RFNBO kriteriyle uyum sağlanması önemli olacaktır.

⁵ ISO, hidrojen değer zincirinde bulunan adımlara yönelik belirli standartlar oluşturmuştur. Hidrojenin üretimi, depolanması, taşınması gibi adımları kapsayan temel referanslar raporun Ek-A bölümünde verilmektedir.



BÖLÜM 6

Teknoloji Gelişimi

Yenilenebilir hidrojen maliyetini etkileyen birçok unsur bulunmaktadır. Hidrojen değer zincirinde kullanılan teknolojilerin yerli olarak üretilmesi ya da ithal edilmesi bu unsurlar arasında yer almaktadır. Bu teknolojiler yalnızca elektrolizör ile sınırlı kalmayıp, hidrojenin taşınması esnasında kullanılan taşıma ve lojistik sistemleri (örneğin, boru hattı sistemleri, tankerler) ve depolama sistemleri (basıncı gaz tankları, sıvı hidrojen depolama vb.) de dahil olmak üzere geniş bir yelpazeyi içermektedir. Bu kapsamda yenilenebilir hidrojen değer zincirinde bulunan teknolojilerin yerli üretimi, bu alanda dışa bağımlılığı azaltmada önemli bir strateji olacaktır.

Teknoloji gelişimi açısından Türkiye'nin önündeki zorluklar ve fırsatlar

6.1 Mevzuat, standartlar ve patent kısıtları

Yenilenebilir hidrojen üretim sürecinde kullanılan teknolojilere ilişkin düzenleme ve teknik standartların henüz oluşturulmamış olması, Türkiye'nin teknoloji geliştirme sürecini olumsuz etkilemekte ve gelecek yatırımları kısıtlamaktadır.

Yenilenebilir hidrojen üretiminde kritik rolü olan elektrolizör, yakıt hücresi, hidrojen depolama tankları gibi teknolojilerin büyük bir kısmı Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri ve Asya ülkelerinde faaliyet gösteren firmalar tarafından patentlenmiştir. Bu durum, Türkiye'nin özgün ürün ve sistem geliştirmesini zorlaştırmakta, lisans bedelleri ve fikri mülkiyet sınırlamaları nedeniyle de maliyetleri artırmaktadır.

6.2 Eğitim ve insan gücü eksikliği

Son yıllarda Türkiye'de yenilenebilir hidrojen değer zincirinde bulunan belirli teknolojilere yönelik araştırma geliştirme (Ar-Ge) çalışmaları yürütülmeye başlansa da, bu teknolojilerin ticarileştirilmesi ve yaygınlaştırılması için insan kaynağının oluşturulması da önemlidir. Bu doğrultuda, insan kaynağına yönelik stratejik bir yaklaşım benimsenmesi, özellikle kimya mühendisliği ve proses mühendisliği gibi kritik öneme sahip mühendislik alanları desteklenmesi gerekmektedir. Bu süreçte yenilenebilir hidrojen üretiminde kullanılan teknolojileri geliştirmek için hangi alanlarda insan kaynağına ihtiyaç duyulduğunu analiz ederek sürecin yönetilmesi de değerlendirilmelidir. Ayrıca, üniversitelerde ve meslek yüksekokullarında hidrojen, yakıt hücresi gibi alanlara yönelik program ve seçmeli derslerin müfredata eklenmesi gereklidir.

6.3 Ar-Ge faaliyetlerine yönelik destek

Teknolojinin yerleştirilmesi ile bu konuda dışa bağımlılık azaltılabilir ve teknoloji ithal eden konumdan, teknoloji ihraç eden bir ülke konuma gelinebilir. Bu doğrultuda son yıllarda yenilenebilir hidrojen üretim sürecinde kullanılan bazı teknolojilere yönelik Ar-Ge faaliyetlerine ağırlık vermiş, bu kapsamdaki projelere yatırım artırılmıştır. Özellikle TÜBİTAK ve ETKB öncülüğünde yürütülen programlar ile üniversitelerin bu süreçte aktif rol üstlenmeleri, akademik ve teknik altyapının güçlendirilmesi açısından önemli bir girişim olmuştur. Bu süreçte kamu tarafından yayımlanan çeşitli politika dokümanlarında ve eylem planlarında da yenilenebilir hidrojen teknolojisi ihtiyaçlarına yönelik hedefler belirlenmiştir. Mevcut durumda bu bağlamdaki en kapsamlı strateji dökümanı

“Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” olmuştur. İlgili dokümanda kamu tarafında yenilenebilir hidrojen teknolojilerine yönelik hedefler ve ihtiyaçlar belirlenmiş, Ar-Ge teşviklerinin uygulanması uygulanacak politikalar arasında yer almıştır (ETKB, 2023).

Avrupa Yeşil Mutabakatı Eylem Planı kapsamında 2022 yılında T.C. Ticaret Bakanlığı tarafından “Teknolojik Dönüşüm/Gelişim İhtisas Çalışma Grubu” kurulmuştur. Bu çalışma grubundan elde edilen çıktılarla, Türkiye’nin yeşil kalkınma hedefleri doğrultusunda sanayi kuruluşlarının teknolojik ihtiyaçlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Altı büyük sanayi alt sektörünün ele alındığı çalışmada kimya ve çimento sektörlerinde yenilenebilir hidrojen konusu yer almıştır. Kimya sektöründe yenilenebilir hidrojenin depolama ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik planlamalar yer alırken, çimento sektöründe ise Ar-Ge kapsamında konvansiyonel fırınlarda hidrojenin yakıt olarak kullanımına yönelik teknoloji geliştirme çalışmalarına odaklanılacağı belirtilmiştir (TÜBİTAK, 2023; TÜBİTAK, 2023).

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2024 yılında “Türkiye Sektörel Düşük Karbonlu Yol Haritaları” çalışmasını yayımlamıştır. Çelik, alüminyum, çimento ve gübre sektörlerinin ele alındığı çalışmada, 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşma yolunda yapılması gerekenler incelenmiştir. Çelik sektöründe yüksek ısırlı fırınların yerini hidrojen bazlı DRI teknolojisinin alması, çimento sektöründe ise yenilenebilir hidrojenin kullanımına yönelik uygun teknoloji tespit çalışmalarının yürütülmesi hedeflenmiştir. Gübre sektöründe ana girdi olarak kullanılabilen yenilenebilir hidrojen ve yeşil amonyağın üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla Ar-Ge çalışmalarının yürütülmesi de amaçlanmıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024).

Kasım 2024 tarihinde yayımlanan 2025 yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı’nda, yenilenebilir hidrojen değer zinciri süreçleri ile ilgili bileşen, ekipman ve sistemlerin yerli imkanlarla geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi için destek verileceği belirtilmiştir. Bu kapsamda, TENMAK tarafından desteklenen kimyasal hidrojen depolama yöntemine dayalı Ar-Ge projesinin yürütüleceği açıklanmıştır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2024).

Uluslararası düzeyde, çeşitli AB fonları Türkiye’deki Ar-Ge çalışmalarının önemli bir finansman kaynağını oluşturmaktadır. Bu fonlar arasında “Horizon Europe” diğer Avrupa ülkelerindeki araştırmacılar ile etkileşim fırsatı sunması nedeniyle, üniversite, kamu ve özel sektör araştırmacıları tarafından tercih edilmektedir (Oyan ve diğerleri, 2024).

Kamu strateji dokümanlarında politikaların ve eylem planlarının belirlenmiş olması, Türkiye’nin yerli teknoloji üretimi ve gelişimi konusundaki kararlılığını göstermektedir. Belirlenen hedefler doğrultusunda yapılacak yatırımlar, uluslararası fonlara erişim için küresel standartlarla uyum, nitelikli insan kaynağının geliştirilmesi ve üniversite ile sanayi iş birliklerinin güçlendirilmesi yoluyla hidrojen ekonomisinin gelişimine katkı sağlayacaktır.

