



Enerji
Politikaları
Araştırma
Merkezi



Türkiye'nin Ulusal Hidrojen
Stratejisi için Öncelik Alanları

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Hakkında

European Climate Foundation (ECF), Agora Energiewende ve Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi (IPM) tarafından kurulan SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, yenilikçi bir enerji dönüşüm platformu olarak enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda Türkiye'deki enerji sektörünün politik, teknolojik ve ekonomik yönleri üzerine yapılan tartışmalarda sürdürülebilir ve kabul görmüş bir ortak zemine olan ihtiyacı karşılamayı hedeflemektedir. SHURA gerçeklere dayalı analizler ve en güncel veriler ışığında, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji üzerinden düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişi desteklemeyi odağına almaktadır. Farklı paydaşların bakış açılarını göz önünde bulundurarak bu geçişin ekonomik potansiyeli, teknik fizibilitesi ve ilgili politika araçlarına yönelik bir anlayışın oluşturulmasına yardımcı olmaktadır.

Yazarlar

Değer Saygın (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi), Emre Gencer (MIT Energy Initiative) ve Barış Sanlı (Bilkent Enerji Politikaları Araştırma Merkezi)

Teşekkürler

Arkin Akbay (TURCAS), Emanuele Taibi (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı) ve Matthias Deutsch (Agora Energiewende) raporu inceleyerek değerli geri bildirimde bulunmuşlardır. Sağlanmış olan tüm değerli inceleme, geri bildirim ve görüşler için teşekkür ederiz. Bu raporun taslak sonuçları 15 Ocak 2020'de Hidrojen Arama Konferansı, 5 Haziran 2020'de IRENEC 2020 ve 25 Ağustos 2020'de Ulusal Hidrojen Çalıştayını kapsamında sektör paydaşlarına sunulmuştur.

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 shura@shura.org.tr adresinden SHURA ekibiyle temasa geçiniz.

Tasarım

Tasarımhane Tanıtım Ltd. Şti.

Telif Hakkı © 2021 Sabancı Üniversitesi

ISBN 978-625-7329-07-1

Sorumluluk Reddi

Bu rapor ve içeriği, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş kabuller, senaryolar ve 2019 yılı 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.

Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları





H₂

HYDROGEN
ENERGY STORAGE

H₂ HYDROGEN

CAUTION
HYDROGEN

Şekil Listesi	4
Tablo Listesi	4
Kısaltmalar Listesi	4
Önemli bulgular	7
1. Hidrojen arzı ve kullanımında küresel eğilimler	9
1.1. Enerji sisteminin karbonsuzlaşması	9
1.2. Hidrojenin karbonsuzlaşmadaki rolü	10
1.3. Dünyanın farklı yerlerinde büyüyen hidrojen ile ilgili girişimler	16
2. Türkiye’de hidrojenle ilgili fırsatlar	21
2.1. İmalat sanayi	21
2.2. Ulaştırma	23
2.3. Binalar	23
2.4. Karbonsuzlaşması zor olan sektörler	26
2.5. Yeşil hidrojen için fırsatlar	29
Üretim sanayi için proses ısısı	29
Ulaştırma	31
Binalar	32
Doğal gaz şebekelerine hidrojen eklenmesi	33
3. Türkiye’de yenilenebilir hidrojen potansiyeli: sektörler ve uygulamalar	35
3.1. Türkiye’nin yeşil hidrojen talep potansiyeli	35
3.2. Yeşil hidrojenin sistem entegrasyon etkileri	38
4. Hidrojen dönüşümünün sağlanması için gerekli olan altyapı	41
5. Türkiye’de Hidrojen Girişimciliğinin Getirdiği Fırsatlar	45
Araştırma ve Geliştirme	45
Teknolojide yenilikçilik	45
Güvenlik önlemleri	46
Ticarileştirme	46
Cihaz geliştirme	47
Ulaşırmada niş uygulamalar	47
İş modelleri	47
Büyük ölçekli uygulamaya geçiş	47
6. Türkiye için bir ulusal hidrojen stratejisi geliştirilmesinde öncelikli alanlar	49
Kaynaklar	51

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: Emisyon azaltımlarının büyük kısmı: yenilenebilir enerji kaynakları ve verimlilik	9
Şekil 2: Hidrojen üretim yolları	10
Şekil 3: Elektroliz tabanlı hidrojen projeleri	11
Şekil 4: Dünyada hidrojenin mevcut üretim yolları ve uygulama alanları	12
Şekil 5: Seviyelendirilmiş hidrojen üretimi maliyeti (ABD\$/kg H ₂ cinsinden)	15
Şekil 6: Elektrolizör kapasite faktörlerinin (x eksen) hidrojen üretim maliyetleri (y eksen) üzerindeki etkisi	16
Şekil 7: Haziran 2018 ve Kasım 2020 döneminde ülkelerin ilan ettikleri hidrojen girişimlerinin özeti	17
Şekil 8: Türkiye'deki hidrojen araştırmalarına genel bakış (31 Ekim 2019 itibarıyla)	18
Şekil 9: Türkiye'nin toplam nihai tüketiminin dağılımı, 2018	21
Şekil 10: Türkiye'nin imalat sanayi nihai enerji tüketiminin ve enerji dışı kullanımının sektörlere göre dağılımı, 2018	22
Şekil 11: Türkiye'deki yapıların toplam nihai enerji tüketiminin dağılımı, 2018	25
Şekil 12: Hidrojen lojistik ve dağıtım seçenekleri	32
Şekil 13 : Yapıların ısı tedariki için hidrojen kullanmanın potansiyel yolları	33
Şekil 14: Gaz altyapı bileşenlerinin hidrojen toleransı	34
Şekil 15: 40000 MWh depolamanın Türkiye'nin yaz talebi ve yük-süre eğrisine etkisi	39
Şekil 16: Türk elektrik sistemi, kapasiteleri 20000 MW'ın üzerine çıktığı takdirde güneş ve rüzgâr enerjisinde çok fazla kesinti yapmaya başlamak zorunda kalacaktır	40
Şekil 17: Türkiye'deki demir-çelik fabrikalarının yerleri, 2015	42
Şekil 18: Türkiye'deki çimento fabrikalarının yerleri, 2018	43
Şekil 19: Türkiye'de doğal gaz boru hatları, 2020	43

TABLO LİSTESİ

Tablo 1: Sektörlere göre önem arz eden karbonsuzlaşma çözümleri	14
Tablo 2: Dönüşümü zor sektörler ve bunların Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonlarına katkıları, 2018	28
Tablo 3: Duyurulan yakıt hücreli elektrikli kamyonların teknik özellikleri	31
Tablo 4: Türkiye için yeşil hidrojen potansiyeli	36

KISALTMALAR LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ALK	Alkali
ABD\$	Amerikan Doları
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
BOTAŞ	Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi
BEV	Bataryalı Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicles)

CO ₂	Karbondioksit
COVID-19	Yeni Koronavirüs Hastalığı
DRI	Doğrudan Doğrudan İndirgenmiş Demir
EAf	Elektrik Ark Ocakları (Electric Arc Furnace)
EJ	Ekzajul
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FCET	Yakıt Yakıt Hücreli Elektrikli Kamyon (Fuel Cell Electric Truck)
FCEV	Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (Fuel Cell Electric Vehicle)
GAZBİR	Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
GAZMER	Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği GAZBİR' in Teknik Merkezi
GJ	Gigajul
Gt	Gigaton
GW	Gigavat
H ₂	Hidrojen
ICHET	Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency)
kcal	Kilokalori
kg	Kilogram
km	Kilometre
kW	Kilovat
kWh	Kilovat-saat (Kilowatt-hour)
mWh	Megavat-saat (Megawatt-hour)
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas)
m ³	Mmetreküp
Mt	Milyon Ton
Mtep	Milyon Ton Petrol Eşdeğeri
Mtke	Milyon Ton Kömür Eşdeğeri
MW	Megavat
°C	Santigrad Derece
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
PEM	Polimer Elektroliz Membranı
PJ	Petajul
PV	Fotovoltaik (photovoltaic)
SMR	Buhar Metan Reformasyonu (Steam Methane Reforming)
SOE	Katı Oksit Elektroliz (Solid Oxide Electrolysis)
TANAP	Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı Projesi
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
ULCOS	Çok Düşük Karbonlu Çelik Yapımı (Ultra-Low CO ₂ Steelmaking)
UNIDO	Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (United Nations Industrial Development Organisation)
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynak Destek Mekanizması



- Küresel hidrojen üretiminin %95'ten fazlası fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Üretim yöntemleri arasında doğal gazla dayalı buhar metan reformasyonu toplam üretimin yarısından fazlasından sorumludur. Su bazlı elektroliz yöntemi ise günümüzde toplam küresel hidrojen üretiminin sadece %4'ünü temsil etmektedir.
- Alkali elektroliz yöntemi hâlihazırda ticarileşmiş bir teknoloji olmasıyla birlikte yeni alternatifler de geliştirilmektedir. Elektroliz 1800'lü yılların başında beri kullanılmakta olan bir teknoloji olmasına rağmen, elektrolizdeki devam eden gelişmeler ve yenilenebilir enerji maliyetlerinin düşmesiyle birlikte, yeşil hidrojene olan ilgi de giderek artmaktadır. Bu sebeple elektroliz, projelerin sayısı ve ölçeği 100 megavat (MW) büyüklüğündeki sistemlerin yaygınlaşmasıyla dünya çapında hızla büyümektedir.
- Günümüzde hidrojen esas olarak kimya ve petrokimya ürünlerinin üretiminde ham madde olarak kullanılmaktadır. Yeşil hidrojenin birden fazla sektörde kullanım alanı olan bir enerji taşıyıcısı olarak ortaya çıkmasıyla, uygulama alanları da genişlemektedir. Bunlar içerisinde imalat endüstrisinde demir, çelik ve çimento gibi ürünlerin üretimi, yük taşımacılığı ve hidrojeni doğal gaz şebekelerine eklenmesi gibi ivme kazanan yeni alanlar vardır.
- Üretim maliyetlerinin düşmesi, yeşil hidrojenin kullanımının yaygınlaşmasını belirleyecek en başta gelen unsurdur. Küresel seviyede yapılan değerlendirmeler maliyet rekabet gücünün üretilen yeşil hidrojenin kilogram başına yaklaşık 2-3 ABD\$'lık bir seviyede olacağını göstermektedir. Bunun sağlanması için ise elektrolizör ilk yatırım maliyetlerini düşürecek teknolojiye öğrenimi hızlandırmak, yenilenebilir enerji maliyetlerinde düşüşün devamı, elektrolizör kapasitesinin en optimum ölçüde kullanımı ve elektrolizör verimliliğinin artırılması gerekecektir. Karbon piyasalarının oluşturulması da yeşil hidrojene geçişi hızlandırabilir.
- Yerli hidrojen sanayisinin kurulması Türkiye'nin enerji stratejisinin yeni bir hedefi hâline gelmiştir. Bu çalışmanın gösterdiği gibi hidrojenin, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminden sorumlu olan imalat sanayi, binalar (konut, ticari ve kamu) ve ulaştırma sektörleri içerisinde önemli bir rolü olduğu ortaya çıkmaktadır. Küresel sıralamada Türkiye'nin ilk 10 içerisinde yer aldığı çelik ve çimento üretimi, ülke sanayi enerji talebinin önemli bir payını temsil etmektedir. Karayolu yük taşımacılığı ise enerji talebi açısından hızla büyüyen bir ulaştırma şeklidir. Doğal gaz şebekeleri, Türkiye nüfusunun yaklaşık üçte ikisini temsil eden yaklaşık 53 milyon aktif kullanıcı başta olmak üzere, diğer sektörlerdeki taleple birlikte yıllık ortalama toplam 50 milyar metreküp (m³) doğal gazı ülkenin farklı noktalarına taşımaktadır. Bu sektörlerde kullanılan fosil yakıtları ikame edecek düşük karbonlu çözümler sınırlı ve şu anda maliyetli olduğundan, bu alanların her biri Türkiye'nin enerji dönüşümünde zorluk teşkil etmektedir.
- Yenilenebilir enerji kaynak bazlı yeşil hidrojen, enerjiyi son tüketen sektörlerin dönüşümünde önemli bir fırsat sağlayabilir. Bu çalışma kapsamında mevcut enerji tüketim değerleri üzerinde yapılan değerlendirmelere göre, Türkiye imalat sanayinde 2,1 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep), karayolu yük taşımacılığında 1,8 Mtep ve doğal gaz/hidrojen karışımı için 0,6 Mtep olarak toplamda 4,6 Mtep seviyesinde yeşil hidrojen potansiyeli olup, Türkiye'nin 2018'deki toplam nihai

enerji tüketiminin yaklaşık %5'i yeşil hidrojen ile ikame edilebilir. Bu miktarın üretimi için toplam en az 12,1 gigavatlık (GW) kurulu elektrolizör gücü gerekecektir. Elektroliz için gerekli olan kurulu elektrik gücü de tahmini olarak en az 36,3 GW olacağı göz ardı edilmemelidir. Toplam yatırım ihtiyacının ise en az 45,4 milyar ABD\$ seviyesinde olacağı hesaplanmıştır. Yeşil hidrojenin elektrik sisteminin esnekliğini sağlamadaki rolü gibi yeni oluşabilecek piyasalar, bu potansiyeli daha da artırabilir.

- Bu kısa çalışma, Türkiye'nin, çeşitli yollardan hidrojen üretiminin maliyetleri, faydaları ve sistem uygulamalarını kapsayan net bir planın geliştirilmesinin gerekliliği, yatırımlar için gerekli olan finansman ihtiyacının sağlanması, hidrojenin iş fırsatlarını anlama ve yerli bir kaynak olarak hidrojenin Türkiye'nin enerji dönüşümü stratejisine katkısının anlaşılmasını da kapsayan bir ulusal hidrojen stratejisinin geliştirilmesinde farklı öncelik alanlarına işaret etmektedir.