6.4 Sanayi altyapısı

Yenilenebilir hidrojen ekosistemi çok sayıda alt sektöre yatırım fırsatı sunmaktadır. “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” dokümanının yayımlanması ile beraber bu alanda somut

adımların atılmaya başlanması, Türkiye’deki potansiyel üretici ve yatırımcılar için önemli avantajlar sağlamıştır. Bu bağlamda, yenilenebilir hidrojen değer zincirinde yer alan teknolojilerin yerli olarak ve yeterli düzeyde üretilmesi gerekmektedir.

Elektrolizör teknolojisinin yerli olarak üretimi için 2022 yılında TÜBİTAK MAM öncülüğünde, kamu, özel sektör ve akademi işbirliği Ar-Ge çalışmaları yürütülmeye başlanmıştır. 20 Aralık 2024 tarihinde %99,9 saflık oranında hidrojen üretebilen ilk yerli proton değişim membran (PEM) elektrolizörünün tamamlandığı açıklanmıştır (Temiz Enerji, 2024). Bu çalışmaları takiben, Aselsan ve bazı üniversiteler de Ar-Ge yatırımları bu teknolojinin yerli üretimine yönelik çalışmalara başlamıştır. Ancak henüz yerli elektrolizör üretimi ölçeklendirilememiştir.

Buna karşın uluslararası ölçekte elektrolizör üretimi için gelişmiş bir pazar bulunmaktadır ve küresel elektrolizör üretim kapasitesinin yaklaşık %60’ı Çin tarafından sağlanmaktadır (IEA, 2025). Elektrolizörün yüksek teknolojiye sahip bazı parçalarının Türkiye’de üretilebilmesi için sektörel birikim ve insan kaynağı oluşturulması sağlanabilir. Böylelikle, Türkiye’de yüksek teknoloji üretim sürecine zemin hazırlanabilir. Ar-Ge çalışmalarının ve teşviklerin sürdürülebilirliği sağlandığında, Türkiye 2030-2035 döneminde membran çeşitleri gibi yüksek teknoloji bileşenlerin üretimine birlikte tam sistem üreticisi konumunu üstlenebilir. Bu strateji, Türkiye’ye hem enerji dönüşümünde bağımsızlık hem de ekonomik fayda sağlayabilecek bir yol sunacaktır.

Yerinde üretilen hidrojenin depolanması için hidrojen depolama tankları gerekmektedir. Hidrojenin depolanması ve taşınmasında kullanılan kompresör, vana ve soğutma sistemlerinin üretimi Türkiye’de sınırlı olup çoğunlukla ithal edilmektedir. Bu komponentler, hidrojen üretiminde stratejik öneme sahiptir. Belirtilen ekipmanların henüz üretilmiyor olmasına karşın, Türk makine ve kimya endüstrisinin altyapısı bu alanda üretim yapabilecek kapasiteye sahiptir. “Hidrojen Teknoloji Stratejisi ve Yol Haritası” dokümanında da hidrojen dağıtımı için kompresör uygulamalarına 2030 yılı itibarıyla ağırlık verilmesi hedefi konulmuştur (ETKB, 2023).

6.5 Üniversite, kamu ve özel sektör koordinasyonu

Türkiye’de elektrolizör teknolojisinin yerli üretimini sağlamak amacıyla üniversiteler ile kamu/özel sektör arasında iş birliği sağlanmasına öncelik verilmektedir. T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) tarafından 8 Eylül 2025 tarihinde yayımlanan ve 2026-2028 dönemini kapsayan “Orta Vadeli Program (2026-2028)” dokümanında, üniversite-sanayi iş birliği modeli kapsamında Ar-Ge laboratuvarlarının destekleneceği belirtilmiştir (SBB, 2025).

Yenilenebilir hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve nihai kullanımına yönelik ekipmanların yerli üretimi için üniversite, kamu ve özel sektör arasındaki koordinasyonun güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda Türkiye’nin Otomobil Girişim Grubu (TOGG) benzeri, kamu ve özel sektörün birlikte hareket ettiği bir çalışma modelinin, hidrojen teknolojileri alanında da uygulanması değerlendirilebilir. Diğer taraftan, üniversitelerde kurulacak pilot araştırma merkezlerinin sektörel ihtiyaçlara doğrudan yanıt verecek şekilde tasarlanması ve gerektiğinde teknoloji gelişimini hızlandırmak amacıyla uluslararası teknoloji ortaklıklarının kurulması kritik önem taşımaktadır.



BÖLÜM 7

İhracat ve
Uluslararası İş
Birlikleri

Yenilenebilir hidrojen, enerji dönüşümünün tamamlayıcı bir unsuru olmanın ötesinde, yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek ülkeler için stratejik bir ihracat ürünü olarak da değerlendirilmektedir. Yakın gelecekte dünya genelinde artması beklenen hidrojen talebi, bu alanda uluslararası iş birliklerini kritik bir unsur haline getirmiştir. Ülkeler arasında farklı alanlarda kurulan ortaklıklar, yenilenebilir hidrojen pazarının oluşumu açısından belirleyici bir rol oynamaktadır.

İhracat ve uluslararası iş birlikleri açısından Türkiye’nin önündeki zorluklar fırsatlar

7.1 Uluslararası rekabet

Net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda birçok ülke eylem planları hazırlamış ve planlarında yenilenebilir hidrojene önemli bir yer vermiştir. Yenilenebilir hidrojen alanında giderek artan küresel rekabet ile birlikte ülkeler, ihracatçı konumuna gelmek için çalışmalara başlamıştır. Bu kapsamda Avrupa ve Körfez ülkeleri, hidrojen ihracatına yönelik iddialı planlar ortaya koymuştur. Öte yandan, IEA verilerine göre, 2024 yılı itibarıyla yenilenebilir hidrojen üretim tesislerine yönelik nihai yatırım kararı alınmış veya inşaatı başlamış projeler, küresel ölçekte öngörülen kapasitenin yalnızca %4’ünü temsil etmektedir (IEA, 2025).

Türkiye, yerli yenilenebilir hidrojen üretimine yönelik olarak, sektörel tüketim analizleri yürüterek, öngörülen iç talebi ve ihtiyaç fazlası üretimi ihracat için kullanan bütüncül bir yol haritası oluşturabilir. Küresel tedarik zincirinde önemli bir rol üstlenebilmek için yenilenebilir hidrojenin diğer ülkelere kıyasla görece düşük maliyetle üretilmesi, güçlü bir altyapı ile desteklenmesi ve uluslararası standartlara uygunluğunun sağlanması gibi birçok parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

7.2 Standartların oluşturulması

SHURA (2022) analizlerine göre, 2050 yılına kadar Türkiye’de yenilenebilir enerji kullanımı ve maliyet etkin yatırımların teşvik edildiği politikalar çerçevesinde yıllık 3,4 Mt yenilenebilir hidrojen (3,4 Mt H₂/yıl) üretilebileceği hesaplanmaktadır. Ayrıca, iç talep dışında yıllık yaklaşık 1,5 Mt H₂ ile 1,9 Mt H₂ arasında bir ihracat potansiyelinin elde edilebileceği de ortaya konulmuştur.⁶ Dolayısıyla, yenilenebilir hidrojen pazarında önemli bir rol üstlenme potansiyeli bulunan Türkiye’nin, hidrojen değer zincirini düşünerek oluşturacağı standartlar bu potansiyeli gerçekleştirmekte kilit bir noktadır. İlgili standartlar belirlenirken, uluslararası kabul görmüş çerçevelerin (örneğin AB pazarı standartlarının) incelenmesi ve bunları içerecek şekilde tanımlanması önerilmektedir. Böylelikle hidrojenin ihraç edilmesi durumunda, ilgili tüm ülke standartlarıyla uyumlu ve tutarlı olacaktır.

⁶ İlgili analiz Türkiye’nin 2053 net sıfır emisyon hedefini ilan etmesinin öncesinde yapılmıştır.