1. Hidrojen arzı ve kullanımında küresel eğilimler

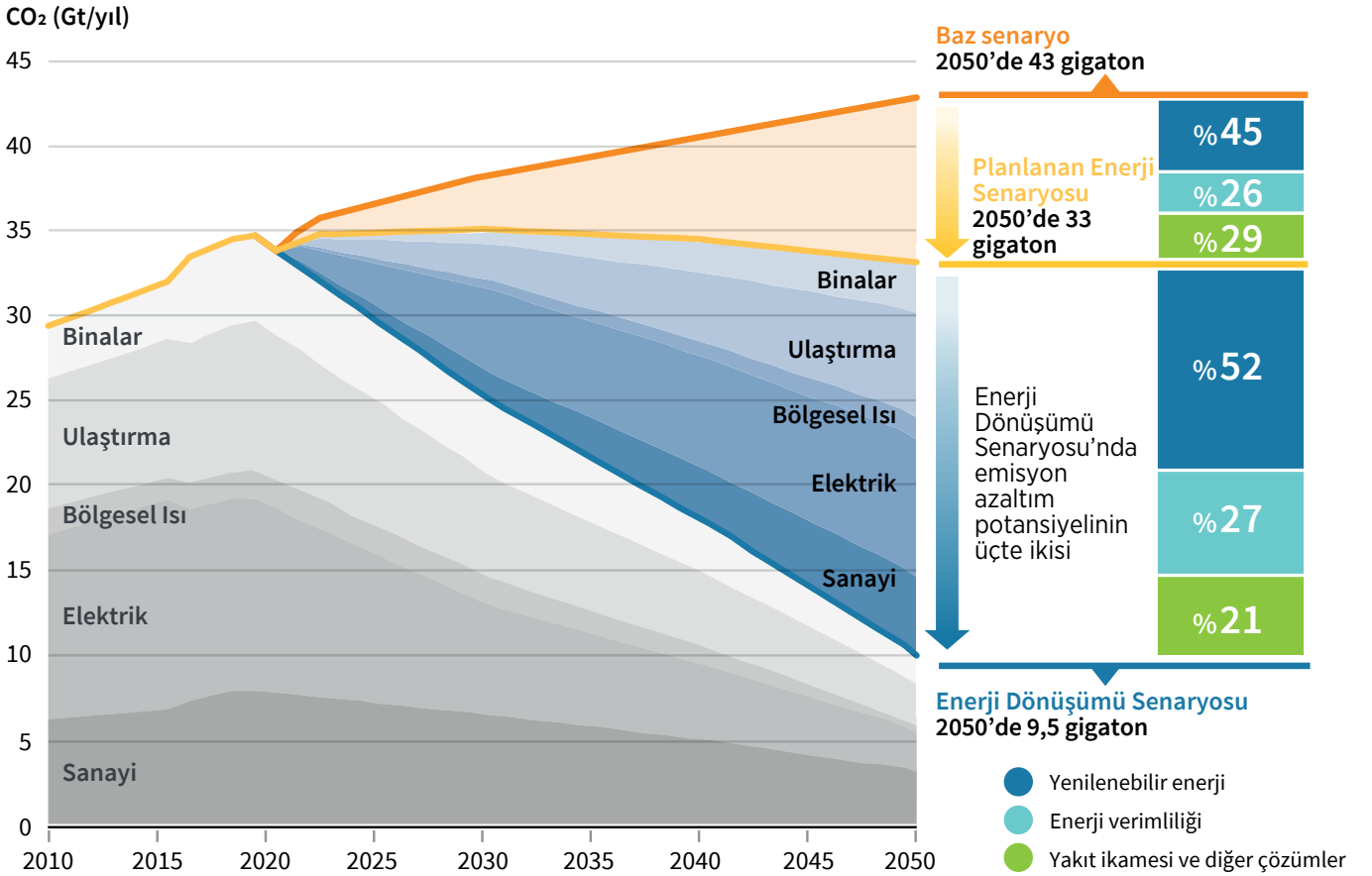
1.1. Enerji sisteminin karbonsuzlaşması

Küresel enerji sektörü enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji merkezli bir dönüşüme tanık olmaktadır. Enerji dönüşümünün diğer önemli bileşenleri ise enerjinin son kullanıldığı alanların elektrifikasyonu ve dönüşen enerji sisteminin dijitalleşmeyi de içeren ve tüm sistemi kapsayan yenilikçiliktir.

Mevcut ulusal iklim planlarının 2050'ye kadar devam ettirildiği bir senaryoda, enerji tüketiminden kaynaklanan küresel emisyonların 2025'ten sonra zirve yapacağı ve daha sonrasında mevcut seviyenin biraz altında kalacağı tahmin edilmektedir.

Küresel enerji dönüşümü, Paris İklim Anlaşması'nın ortalama küresel sıcaklık artışını sanayileşme öncesi seviyelerin 2 santigrat derece (°C) ile sınırlandırma ve hatta bu artışı, bu yüzyılın sonuna kadar 1,5 °C ile sınırlandırma hedeflerini tutturma çabalarının merkezinde yer almaktadır. Enerji sektöründen kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonları, toplam küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık üçte ikisini temsil etmektedir. Mevcut ulusal iklim planlarının 2050'ye kadar devam ettirildiği bir senaryoda, enerji tüketiminden kaynaklanan küresel emisyonların 2025'ten sonra zirve yapacağı ve daha sonrasında mevcut seviyenin biraz altında kalacağı tahmin edilmektedir. Paris İklim Anlaşması ile uyumlu karbon bütçesi dâhilinde kalmak için emisyonların şu andan itibaren 2050'ye kadar doğrusal olarak azalan bir yörüngede olması ve 2050'ye kadar emisyonların yılda 10 gigatonun (Gt) altında olması gerekmektedir (bkz. Şekil 1).

Şekil 1: Emisyon azaltımlarının büyük kısmı: yenilenebilir enerji kaynakları ve verimlilik



Kaynak: IRENA (2020a)