7.3 Stratejik konum

Petrol ve doğal gaz zengini ülkelerin çevresinde bulunması, Türkiye’nin boru hatları aracılığıyla Asya ve Avrupa arasında transit bölge olmasına yol açmaktadır. Son zamanlarda ortaya çıkan bölgesel ve küresel ölçekli sorunlara rağmen Türkiye, Avrupa’nın alternatif enerji tedariği arayışına destek olabilme potansiyeline sahiptir. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) Eylül 2025 tarihinde yayımladığı “Global Hydrogen Review 2025” raporunda küresel hidrojen talebinin 2024 yılında bir önceki yıla göre %2 artış göstererek 100 Mt’a ulaştığı belirtilmiştir (IEA, 2025). Net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda AB dahil birçok ülke, yenilenebilir hidrojen ithalatına yönelmeyi planlamaktadır. Türkiye ise coğrafi konumunun sağladığı avantajlar sayesinde, küresel talebin karşılanmasında önemli bir potansiyele sahiptir.

7.4 Ulaşım ve lojistik altyapısı

Türkiye’de bulunan limanlar, yenilenebilir hidrojenin denizyolu aracılığıyla taşınmasını sağlayabilir. Bu kapsamda hali hazırda petrol, doğal gaz ve LNG gibi kimyasal ürün taşımacılığı için kullanılan Aliğa (İzmir) ve Tekirdağ limanları örnek teşkil etmektedir. İlgili limanların, belirli yatırımlar ile beraber hidrojen ve türevlerinin taşınmasına uygun hale getirilebilir. Bu doğrultuda, özel tankların, soğutma sistemlerinin ve dolum boşaltım altyapılarının limanlara kurulumu gerekecektir.

7.5 Mevcut iş birlikleri

Halihazırda Türkiye’nin de yer aldığı yenilenebilir hidrojen iş birlikleri bulunmaktadır. Bu kapsamda, Türkiye ve Japonya’nın “Japonya-Türkiye Enerji Forumu” için imzaladıkları deklarasyon, yenilenebilir hidrojen de dahil olmak üzere birçok temiz enerji teknolojisini kapsayan stratejik bir iş birliği platformu oluşturmayı hedeflemektedir (Anadolu Ajansı, 2023). Avrupa Birliği (AB) hibe desteğiyle gerçekleştirilen ve Norveç ile iş birliği içinde yürütülen “HYSouthMarmara Projesi” de bir diğer örnektir (HYSouthMarmara, 2024). Proje kapsamında Norveç ile bilgi ve teknoloji paylaşımı yapılmaktadır. Ayrıca Türkiye merkezli ERIH Holdings ve İngiltere merkezli PASH Global ortaklığında, 10 GW yenilenebilir enerji ve 5 GW elektroliz kapasitesini hedefleyen çok uluslu bir hidrojen girişimi planlanmaktadır (TAIYANGNEWS, 2023). Bu iş birlikleri, Türkiye’nin hidrojen üretiminde bölgesel bir merkez olma hedefini güçlendirmekte ve sürdürülebilir olmaları durumunda yeni iş birliklerine olanak sağlamaktadır.

Sonuçlar ve Politika Önerileri

Raporda ele alınan piyasa oluşumu, finansman, altyapı, teknoloji ve standart başlıkları, yenilenebilir hidrojen ekosisteminin gelişimi önünde önemli yapısal zorluklar bulunduğunu göstermektedir. Yüksek yatırım maliyetleri, düzenleyici çerçevenin henüz yeterince netleşmemiş olması, karbon fiyatlama ve sertifikasyon altyapısındaki eksiklikler ile talep görünürlüğünün sınırlı olması, yatırımların gecikmesine yol açmaktadır.

Mevcut durumda yenilenebilir hidrojen, üretim maliyetlerinin yüksek olması ve teknolojik olgunluğun henüz istenen seviyeye gelmemiş olması nedeniyle, pahalı bir enerji taşıyıcısı ve hammadde olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle küresel ölçekte pek çok proje ertelenmekte veya iptal edilmektedir. IEA verilerine göre, 2024 yılı itibarıyla yenilenebilir hidrojen üretim tesislerine yönelik nihai yatırım kararı alınmış veya inşaatı başlamış projeler, küresel ölçekte öngörülen kapasitenin yalnızca %4'ünü temsil etmektedir (IEA, 2025). Buna karşılık, yenilenebilir hidrojene yönelik küresel talep 2024 yılında bir önceki yıla kıyasla %10 artış göstermiştir. 2025 yılının tamamlanması ile beraber ise toplam hidrojen üretiminin 1 milyon tona (Mt) ulaşması beklenmektedir (IEA, 2025). Bu eğilim, kısa vadede arz tarafında yaşanan zorluklara rağmen, orta ve uzun vadede yenilenebilir hidrojene yönelik talebin güçlenebileceğine işaret etmektedir.

Yenilenebilir hidrojenin kullanımının getireceği ekonomik faydalar, mevcut durumda ve gelecek dönemde uygulanacak enerji politikalarının etkinliği ile doğrudan ilişkili olacaktır. Bu çerçevede, yenilenebilir hidrojen politikalarının tasarımı iki temel ilke yol gösterici nitelik taşımaktadır. Birincisi, hidrojen üretiminin elektrik sektörünün karbonsuzlaşma hedefleriyle uyumlu bir şekilde planlanması; ikincisi ise hidrojenin, en yüksek emisyon azaltım katkısını sağlayabileceği son kullanım alanlarına odaklanmasıdır. Bu ilkeler, yenilenebilir hidrojenin enerji dönüşümüne ilave ve tamamlayıcı bir katkı sunmasını ve mevcut politika araçlarıyla tutarlı bir biçimde konumlandırılmasını sağlamaktadır. Bu doğrultuda, politikaların ve teşviklerin öncelikle karbonsuzlaşma zor sektörlerde kullanım odaklı kurgulanması, fosil yakıtlardan yenilenebilir hidrojene geçişi hızlandırmada belirleyici olacaktır.

Türkiye'nin karbonsuzlaşma yolunda hem iç talebi karşılayabilmesi hem de küresel piyasada anlamlı ve sürdürülebilir bir rol üstlenebilmesi için, ilk aşamada yenilenebilir hidrojen ekosisteminin oluşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda, yenilenebilir hidrojen değer zincirinde bulunan tüm süreçleri içeren bir düzenleyici çerçevenin ve piyasanın oluşturulması, standartların belirlenmesi, teknoloji gelişimi için halihazırda devam eden Ar-Ge yatırımlarının artırılması ve yenilenebilir hidrojeni yakıt veya hammadde olarak en verimli şekilde kullanacak öncelikli sektörlerin dönüşümüne yönelik çalışmaların yapılması önceliklendirilmelidir. Bu sektörlerin hidrojen kullanımını planlamalarına dâhil etmelerini kolaylaştıracak destek ve teşvik mekanizmaları, talebin oluşmasına ve üretimin ölçeklenmesine katkı sağlayacaktır. Böylelikle, talep tarafının güçlenmesiyle üretimin ölçeklenmesi mümkün olacak ve ölçek ekonomisi bağlamında hidrojenin üretim maliyetlerinin azalmasına katkı sağlanacaktır.

Türkiye'nin elektrik ve doğal gaz piyasalarında edindiği kurumsal ve teknik deneyim, EPIAŞ ve EPDK gibi kurumların sahip olduğu kapasite ile birlikte, yenilenebilir hidrojen için aşamalı ve kontrollü bir piyasa yapısının oluşturulmasına önemli bir zemin sunmaktadır. Bu kapsamda, EPIAŞ

tarafından işletilen “Organize Toptan Doğal Gaz piyasası”, benzer bir modelin uygun koşullarda düzenlenmesi ile yenilenebilir hidrojen için de uygulanabilir. EPDK ise piyasa düzenleyicisi olarak mevcut düzenleyici çerçevenin oluşturulması yolunda edindiği tecrübeler ile hidrojen ticareti, fiyatlandırması, arz-talep dengesinin oluşturulması ve şeffaf bir şekilde piyasada işlem görmesi için kurumsal yapı sağlayabilir. Bu kurumsal birikim, hidrojenin enerji sistemine ani ve dağınık girmesi yerine, daha öngörülebilir, ölçülebilir ve piyasa temelli bir biçimde entegre edilmesini sağlayacak önemli bir avantajdır.