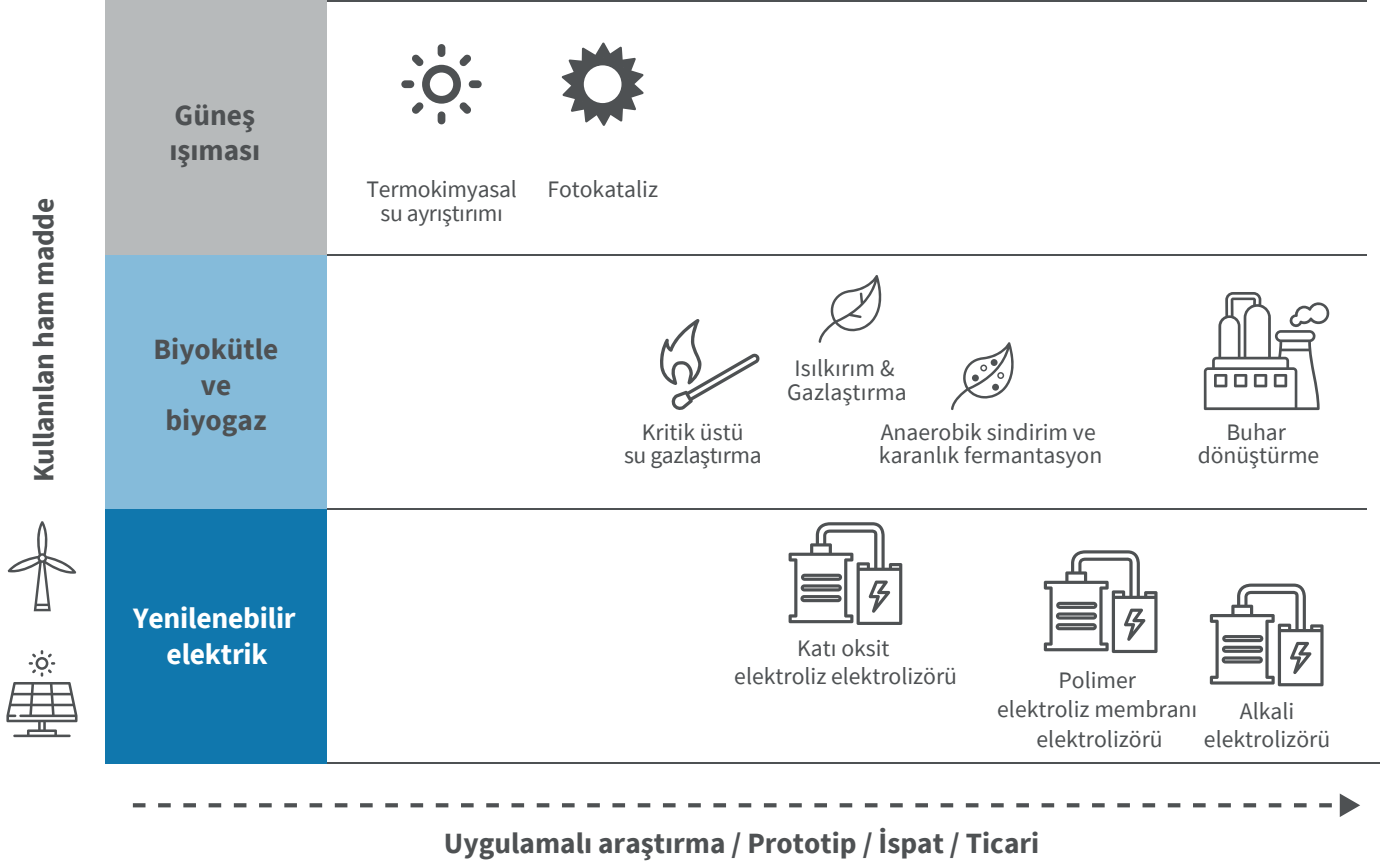
1.2. Hidrojenin karbonsuzlaşmadaki rolü

Uluslararası enerji ve iklim senaryolarından bazıları, 2050 yılına kadarki sürede enerji verimliliği ve yenilenebilir enerjinin (elektrifikasyon dâhil) gerekli emisyon azaltımlarının yaklaşık %80'ini karşılayabileceğini göstermektedir (IRENA, 2020a). Bazı diğer senaryolar ise davranış değişikliği, nükleer enerji ve daha az kirlenici fosil yakıt teknolojisi alternatiflerine geçişin rolüne işaret etmektedir (IEA, 2020).

Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen olarak tanımlanır. Hidrojen ekonomisine geçiş, son yirmi yıldır tartışılmakla birlikte, enerji sistemi karbonsuzlaşması bağlamında son birkaç yıl içinde dikkat çekmiştir.

Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen olarak tanımlanır. Mavi hidrojen ise doğal gaz gibi fosil yakıt kaynaklarından üretilir, ancak üretim sırasında ortaya çıkan karbon emisyonları yakalanır ve depolanır veya yeniden kullanılır. Hidrojen ekonomisine geçiş, son yirmi yıldır tartışılmakla birlikte, enerji sistemi karbonsuzlaşması bağlamında son birkaç yıl içinde dikkat çekmiştir. Bunun altında yatan neden, karbondan arındırılması zor olan sektörler için ticarileşmiş ve maliyeti etkin düşük karbonlu teknoloji çözümlerinin çok kısıtlı olmasıdır. Elbette enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları, enerji sektörü ve büyük ölçüde de ısıtma ve ulaştırma sektörlerinden kaynaklanan emisyonların azaltılması için en öncelikli çözümlerdir. Elektrikli araçlar ve ısı pompaları gibi elektrifikasyon seçeneklerinin devreye girmesi de eşit derecede önem arz etmektedir. Ancak, demir, çelik, kimyasallar ve çimento üretimi gibi yüksek sıcaklıklı üretim proseslerine sahip ürünler ve binek araç kullanımının ötesinde kalan ulaştırma alanları için mevcut düşük karbonlu çözümlerin sunduğu fırsatlar sınırlı kalmaktadır. Bu durum, sektörleri ve politika yapıcılarını, yenilenebilir elektrik kaynaklarından üretilen e-yakıtlar ve yeşil hidrojen gibi yeni teknoloji seçeneklerini aramaya itmiştir. Yeşil hidrojen, yenilenebilir elektrik, biyokütle ve güneş temelli kaynakları içeren yollardan üretilebilir (bkz. Şekil 2).

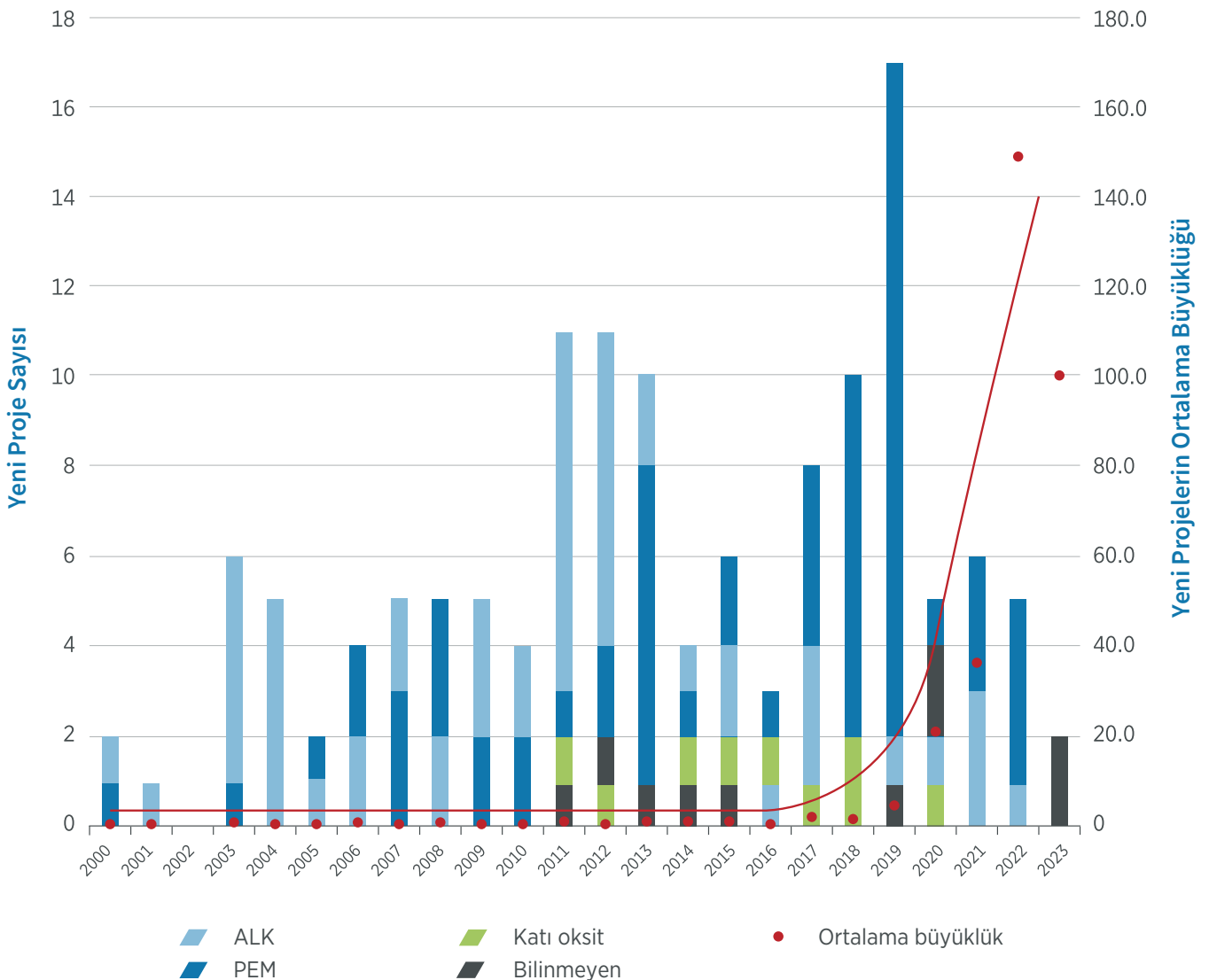
Şekil 2: Hidrojen üretim yolları



Kaynak: IRENA (2018)