Yenilenebilir hidrojen ekosisteminin gelişimi için, Avrupa’da örnekleri bulunan “Hidrojen Bankası” modelinin ulusal ölçekte hayata geçirilmesi stratejik bir adım olacaktır. Bu yapı, yenilenebilir hidrojen üreticileri ile talep tarafını buluşturan, fiyat desteği ve alım garantisi gibi mekanizmalarla piyasayı canlandıran bir finansal ve kurumsal çerçeve sunacaktır. Kurulacak “Hidrojen Bankası”, ulusal boyutta hem yatırımcı güvenini artırarak ölçekli üretim projelerinin önünü açacak, hem de ülkenin yeşil dönüşüm hedefleri doğrultusunda uluslararası rekabet gücünü pekiştirecektir. Yenilenebilir hidrojen üretiminin sürdürülebilir olması ve elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabetin önüne geçilmesi için yenilenebilir enerji kurulu gücünün yeni projeler oluşturularak artırılması da oldukça önemli olacaktır. Bu kapsamda, pilot proje olarak kurulması planlanan elektrolizör tesisleri ile paralel olarak, hidrojen üretimini destekleyecek ilave yenilenebilir enerji kapasite artışlarının yapılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji santrallerine yakın bölgelerde hidrojen üretim alanları ve altyapının planlı biçimde geliştirilmesiyle, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir üretim için gerekli altyapının planlı şekilde oluşması sağlanabilir. İlk elektrolizör tesislerinin yenilenebilir enerji santrallerine yakın bölgelerde konumlandırılması, üretim maliyetlerinin azaltılmasına ve enerji kullanımında verimliliğin artırılmasına imkân tanıyacaktır.

Türkiye’nin uluslararası hidrojen piyasasında rekabetçi bir ekonomiye sahip olabilmesi için yenilenebilir enerji potansiyelini azami düzeyde kullanması bir öncelik olmalıdır. Bu hedef, hidrojen ekosisteminin sürdürülebilirliğini ve orta vadede ülke ekonomisine sağlayacağı katkıyı artıracaktır. Ayrıca, iç talebin üzerinde oluşabilecek yenilenebilir hidrojen üretiminin ihracata yönlendirilmesi, Türkiye’nin küresel hidrojen piyasasında stratejik bir konum edinmesini mümkün kılacaktır. Bu doğrultuda, başta Avrupa Birliği (AB) olmak üzere uluslararası düzeyde kabul gören standartlarla uyumlu bir çerçevenin, yenilenebilir hidrojen üretiminde, taşınmasında ve buna ilişkin teknolojik altyapının geliştirilmesinde esas alınması gerekmektedir. Böylece, Türkiye ile AB arasındaki ticaret ilişkilerine yenilenebilir hidrojen de yeni ve katma değerli bir kalem olarak dahil edilebilecektir. Bu süreç, AB ile enerji alanındaki entegrasyonun derinleştirilmesi ve ortak proje/finansman modellerinin geliştirilmesi açısından da bir fırsat sunmaktadır.

Bütüncül bir perspektiften değerlendirildiğinde, yenilenebilir hidrojen Türkiye için sadece enerji arz güvenliğini artıracak bir alternatif olmanın ötesinde, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir fırsat sunmaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi zengin yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olan Türkiye, bu potansiyeli yenilenebilir hidrojen üretimiyle birleştirerek hem net sıfır bir ekonomiye geçiş sürecinde karbon emisyonlarını azaltma, hem de uluslararası pazarlarda rekabet avantajı elde etme imkanına sahiptir.

Ancak bu dönüşümün hayata geçirilebilmesi için 2023 yılında yayımlanan “Türkiye Hidrojen Stratejisi ve Yol Haritası” dokümanını tamamlayıcı nitelikte eylem planlarının oluşturulması, kamu-özel sektör iş birliklerinin güçlendirilmesi, Ar-Ge yatırımlarının sürekliliğinin sağlanması ve kapsamı bir düzenleyici çerçevenin tesis edilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, yenilenebilir hidrojen değer zincirine ilişkin güvenlik standartları ve sertifikasyon süreçlerinin netleştirilmesi ve Avrupa Yeşil Mutabakatı başta olmak üzere uluslararası girişimlerle uyumlu hale getirilmesi, Türkiye’nin potansiyel bir yenilenebilir hidrojen ihracatçısı olarak konumlanmasının da önünü açacaktır.

Raporun temel bulgularını da dikkate alarak Türkiye’de yenilenebilir hidrojen ekosisteminin oluşturulması sürecinde değerlendirilebilecek çeşitli politika önerileri aşağıda özetlenmektedir:

Türkiye’de yenilenebilir hidrojen gelişimi için öneriler

Yenilenebilir hidrojene ilişkin idari izin süreçlerini ve ilgili destek mekanizmalarını tanımlayacak, sektörler arası üretim ve gelişim planlarını koordine eden bir kamu biriminin oluşturulması önerilmektedir: Hidrojen odağında kurulacak bu kamu birimi aracılığıyla, birincil ve ikincil mevzuatın hazırlanması mümkün olacak, yatırımcılar için net ve öngörülebilir bir yol haritası oluşturulabilecektir. Bu çerçevede hidrojen üretim tesislerine yönelik alan seçimi ve teknik esaslar belirlenecek, aynı zamanda finansmana erişimi kolaylaştıracak destek ve teşvik mekanizmaları geliştirilebilecektir.

Söz konusu yapının Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) ya da Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) bünyesinde konumlandırılması değerlendirilebilir. Böylece, yenilenebilir hidrojene ilişkin mevzuatın, standartların ve sertifikasyon sistemlerinin bu alanda uzmanlaşmış tek bir otorite tarafından oluşturulması sağlanacaktır. Bununla birlikte, ilgili kamu birimi sektörde hem düzenleyici hem de stratejik açıdan merkezi bir rol üstlenecektir.

Yenilenebilir hidrojenin yasal tanımının oluşturulması önerilmektedir: Yenilenebilir hidrojen piyasasının sağlıklı, şeffaf ve öngörülebilir bir şekilde gelişebilmesi için, yenilenebilir hidrojenin yasal çerçevede açık ve bağlayıcı bir tanıma kavuşturulması gerekmektedir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynaklarını düzenleyen 5346 sayılı Kanun’da gerekli değişikliklerin yapılarak, yenilenebilir hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen bir enerji taşıyıcısı ve aynı zamanda bir hammadde olarak tanımlanması önerilmektedir.

Bu yasal tanım, yenilenebilir hidrojenin kapsamının, emisyon standartlarının ve sertifikasyon esaslarının netleşmesine katkı sağlayarak, yatırımcılar açısından hukuki belirsizlikleri azaltacak ve uzun vadeli yatırım kararlarını destekleyecektir. Ayrıca, söz konusu düzenleme yenilenebilir hidrojenin enerji, sanayi ve iklim politikalarıyla bütüncül bir çerçevede ele alınmasının önünü açacak ve ilerleyen aşamalarda geliştirilecek teşvik mekanizmaları ve piyasa düzenlemeleri için güçlü ve tutarlı bir hukuki zemin oluşturacaktır.