Hidrojen üretimi için düşük maliyetli bir ham madde olarak yenilenebilir elektrik, farklı elektroliz seçenekleriyle birleştirilebildiği için öncelikli bir üretim yöntemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu da öncelikle düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarının çokça kullanılmasından güç almaktadır. Örneğin, 2019 yılına ait son küresel veriler, güneş fotovoltaik (*photovoltaic*, PV) elektrik üretim maliyetlerinde, yıllık bazda %13'lük bir düşüş olduğunu göstermektedir. Yeni PV projelerinden elde edilen elektrik üretiminin 2019 yılı için seviyelendirilmiş maliyeti, kilovat-saat (kWh) başına 7 ABD\$ sentin altında kalmaktadır (IRENA, 2020b). 2020 yılı sonuna kadar, PV maliyetlerinin karasal rüzgâr enerjisi teknolojisinden üretilen elektrik maliyeti ile başa baş noktaya geleceği beklenmekteydi. Alkali elektroliz (*alkaline electrolysis*), hâlihazırda ticari bir teknoloji olmakla birlikte hidrojen üretiminde kullanılmaktadır (bkz. Şekil 3). Polimer elektroliz membranı (*polymer electrolyte membrane*, PEM) teknolojisi, alkali elektrolize göre daha verimli olmakla birlikte ilk yatırım açısından daha maliyetlidir. Uygulanmakta olan bazı projeler, PEM teknolojisini desteklemektedir. Yakın tarihli proje bilgileri, ortalama üretim kapasitesi büyüklüklerinde (100 megavatın (MW) üzerinde), çarpıcı bir büyüme ve katı oksit elektroliz (*solid oxide electrolysis*, SOE) hücreleri gibi daha gelişmiş elektroliz teknolojilerine doğru bir kaymaya işaret etmektedir.

Şekil 3: Elektroliz tabanlı hidrojen projeleri

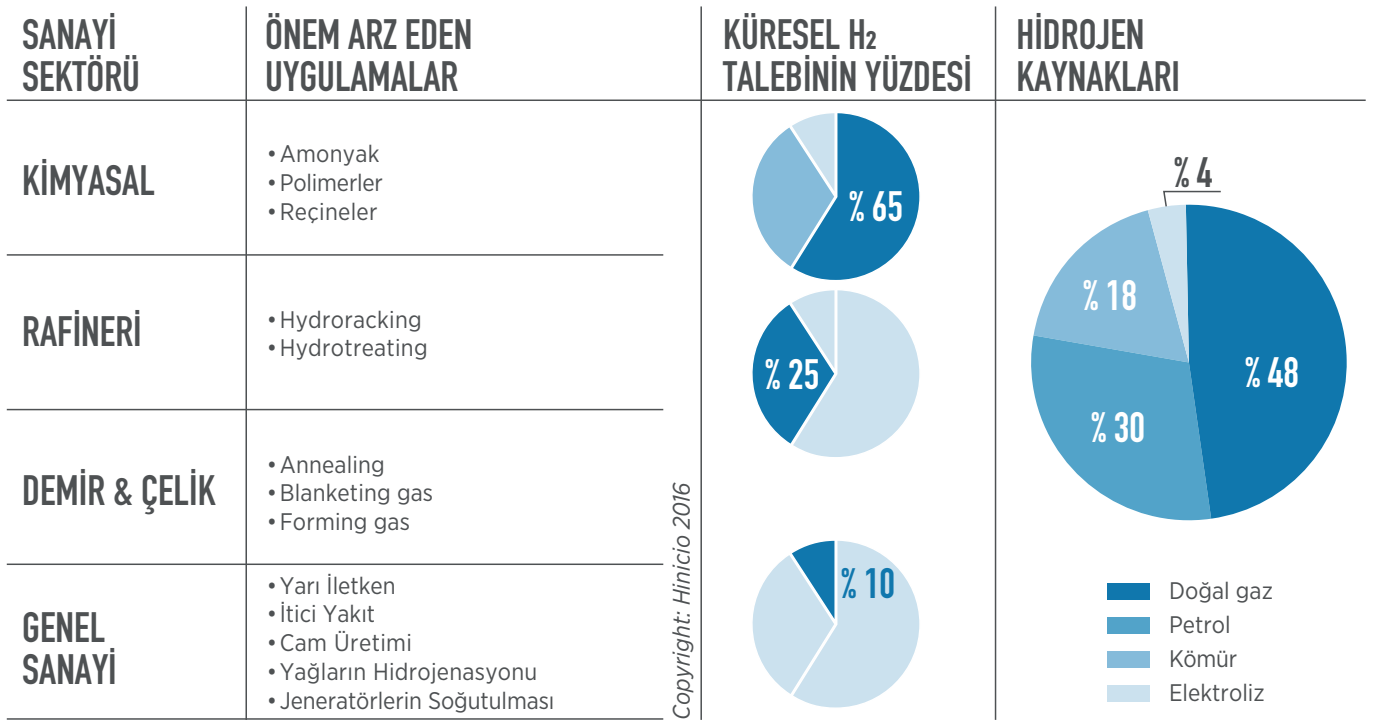


Kaynak: IRENA (2019b)

Talep tarafında, kimya ve petrokimya sektörleri (rafineriler dâhil), günümüzde hidrojen kullanımında en büyük paya sahiptir. Hidrojen, organik kimya ürünlerinin üretildiği sektörün yanı sıra daha çok gübre üretiminde (örneğin üre) kullanılan amonyağın yapı taşıdır.

Yeşil hidrojen teknolojisindeki bu umut verici gelişmelere rağmen küresel hidrojen üretimi, ağırlıklı olarak fosil yakıt kaynaklarına dayanmaktadır. Daha çok geleneksel buhar metan reformasyonu (*steam methane reforming*, SMR) yoluyla üretim yapılmakta ve bunu, petrol yakıtların kısmi oksidasyonu ve kömür gazlaştırma yolları takip etmektedir. Ülkeler arasındaki teknoloji seçimini ise fosil yakıt kaynaklarının bölgelerdeki kaynak rezervleri belirlemektedir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Avrupa'da, doğal gaz dayalı SMR, büyük bir pazar payına sahiptir. Çin, bol miktardaki ucuz kömür kaynaklarına sahip olması sebebiyle kömüre dayalı yöntemleri tercih etmektedir. Talep tarafında, kimya ve petrokimya sektörleri (rafineriler dâhil), günümüzde hidrojen kullanımında en büyük paya sahiptir. Hidrojen, organik kimya ürünlerinin üretildiği sektörün yanı sıra daha çok gübre üretiminde (örneğin üre) kullanılan amonyağın yapı taşıdır.

Şekil 4: Dünyada hidrojenin mevcut üretim yolları ve uygulama alanları



Kaynak: IRENA (2018)

Hidrojen, karbondan arındırılması zor sektörlerden kaynaklanan emisyonları azaltmanın önemli bir unsuru olarak gelecekte daha geniş bir kullanıma sahip olması beklenmektedir. Yeşil hidrojen ve onun metan, metanol ve amonyak gibi sentetik türevleri, özellikle taşımacılık için önemli bir çözüm sağlamaktadır.

Hidrojen, karbondan arındırılması zor sektörlerden kaynaklanan emisyonları azaltmanın önemli bir unsuru olarak gelecekte daha geniş bir kullanıma sahip olması beklenmektedir (bkz. Tablo 1). Yeşil hidrojen ve onun metan, metanol ve amonyak gibi sentetik türevleri, özellikle taşımacılık için önemli bir çözüm sağlamaktadır. Örneğin, elektrikli araçlar şarj edilebilmeleri için önemli bir altyapıya ihtiyaç duyarken, depolama çözümleri yük taşımacılığı için hala tam olarak ticarileşmemiştir. İhtiyaç duyulan batarya depolama teknolojilerinin gerek maliyetleri gerekse büyüklükleri, kullanımı önünde engeller oluşturmaktadır. Havacılıkta, sıvı biyoyakıt fosil yakıtlara kıyasla karbon ve hava kirlenici emisyonlar açısından daha düşük bir alternatif sağlamakla birlikte, sektörün yakıt kullanımı konusunda belirlemiş olduğu standartları ve teknik özellikleri karşılama yönünden ihtiyaçları karşılama zorunluluğu vardır. Ayrıca sıvı biyoyakıt üretim maliyetleri, geleneksel muadillerine göre 3 ila 5 kat daha pahalıdır (IRENA, 2017).

Yeşil hidrojen, günümüzde kimya ve petrokimya sektöründeki kullanımına kıyasla gelecekte imalat sektöründe çok daha geniş bir role sahip olabilir.

Yeşil hidrojen, günümüzde kimya ve petrokimya sektöründeki kullanımına kıyasla gelecekte imalat sektöründe çok daha geniş bir role sahip olabilir. Demir ve çelik üretimi, en büyük endüstriyel emisyon kaynaklarından biri olarak sıralanmaktadır. Çelik üretmek için gerek duyulan demirin büyük kısmı, kömür ve kok karışımı ile çalışan yüksek fırınlarda üretilmektedir. İşlem için gereken sıcaklıklar yüksek olduğundan (>1000°C'nin üzerinde), geleneksel teknoloji olan yüksek fırınlara yenilenebilir enerji alternatifi bulunmamaktadır. Biyokok (biocoke) ve yine yenilenebilir bir kaynak olarak sayılabilecek odun kömürü, gelişme sürecinde olmakla birlikte, kullanımları Brezilya'daki küçük ölçekli yüksek fırınlar ile sınırlı olup bu kaynaklardan üretilen nihai ürünün mekanik dayanıklılığı ise zayıf kalmaktadır (Saygın et al., 2014). Elektrik ark ocakları (*electric arc furnace*, EAF) ile entegre doğal gaz veya kömür kullanarak doğrudan indirgenmiş demir (*direct reduced iron*, DRI) üretim yöntemleri, günümüz toplam çelik üretiminin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Sektör, bu ve diğer üretim patikalarıyla çeşitli düşük emisyon azaltım yolları aramaktadır. Yenilenebilir enerjiden elde edilmiş hidrojen kullanan bir DRI-EAF tesisi, yüksek fırın üretim yoluyla karşılaştırıldığında, CO₂ emisyonlarını %80 ila %95 oranında azaltmaktadır. Hidrojen bazlı demir üretimi teknik açıdan mümkün olup çeşitli üreticiler, bu seçeneği daha da geliştirmek için çalışmaktadırlar. Bugüne kadar konuyla ilgili farklı girişimler mevcuttur: Daha çok Fransa'dan (*Université de Lorraine*) yürütülen ULCOS programının hidrojen alt projesi; Hybrit projesi, SSAB, İsveç; SuSteel, VoestAlpine, Avusturya; Salcos-Macor, Salzgitter, Almanya; ArcelorMittal Midrex santrali, Almanya; Flash demir üretimi, Amerika Birleşik Devletleri (Gielen et al., 2020).

Amonyak üretimi, yeşil hidrojen için önemli bir fırsat oluşturmaktadır.

Amonyak üretimi, yeşil hidrojen için önemli bir fırsat oluşturmaktadır: Amonyak üretim tesisleri için bir teknoloji sağlayıcısı olan Haldor Topsoe, atık ısıyı, enerji tüketimini ve maliyetleri azaltmak için kullanarak amonyak teknolojisinde, yenilenebilir enerji kullanımının verimliliğinde gelişim sergilemektedir. Daha genç ve yenilikçi bir şirket olan Atmonia ise yenilenebilir enerji kullanarak doğrudan hava ve sudan suda çözülmüş amonyak üretme amaçlı elektrokimyasal bir katalizör prosesi için 2 milyon ABD\$'lık bir prototip inşa etmeyi planlamaktadır. Starfire Energy, PEM yoluyla hidrojen üretimi, basınç salınımlı adsorpsiyon, amonyak sentezi ve sıvı amonyak depolama ile azot üretimi de dâhil olmak üzere amonyak üretiminde, yenilenebilir enerji için yeni bir çözüm geliştirmiştir. Şirket, Colorado'da düşük basınçlı 'Rapid Ramp' amonyak prosesini kullanarak günde 10 kilogramlık (kg) kapasiteye sahip bir amonyak sentez sistemi inşa etmiştir. 2020 yılında tesisi günde 100 kg'a tadel etmeyi planlamaktaydı (Saygın & Gielen).

Bu pazarlar, günümüze kıyasla 2050 yılına kadar hidrojen talebini iki kattan daha fazla büyütebilir.

Bu pazarlar, günümüze kıyasla 2050 yılına kadar hidrojen talebini iki kattan daha fazla büyütebilir (15 ekzajul, EJ'nin biraz altından yaklaşık 30 EJ'a kadar)¹. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (*International Renewable Energy Agency*, IRENA) senaryolarına göre, 2050 yılına kadar hidrojen üretiminin yarısından fazlası, yeşil hidrojen olacaktır. Geri kalanı, mavi ve gri hidrojen karışımı olacaktır.

¹ 1 milyon ton petrol eş değeri 41.868 petajuldur (PJ). 1000 PJ 1 EJ'dür.

Tablo 1: Sektörlere göre önem arz eden karbonsuzlaşma çözümleri

Sektörler	Önem arz eden çözümler
 Karayolu yük taşımacılığı	Doğrudan elektrifikasyon, yeşil hidrojen, biyoyakıtlar
 Havacılık	Biyoyakıtlar, yeşil hidrojenden elde edilen sentetik yakıtlar, elektrifikasyon
 Gemicilik	Yeşil hidrojenden elde edilen sentetik yakıtlar, biyoyakıtlar, elektrifikasyon
 Demir ve çelik	Yeşil hidrojen, karbon yakalama ve depolama, biyokütle, dögüsel ekonomi
 Kimyasallar ve petrokimyasallar	Biyokütle, Yeşil hidrojen, dögüsel ekonomi
 Alüminyum	Elektrifikasyon, dögüsel ekonomi
 Çimento ve kireç	Karbon yakalama ve depolama, dögüsel ekonomi, yenilenebilir enerji ve atık
 Doğal gaz sisteminin dönüşümü	Yeşil hidrojen, yeşil hidrojenden elde edilen sentetik metan, biyogaz