Yenilenebilir hidrojenin elektrik sektörünün dönüşümü ile rekabet etmemesi gerekmektedir:

Yenilenebilir hidrojen üretiminde, eklenebilirlik (additionality) ilkesinin esas alınarak bütüncül bir düzenleyici çerçevenin oluşturulması önerilmektedir. Bu kapsamda, hidrojen üretimi için mevcut yenilenebilir santralleri yerine, yeni ve hidrojen üretimine tahsisli yenilenebilir enerji yatırımlarının önceliklendirilmesi, elektrik sisteminin karbonsuzlaşması ve doğrudan elektrifikasyon hedefleriyle rekabeti önleyecektir. Buna ek olarak, yenilenebilir enerji kesintilerinin azaltılması amacıyla ihtiyaç fazlası elektrik üretiminin elektrolizörlere yönlendirilmesi, tamamlayıcı bir politika aracı olarak değerlendirilmelidir.

Yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin (yeşil amonyak, sentetik kerosen vb.) kullanımında, ilk aşamada en yüksek katma değer sağlanabileceği ve doğrudan elektrifikasyonun karbondan arındırmada tek başına yetersiz kaldığı sektörler öncelik verilmesi gerekmektedir:

Bu yaklaşım, sınırlı kaynakların etkin kullanımını sağlayarak yenilenebilir hidrojenin iklim ve sanayi politikaları açısından en yüksek faydayı üretmesine imkan tanıyacaktır. Bu kapsamda, SHURA (2025) analiz sonuçlarının da gösterdiği üzere; Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin öncelikli kullanım alanlarının amonyak (gübre) üretimi, demir-çelik sektörü, kimya sanayi (rafineriler ve petrokimya dahil), cam-seramik sanayi ile uzun mesafe taşımacılığı (havacılık ve denizcilik başta olmak üzere) olarak belirlenmesi önerilmektedir. Söz konusu sektörlerde yenilenebilir hidrojenin devreye alınması, emisyon azaltım potansiyelinin yüksek olduğu alanlarda hızlı ve etkili sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bu doğrultuda yapılacak bir önceliklendirme, yenilenebilir hidrojenin ölçeklenmesini destekleyerek, maliyetlerin düşürülmesine, teknolojik öğrenme süreçlerinin hızlanmasına ve orta vadede daha geniş sektörler yayılımının önünü açacaktır.

Türkiye’de yenilenebilir hidrojene yönelik düzenleyici çerçevenin oluşturulması önerilmektedir:

Türkiye’de yenilenebilir hidrojene yönelik kapsamlı bir düzenleyici çerçevenin oluşturulması önerilmektedir. Bu çerçevenin, hidrojen değer zincirinin üretim, depolama, dağıtım ve tüketim aşamalarını kapsayacak şekilde tasarlanması ilgili hukuki ve teknik belirsizliklerin ortadan kaldırılmasını sağlayarak, yenilenebilir hidrojen yatırımları için öngörülebilir ve uygun bir ortam yaratacaktır. Ayrıca, güvenlik, emisyon ve kalite standartlarının açık ve uyumlu biçimde belirlenmesi, yenilenebilir hidrojenin hem iç piyasada güvenli ve verimli bir şekilde gelişmesini destekleyecek hem de uluslararası standartlarla uyum sayesinde olası sınır ötesi ticaretin önünü açacaktır. Bu kapsamda oluşturulacak düzenleyici çerçeve, yenilenebilir hidrojenin Türkiye enerji sistemine entegrasyonunu güçlendirecek ve Türkiye’nin küresel hidrojen piyasasında etkin bir rol üstlenmesine katkı sağlayacaktır.

Yerli arzı teşvik etmek için yenilenebilir hidrojen üretimine mali teşviklerin sağlanması önerilmektedir:

Yerli arzın geliştirilmesi ve yenilenebilir hidrojen üretiminin hızlandırılması amacıyla, yenilenebilir hidrojen üretimine yönelik mali teşvik mekanizmalarının hayata geçirilmesi önerilmektedir. Vergi muafiyetleri ve sınırlı hacimli Feed-in-Tariff (FIT) uygulamaları, erken dönemde yüksek maliyetlerin dengelenmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca, rafineriler ve demir-çelik sektörü başta olmak üzere öncelikli tüketicilere yönelik YEKA benzeri rekabetçi hidrojen ihaleleri tasarlanabilir. Bu teşvik araçları, yatırım risklerini azaltarak özel sektör katılımını artıracak ve Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen piyasasında yer edinmesini destekleyecektir.

Yenilenebilir hidrojen değer zincirine yönelik yapılacak yatırımların eş zamanlı yapılması, projelerin ilerlemesini sağlayarak projenin gerçekleşme olasılığını artıracaktır: Yenilenebilir hidrojen değer zincirine yönelik yatırımların eş zamanlı ve koordineli biçimde hayata geçirilmesi önerilmektedir. Üretim, taşıma, depolama ve tüketim aşamalarına yönelik yatırımların birlikte planlanması, darboğazların önüne geçerek projelerin bütüncül ve sağlıklı ilerlemesini sağlayacaktır. Bu yaklaşım, yatırımcı güvenini artırırken teknik entegrasyonun erken aşamada doğrulanmasına imkan tanıyacak ve yenilenebilir hidrojen projelerinin ölçeklenmesini destekleyecektir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yakın alanlarda hidrojen merkezlerinin (HUB) oluşturulması, kurulacak hidrojen ekosistemine itici bir güç sağlayabilir: Bu merkezler, hidrojen değer zincirinin üretimden tüketime kadar bütüncül bir şekilde planlanmasına imkan tanıırken, akademi-sanayi iş birliğini destekleyen kümelenmiş Ar-Ge projeleri aracılığıyla teknolojik gelişimi de teşvik edecektir.

Kritik altyapı ihtiyaçlarını karşılayacak hidrojen özel üretim bölgelerinin ilan edilmesi önerilmektedir: Kritik altyapı ihtiyaçlarını karşılamak üzere Hidrojen Özel Üretim Bölgelerinin (YEKA benzeri) ilan edilmesi önerilmektedir. Bu bölgeler sayesinde, yenilenebilir hidrojenin güvenilir, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir biçimde üretilmesi için gerekli altyapı planlı bir şekilde geliştirilerek, yenilenebilir enerji kaynaklarına yakın konumlandırma yoluyla üretim maliyetlerinin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması mümkün olacaktır.

Hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve kullanımı açısından havalimanı ve liman altyapılarının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi önemli olacaktır: Hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve kullanımını desteklemek amacıyla, havalimanı ve liman altyapılarının yenilenebilir hidrojen ekosistemine uygun şekilde iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, gerekli inşaat ve altyapı yatırımlarının hızla hayata geçirilmesini sağlamak üzere doğrudan finansal desteklerin yanı sıra, altyapı yatırımlarına yönelik vergi indirimleri ve sübvansiyon mekanizmalarının uygulanması önerilmektedir.

Sanayide kullanılacak yenilenebilir hidrojene ilişkin teknik ve güvenlik standartlarının yasal bir çerçeve kapsamında düzenlenmesi önerilmektedir: Yenilenebilir hidrojenin güvenilir bir şekilde kullanımı için hidrojenin üretim, depolama, taşıma ve tüketim süreçlerinde sorumlulukların belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle, hidrojenin ihraç edilmesi durumunda ilgili tüm ülkelerde aynı standartların uygulanması da sağlanmış olacaktır. Bu durum, Türkiye'nin gelecekte yenilenebilir hidrojen ihraç etmesinin de önünü açacaktır.

Yerli Ar-Ge'nin güçlendirilmesi, üniversite-sanayi iş birliklerinin artırılması önerilmektedir: Ülkemizde örnekleri bulunan ortak Ar-Ge projeleri üniversiteleri daha fazla dahil ederek artmalı ve kamu tarafından uygulanan teşvik mekanizmaları geliştirilmelidir. Pilot ölçekten ticari ölçeğe geçişin güçlendirilmesi yolunda üniversitelerin daha etkin rol alması, gelecekte yüksek teknoloji ürün üretiminde ihtiyaç duyulacak doğal yollarla kalifiye insan gücünü de yetiştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu kapsamda, üniversiteler özelinde Ar-Ge çalışmaları için yasal ve finansal düzenlemeler de oluşturulabilir. Böylelikle, yüksek teknoloji ürün geliştirme yetkinliği artacak, teknolojide dışa bağımlılık azalacaktır.