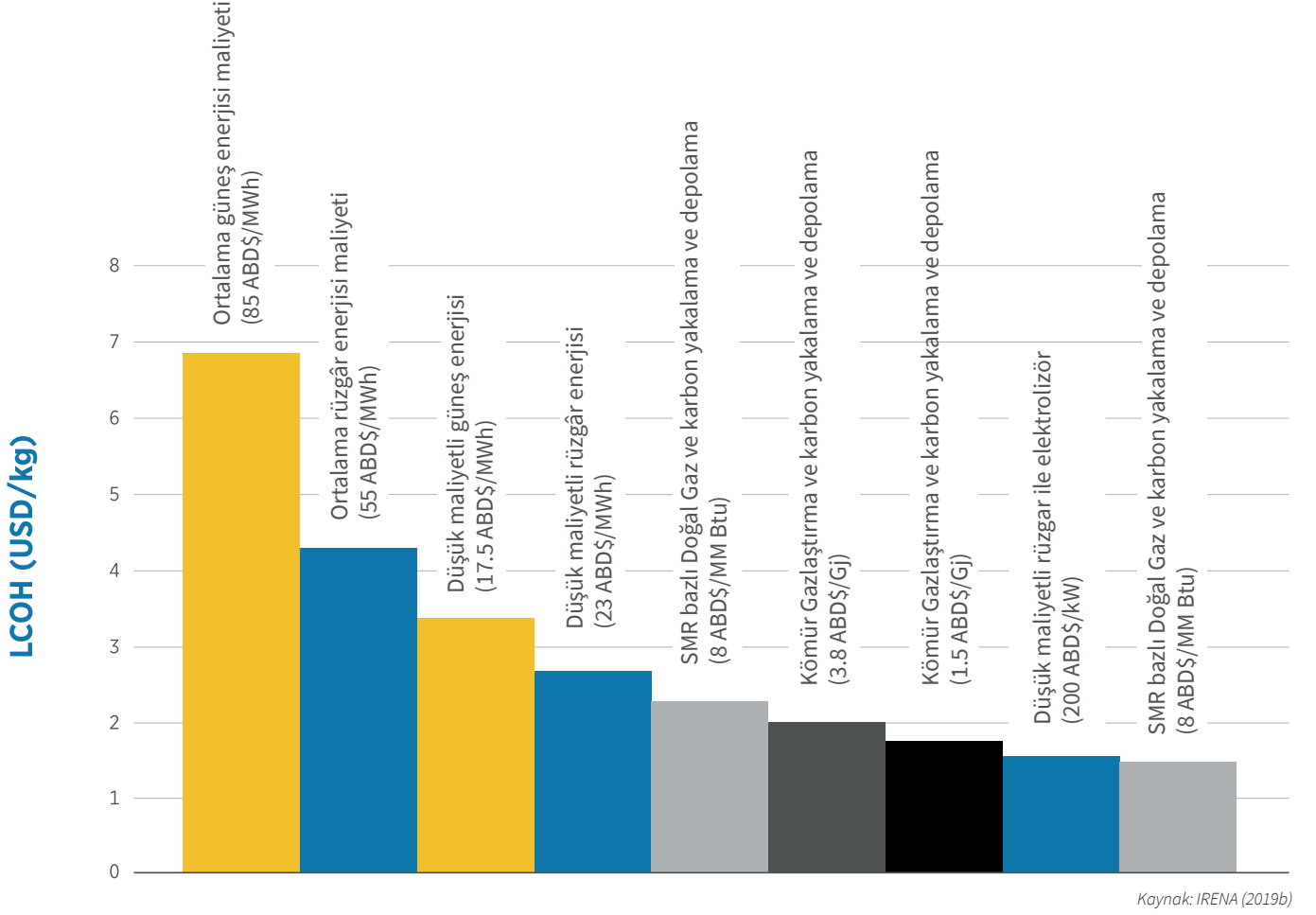
Kaynak: IRENA (2020a)

Elektrolizörün enerji verimi, %65 ila %67 arasındadır ve kg hidrojen başına, 50 kWh elektrik tüketir. Uygun maliyetli yeşil hidrojen üretimi için elektrolizörlerin ilk yatırım maliyetlerinde ve yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin üretim maliyetlerinde, düşüşe ihtiyaç olacaktır.

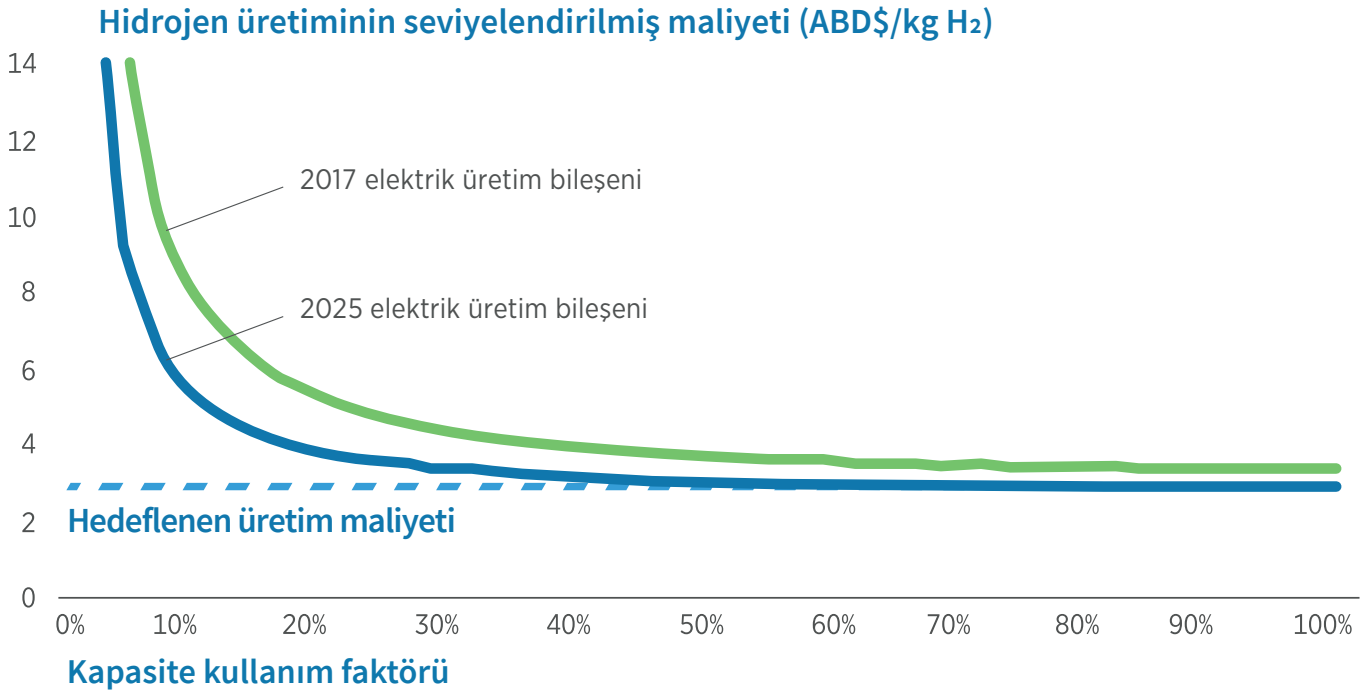
Yeşil hidrojen üretim maliyeti, buna dayalı ürünlerin maliyet etkinlikleri için kilit öneme sahiptir (bkz. Şekil 5). Yeşil hidrojen üretim maliyeti, elektriğin üretim maliyeti ve elektrolizör kapasitesi ilk yatırım maliyeti olarak ikiye ayrılabilir. Elektrolizörün enerji verimi, %65 ila %67 arasındadır ve kg hidrojen başına, 50 kWh elektrik tüketir. Kilovat saat başına, 4 ABD\$ sent elektrik üretim maliyeti varsayıldığında, üretilen kg yeşil hidrojen başına, 2 ABD\$ maliyet hesaplanmaktadır. Elektrolizör tesisi maliyeti, kilovat (kW) kurulu güç başına, 1000 ABD\$'dir. İskonto oranı olarak %10'luk bir seviye göz önünde bulundurulduğunda, kapasite kullanım faktörlerindeki değişikliklere göre kg hidrojen başına, 0,6 ila 1,8 ABD\$ arasında bir üretim maliyeti anlamına gelmektedir. Bugün yeşil hidrojenin üretim maliyeti, kg başına 6 ABD\$ ile 10 ABD\$ arasındadır. Diğer kaynaklara göre kilogram başına 2,5 ile 5,5 avro (megavat saat başına 35-87 avro fiyat ve 600 avro/kW elektrolizör ilk yatırım maliyeti) arasında maliyetler olduğu ön plana çıkmaktadır. Bu da 1,5 avro/kg seviyesindeki doğal gaz bazlı üretimden 4 kat daha pahalı bir maliyeti ortaya koymaktadır (European Commission, 2019). Bu değer, önümüzdeki yıllarda en uygun koşullarda, 3 ABD\$/kg seviyesine düşebilir. Yine de böyle bir fiyatta, bir gigajul (GJ) hidrojenin (yaklaşık 8 kg) maliyeti 24 ABD\$ olurken, nakil boru hattından tedarik edilen doğal gazın GJ başına günümüzdeki maliyeti, Avrupa ve ABD'de 2 ila 3 ABD\$ arasında değişmektedir. Dolayısıyla, hidrojen, 7 kattan fazla daha pahalıdır. Buna, hidrojen tedariki için gerekli olan altyapı maliyeti veya elektrik şebekesi ek ücretleri dâhil değildir. Uygun maliyetli yeşil hidrojen üretimi için elektrolizörlerin ilk yatırım maliyetlerinde ve yenilenebilir enerjiden üretilen