Hidrojen üretimi konusunda nitelikli insan kaynağı yetiştirilmeli ve istihdamda süreklilik oluşturulması gerekmektedir: Türkiye’de hayata geçirilecek yenilenebilir hidrojen projelerinin inşaat ve akabinde hidrojen değer zincirinin her adımında aktif rol alacak insan gücü oluşacaktır. Bu doğrultuda, üniversitelerde mevcut durumda ilgili mühendislik programlarında yenilenebilir hidrojen teknolojisine yönelik dersler artırılmalı, lisansüstü programlarına ağırlık verilmelidir. Üniversiteler dışında fonlar ile oluşturulacak ve hidrojen değer zincirinin her bir aşamasında gereken bilgi birikimini aktaracak bir hidrojen akademisi yaklaşımı da değerlendirilmelidir. Ek olarak, özel sektör ve akademi alanları arasında teknoloji ve bilgi transferini destekleyen güçlü iş birliklerinin kurulması gerekmektedir.

Hidrojen üretimi sürecinde kullanılan teknolojilerin yerli üretimi için ulusal ve uluslararası standartların oluşturulması gerekmektedir: Böylelikle, bu teknolojilerin teknik standartlarının belirlenmesi yerli Ar-Ge çalışmalarını hızlandıracak ve ürünlerin ticarileştirilmesini kolaylaştıracaktır. Yerli üretim sürecine yönelik güvenlik, kalite ve çevresel uygunluk standartları belirlenerek, yatırımcıların güvenli yatırım yapması da sağlanacaktır. Türkiye’nin teknolojinin yerli üretimi potansiyelini ortaya koyarak küresel pazarda rekabet edebilmesi için, teknoloji odaklı ve uluslararası kurallar ile uyumlu bir regülasyon altyapısı oluşturması gerekecektir.

Türkiye’nin yenilenebilir hidrojen üretim stratejisinde enerji boyutu ile su kaynaklarının sürdürülebilirliği birlikte ele alınmalıdır: Bu kapsamda, hidrojen üretim tesislerinin yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek ve sürdürülebilir su kaynaklarına erişimi olan bölgelerde konumlandırılması ve atık suyun artırılarak yeniden kullanımı yoluyla doğal su kaynakları üzerindeki baskının azaltılması önerilmektedir. Ayrıca, hidrojen üretiminde su tüketiminin planlı bir şekilde yönetilebilmesi için Tarım ve Orman Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın koordinasyonunda bir mekanizma oluşturulması değerlendirilebilir. Bu çerçevede, ulusal su yönetimi çalışmalarının yenilenebilir hidrojen planlamalarını da kapsayacak şekilde genişletilmesi önem taşımaktadır.

Yenilenebilir hidrojen üretim fazlası için ihracat stratejisinin oluşturulması önerilmektedir: Türkiye’nin uluslararası yenilenebilir hidrojen pazarında önemli bir rol oynayabilmesi için, ihraç etmeyi planladığı hidrojen miktar ve fiyatının belirleneceği bir pazar ortamının oluşturulması önemli olacaktır. Bununla birlikte, hidrojen üretim maliyetlerini de dikkate alarak fiyatlandırmaların bu doğrultuda yapılmasını sağlayacak bütüncül stratejilere ihtiyaç bulunmaktadır.

Yenilenebilir hidrojene yönelik talebin oluşturulmasının hızlanması amacıyla sektörel ölçekte düzenlemelerin yapılması gerekmektedir: Yenilenebilir hidrojeni hammadde veya yakıt olarak kullanacak öncelikli sektörlerin belirlenerek talebi teşvik etmeye yönelik politika mekanizmalarının hızlandırılması, alım garantilerini kolaylaştırma ve arz tarafına güvenli yatırım yapma yönünde destek sağlayabilir. Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması’nın (SKDM) de devreye gireceği göz önünde bulundurulduğu senaryoda, mekanizmadan etkilenecek sektörlerin yenilenebilir hidrojeni benimsemesi de hızlanacaktır.

Referanslar

- Agora Energiewende, 2021. Making renewable hydrogen cost-competitive.
https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf
- Anadolu Ajansı, 2023. Türkiye-Japonya iş birliğinde “yenilenebilir enerji ve hidrojen” öne çıkıyor. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiye-japonya-isbirliginde-yenilenebilir-enerji-ve-hidrojen-one-cikiyor/2999651>
- Avrupa Parlamentosu, 2023. EU rules for renewable hydrogen.
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI\(2023\)747085_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI(2023)747085_EN.pdf)
- Avrupa Parlamentosu, t.y. Renewable hydrogen
https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen/renewable-hydrogen_en
- CertifHy, t.y. About. <https://www.certifyhy.eu/>
- Clean Hydrogen Partnership, 2020. CertifHy.
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/get-involved/hydrogen-certification_en
- COP28, 2023. COP28 DECLARATION OF INTENT.
<https://www.cop28.com/en/cop28-uae-declaration-on-hydrogen-and-derivatives>
- Çelik İhracatçıları Birliği, 2025. İSTATİSTİKLER. <https://www.cib.org.tr/tr/istatistikler>
- DIN, 2025. Standardization roadmap for hydrogen technologies.
<https://www.din.de/en/innovation-and-research/hydrogen/standardization-roadmap-for-hydrogen-technologies/publication>
- Dinçer, İ., Ezan, M., 2020. TÜBA-ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ RAPORU.
<https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>
- Ehb, 2022. European Hydrogen Backbone.
<https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>
- Emissions-EUETS, 2025. Hydrogen guarantees of origin (H-GOs).
<https://www.emissions-euets.com/rfnbo-temporal-correlation?view=article&id=2377:hydrogen-guarantee-of-origin&catid=1935#:~:text=As%20underlined%20in%20the%20ENTSO,electricity%20to%20include%20renewable%20hydrogen.>
- EPDK, 2021. 2021 Yılı Elektrik Piyasası Aralık Ayı Sektör Raporu.
<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23-3/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- EPDK, 2025. 2025 Yılı Elektrik Piyasası Eylül Ayı Sektör Raporu.
<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23-3/elektrikaylik-sektor-raporlar>
- ETKB, 2023. EİGM Raporları. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- ETKB, 2023. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası.
https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf

- ETKB, 2024. Yenilenebilir Enerjide 2035 Yol Haritası Lansman Sunumu.
https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/Yenilenebilir%20Enerjide%202035%20Yol%20Haritas%C4%B1%20Lansman%20Sunumu_202410221014.pdf
- European Hydrogen Observatory, 2025. Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package.
<https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/eu-policy/hydrogen-and-decarbonised-gas-market-package>
- EVS, t.y. ISO/TS 19870:2023 <https://www.evs.ee/en/iso-ts-19870-2023>
- Filament Technology, t.y. Our Story. <https://www.filamenttechnology.com/about>
- Filament Technology, t.y. Type-4 Hydrogen Storage Tanks.
<https://www.filamenttechnology.com/products/hydrogen-storage-tanks>
- H₂earth for Europe, 2024. The role of underground hydrogen storage in Europe.
https://h2earth.eu/wp-content/uploads/2024/01/H2earth-for-Europe_Report_Role-of-UHS-inEurope.pdf
- H₂Türk, t.y. Hidrojen Tankı. <https://www.h2turk.com.tr/tr/kategori/hidrojen-tanki/890>
- Hafsi, Z., Mishra, M., Elaoud, S., 2018. Hydrogen embrittlement of steel pipelines during transients.
https://www.researchgate.net/publication/330028247_Hydrogen_embrittlement_of_steel_pipelines_during_transients
- Hydrogen Newsletter, 2025. Powering the Future: Latest Breakthroughs in PEM Electrolyzers for Green Hydrogen in 2025.
<https://www.hydrogennewsletter.com/powering-the-future-latest-breakthroughs-in-pem-electrolyzers-for-green-hydrogen-in-2025/amp/>
- HYSouthMarmara, t.y. Hakkımızda. <https://hysouthmarmara.org/hakkimizda>
- HYSouthMarmara, 2024. NORVEÇ-TÜRKİYE ORTAKLIĞI. <https://hysouthmarmara.org/yazi/3>
- IEA, 2024. Hydrogen production.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>
- IEA, 2025. Global Hydrogen Review 2025.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>
- Iglauer, S., Ali, M., Keshavarz, A., 2020. Geophysical Research letters.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL090814>
- IPEC, t.y. Hidrojen Depolama ve Dağıtım Sistemleri.
<https://ipec.com.tr/tr/hydrogen-storage-and-distribution-systems/>
- ISO, 2023. ISO at COP28: Accelerating climate action. <https://www.iso.org/events/cop28.html>
- ISO, 2023. ISO/TS 19870:2023. <https://www.iso.org/standard/65628.html>
- ISO, 2025. ISO 14687:2025. <https://www.iso.org/standard/82660.html>
- ISO, t.y. ISO 19880-8:2024. <https://www.iso.org/standard/83949.html>

ISO, t.y. ISO/DIS 13984. <https://www.iso.org/standard/86295.html>

Kamps, A., Citters, C., Schut, C., 2021. Hydrogen for the ceramic industry. <https://www.gasunie.nl/nieuws/publicatie-rapport-h2-voor-de-keramische-industrie>

Miocic, J., Heinemann, N., Edlmann, K., Scafidi, J., Molaei, F., Alcalde, J. 2023. Underground hydrogen storage: a review. <https://chooser.crossref.org/?doi=10.1144%2FSP528-2022-88>

Oyan, E., Boie, I., Dütschke, E., Kantel, A., Müller, V., Scherrer, A., Aboushady, N., Altenburg, T., Stamm, A., Strohmaier, R., 2024. Towards a Green H2 Economy: Türkiye Country Report. https://hypat.de/hypat-wAssets/docs/new/publications/hypat_country-report_turkey.pdf

Perera, 2023. A review of underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: Insights into various rock-fluid interaction mechanisms and their impact on the process integrity. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122035013?via%3DIhub>

Petrotürk, n.d. Doğal gaz sektöründe hidrojene geçiş için 4 aşamalı yol haritası. <https://www.petroturk.com/dogalgaz-haberleri/dogal-gaz-sektorunde-hidrojene-gecis-icin-4-asamali-yol-haritasi>

RaillyNews, 2023. Financial Support for Hydrogen Initiatives Is Increasing. <https://en.rayhaber.com/2023/10/hidrojen-girisimlerine-finansman-destegi-artiyor/>

SHURA, 2021. Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi. <https://shura.org.tr/turkiyenin-yesil-hidrojen-uretim-ve-ihracat-potansiyelinin-teknik-ve-ekonomik-acidan-degerlendirilmesi/>

SHURA, 2022. Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi. <https://shura.org.tr/turkiyenin-yesil-hidrojen-uretim-ve-ihracat-potansiyelinin-teknik-ve-ekonomik-acidan-degerlendirilmesi/>

SHURA, 2023. Türkiye'de Konut ve Sanayi Sektörünün Elektrifikasyonu. <https://shura.org.tr/turkiyede-konut-ve-sanayi-sektorunun-elektrifikasyonu-raporu/>

SHURA, 2023. Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası. <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

SİS, t.y. Hydrogen technologies – Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the production, conditioning and transport of hydrogen to consumption gate (ISO/TS 19870:2023). <https://www.sis.se/en/produkter/energy-and-heat-transfer-engineering/hydrogen-technologies/sis-isots-198702024/>

Standards New Zealand, 2024. Hydrogen as our fuel of the future takes a step closer with 13 newly published standards. <https://www.standards.govt.nz/news-and-updates/hydrogen-as-our-fuel-of-the-future-takes-a-step-closer-with-13-newly-published-standards>

ŞAN, S., KARAKILÇIK, M., 2021. TUZ DOMLARINDA HİDROJEN DEPOLAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ.

<https://fbe.cu.edu.tr/storage/makaleler/2021/TUZ%20DOMLARINDA%20H%C4%B0DROJEN.pdf>

TAIYANGNEWS, 2023. Cross Continent Green Hydrogen Joint Venture.

<https://taiyangnews.info/business/cross-continent-green-hydrogen-joint-venture>

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2024. 2025 YILI CUMHURBAŞKANLIĞI YILLIK PROGRAMI.

<https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2024/11/2025-Yili-Cumhurbaskanligi-Yillik-Programi-05112024.pdf>

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012. Türkiye'de Karbon Piyasası.

https://evcedruzgar.enerji.gov.tr/iklim_deg/document/karbon_piyasasi.pdf

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024. Türkiye Karbon Piyasası Geliştirme Projesi Açılışı T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanı Mehmet Özhasseki tarafından gerçekleştirildi.

<https://iklim.gov.tr/turkiye-karbon-piyasasi-gelistirme-projesi-acilisi-t.c.-cevre-sehircilik-ve-iklim-degisikligi-bakani-mehmet-ozhaseki-tarafindan-gerceklestirildi-haber-4258>

T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı, 2023. ReFuelEU Havacılık Girişimi: AB Konseyi, Havacılık Sektörünün Karbonsuzlaştırılmasına Yönelik Yeni Tüzüğü Kabul Etti.

<https://www.ab.gov.tr/53623.html>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası.

https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024. 2023 Yılı Ulusal Enerji Denge Tabloları.

<https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=30488>

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024. Yenilenebilir Enerjide 2035 Yol Haritası.

https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/Yenilenebilir%20Enerjide%202035%20Yol%20Haritas%C4%B1%20Lansman%20Sunumu_202410221014.pdf

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024. Türkiye Sektörel Düşük Karbonlu Yol Haritaları.

<https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/sektorel-dusuk-karbonlu-yol-haritalari-sunum.pdf>

T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2025. Orta Vadeli Program (2026-2028).

<https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2025/09/Orta-Vadeli-Program-2026-2028.pdf>

T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024. Sanayi ve Hizmetler.

<https://ticaret.gov.tr/ihracat/sektorler/Sanayi%20ve%20Hizmetler>

Temiz Enerji, 2024. Türkiye, yeşil hidrojen üretimi için ilk yerli elektrolizörünü geliştirdi.

<https://temizenerji.org/2024/12/20/turkiye-yesil-hidrojen-uretimi-icin-ilk-yerli-elektrolizorunu-gelistirdi/>

TEKSİS, t.y. Hidrojen Depolama Çözümleri.

<https://www.tek-sis.com/tr/sayfa/164/hidrojen-depolama-cozumleri>

TÜBİTAK, 2023. Clean Hydrogen Partnership (Temiz Hidrojen Ortaklığı) 2022 Yılı Çağrısı Kapsamında HYSouthMarmara Projesi Avrupa Komisyonu Tarafından Desteklenmeye Hak Kazandı!.

<https://ufukavrupa.org.tr/tr/haberler/clean-hydrogen-partnership-temiz-hidrojen-ortakligi-2022-yili-cagrisi-kapsaminda>

TÜBİTAK, 2023. Türkiye'nin İlk Hidrojen Vadisi ve Türkiye'nin En Büyük Kapasiteli İlk Yerli Yeşil Hidrojen Tesisi Kuruluyor.

<https://tubitak.gov.tr/tr/haber/turkiyenin-ilk-hidrojen-vadisi-ve-turkiyenin-en-buyuk-kapasiteli-ilk-yerli-yesil-hidrojen-tesisi-kuruluyor>

TÜBİTAK, 2023. YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI ÇİMENTO SEKTÖRÜ.

https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/2024-04/Yesil_TYH_Cimento_29042024.pdf

TÜBİTAK, 2023. YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI KİMYASALLAR SEKTÖRÜ.

https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/2023-12/yesil_tyh_kimyasallar_raporu_16082023.pdf

TÜİK, 2025. Dış Ticaret İstatistikleri, Aralık 2024.

<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=D%C4%B1%C5%9F-Ticaret-%C4%B0statistikleri-Aral%C4%B1k-2024-53538&dil=1>

Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2025. Çelik Haritası. <https://celik.org.tr/harita/>

Uniper, 2022. EverWind Secures Offtake from Key German Partner Uniper for Canada's First Green Hydrogen Hub in Nova Scotia.

<https://www.uniper.energy/news/everwind-secures-offtake-from-key-german-partner-uniper-for-canadas-first-green-hydrogen-hub-in-nova-scotia>

Yeşilhaber, 2025. H2DER Başkanı Günay: Yeşil hidrojen üretim sanayi bölgeleri ilan edilmeli.

<https://yesilhaber.net/yesil-hidrojen-uretim-sanayi-bolgeleri/>

Yeşilhat, 2023. Türkiye'nin ilk hidrojen köyü "HyVillage" yolda.

<https://www.aa.com.tr/tr/yesilhat/teknoloji/turkiyenin-ilk-hidrojen-koyu-hyvillage-yolda/1819613>

Ekler

Ek A

ISO tarafından hidrojen değer zincirinde bulunan adımlara yönelik belirlenen standartlar Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo1. Hidrojen değer zinciri kapsamında belirlenen ISO standartları

Standart	Kapsam	Tanım
ISO 22734	Üretim süreci	Suda hidrojen üretmek için elektrokimyasal reaksiyonlarla suyu elektrolize eden modüler veya fabrika eşleşmeli hidrojen gazı üretim cihazlarının (hidrojen jeneratörleri) yapım, güvenlik ve performans gerekliliklerini tanımlar.
ISO 22734-1:2025	Üretim süreci	Suyu elektroliz ederek hidrojen üretmek için elektrokimyasal reaksiyonları kullanan hidrojen gazı üretim cihazlarının veya sistemlerinin güvenlik gereksinimlerini belirtir.
ISO/TR 15916:2015	Üretim ve depolama süreci	Hidrojenin gaz ve sıvı hâllerinde kullanımına ve depolanmasına ilişkin yönergeler sağlar. Temel güvenlik endişelerini, tehlikeleri ve riskleri belirler ve hidrojenin güvenlikle ilgili özelliklerini açıklar. Belirli hidrojen uygulamalarıyla ilişkili ayrıntılı güvenlik gereklilikleri ise ayrı uluslararası standartlarda ele alınmaktadır.
ISO 13985:2006	Depolama süreci	kara taşıtlarında kullanılan sıvı hidrojen için doldurulabilir yakıt tanklarının yapım gerekliliklerini ve yangın ve patlamadan kaynaklanan can ve mal kaybına karşı makul bir koruma düzeyi sağlandığını garanti etmek için gerekli test yöntemlerini belirler.
ISO 19880-1:2020	Dağıtım süreci	Hafif hizmetli kara taşıtlarına (ör. yakıt hücreli elektrikli araçlar) gaz hâlindeki hidrojen sağlayan kamu ve özel dolum istasyonlarının güvenliği ve gerektiğinde performansı için asgari tasarım, kurulum, devreye alma, işletme, denetim ve bakım gerekliliklerini tanımlar.
ISO 19880-2:2025	Dağıtım süreci	Sıkıştırılmış hidrojenin bir hidrojen araca aktarılmasını sağlayan bileşenler ve sistemler için güvenlik gerekliliklerini ve test yöntemlerini belirler.
ISO 17268-1:2025	Dağıtım süreci	Gaz hâlindeki hidrojen kara taşıtları için yakıt ikmali konektörlerinin tasarım, güvenlik ve işletme özelliklerini belirler.
ISO 14687:2025	Son tüketim süreci	Konut, ticari, endüstriyel, araç ve sabit kullanım gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmış hidrojen yakıtının asgari kalite özelliklerini belirler. Hidrojen yakıtının gerekli güvenlik ve performans standartlarını karşılamasını sağlamak için gereklilikleri ortaya koyar. Özellikle hidrojenin, sera gazı emisyonlarını azaltma amacıyla enerji sistemlerindeki artan rolü bağlamında önemlidir.
ISO 21087:2019	Son tüketim süreci	Proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücreleri kullanan kara taşıtları için hidrojen dağıtım merkezlerinde ve hidrojen dolum istasyonlarında gaz hâlindeki hidrojenin kalitesini sağlamak amacıyla kullanılan analitik yöntemlerin doğrulama protokolünü belirler. Ayrıca, miktar fraksiyonu için belirsizlik bütçesinin hesaplanmasına ilişkin öneriler sunar.
ISO 23273:2013	Son tüketim süreci	Yakıt hücreli araçlar için hem araç içindeki hem de dışındaki kişilerin ve çevrenin hidrojenle ilişkili tehlikelere karşı korunmasına yönelik temel gereklilikleri belirler.

Kaynak: ISO

İstanbul Politikalar Merkezi

İstanbul Politikalar Merkezi (İPM) demokratikleşmeden iklim değişikliğine, transatlantik ilişkilerden çatışma analizi ve çözümüne kadar, önemli siyasal ve sosyal konularda uzmanlığa sahip, çalışmalarını küresel düzeyde sürdüren bir politika araştırma kuruluşudur. İPM araştırma çalışmalarını üç ana başlık altında yürütmektedir: İPM-Sabancı Üniversitesi-Stiftung Mercator Girişimi, Demokratikleşme ve Kurumsal Reform, Çatışma Çözümü ve Arabuluculuk. 2001 yılından bu yana İPM, karar alıcılara, kanaat önderlerine ve paydaşlara uzmanlık alanına giren konularda tarafsız analiz ve yenilikçi politika önerilerinde bulunmaktadır.

European Climate Foundation

European Climate Foundation (ECF) Avrupa'nın düşük karbonlu bir toplum haline gelmesine yardımcı olabilmek ve iklim değişikliğiyle mücadelede uluslararası alanda güçlü bir lider rolü oynayabilmek amacıyla kurulmuştur. ECF, her türlü ideolojiden uzak kalarak düşük karbonlu bir topluma geçişin "nasıl" olacağı konusunu odağına alır. Ortaklarıyla yaptığı iş birliği kapsamında ECF, bu geçişte kilit rol oynayacak patikaları ve farklı alternatiflerin sonuçlarını ortaya çıkararak bu tartışmalara katkı sağlamayı hedefler.

Agora Energiewende

Agora Energiewende; Özellikle Almanya ve Avrupa olmak üzere tüm dünyada temiz enerjiye başarılı bir geçiş yapılmasını sağlamak amacıyla veri odaklı, politik açıdan uygulanabilir stratejiler geliştirir. Bir düşünce kuruluşu ve politika laboratuvarı olan Agora; yapıcı bir fikir alışverişi sağlarken siyaset, iş ve akademi dünyasından paydaşlarla da bilgi birikimini paylaşmayı hedefler. Kâr amacı gütmeyen ve bağışlarla finanse edilen Agora, kendini kurumsal ve siyasi çıkarlara değil, iklim değişikliğiyle mücadeleye adanmıştır.



SHURA
ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ MERKEZİ

Bankalar Caddesi, No:2, Minerva Han,
Kat:3, 34420 Karaköy/İstanbul
T: 0 (212) 292 49 39
E-posta: info@shura.org.tr
www.shura.org.tr

SHURA Kurucu Ortakları

İPM | IPC İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ KAMPUSU
İSTANBUL POLICY CENTER
AT SAKAKCI ÜNİVERSİTESİ