elektriğin üretim maliyetlerinde, düşüşe ihtiyaç olacaktır. Hidrojen maliyetlerine önemli katkıda bulunan bir diğer unsur ise elektrolizörlerin kapasite kullanım faktörleri ve verimlilikleridir. Düşük kullanım oranlarında üretim maliyetleri de hâliyle çok daha yüksektir (bkz. Şekil 6). Bunun önüne geçilmesi için de sürekli düşük maliyetli yenilenebilir enerji arzı gerekmektedir. Bir diğer deyişle de zaman zaman rüzgâr ve güneş kaynakları üretim fazlası elektriğin hidrojen üretimi için kullanılması, yeşil hidrojenin maliyet etkinliğini artırmak için yeterli olmayacaktır.

Şekil 5: Seviyelendirilmiş hidrojen üretimi maliyeti (ABD\$/kg H₂ cinsinden)



Şekil 6: Elektrolizör kapasite faktörlerinin (x eksen) hidrojen üretim maliyetleri (y eksen) üzerindeki etkisi



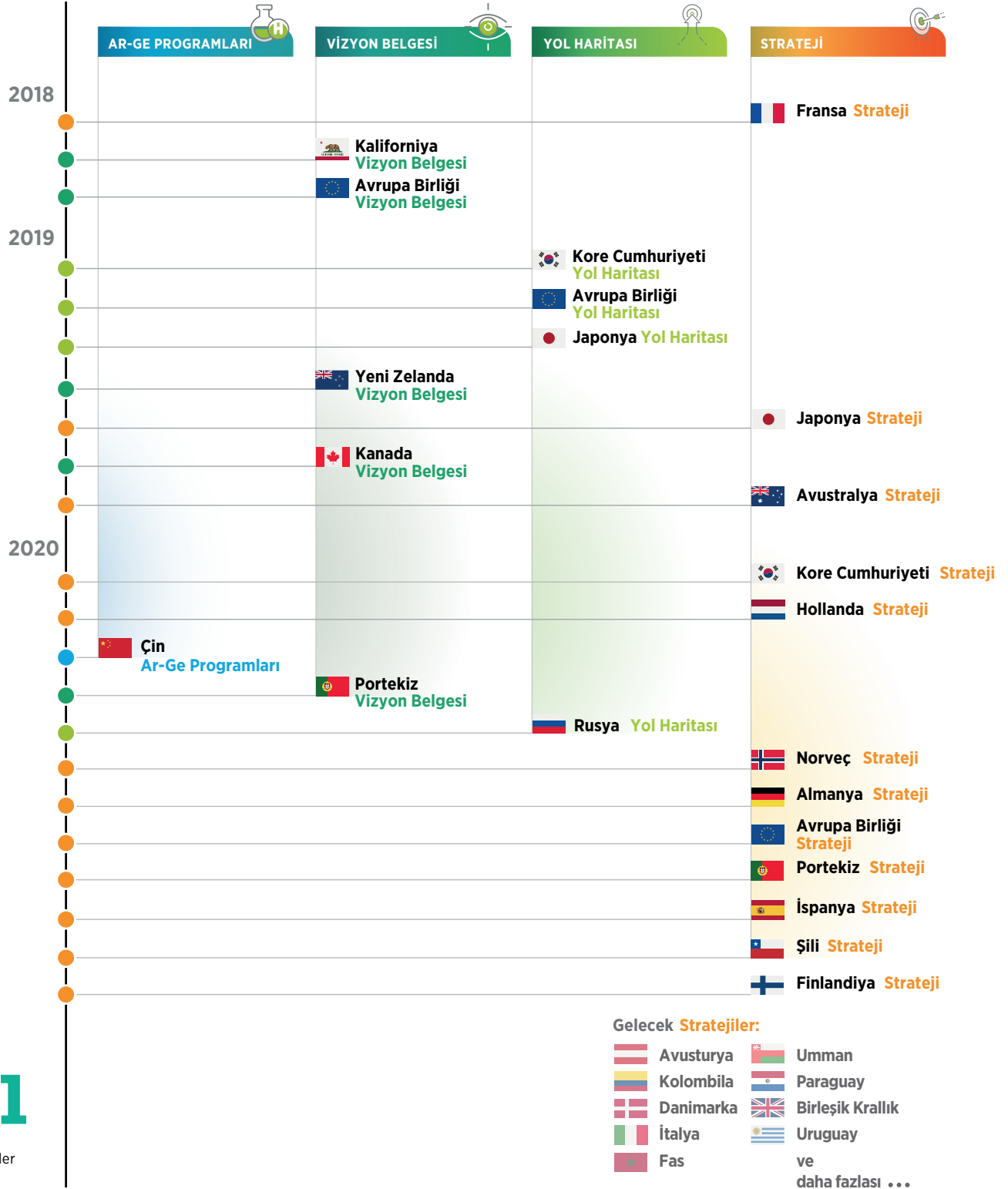
1.3. Dünyanın farklı yerlerinde büyüyen hidrojen ile ilgili girişimler

Hidrojen politikalarının geliştirilmesi ve teknolojiyle ilgili araştırmaların, enerji sektöründeki en popüler konulardan biri olarak ön plana çıktığı gözlemlenmektedir. Yeni gelişen birçok ulusal girişim ve strateji mevcuttur. Bunların bir seçkisi aşağıda verilmiştir (ayrıca bkz. Şekil 7):

- Amerika Birleşik Devletleri: US DRIVE Hidrojen Üretimi Teknik Ekibi Yol Haritası (Kasım 2017) (U.S. DRIVE, 2017); benzin galonu eş değeri başına, 2-4 ABD\$/lık seviyelendirilmiş maliyetle temiz, yerli kaynakları kullanan hidrojen üretiminin geliştirilmesini sağlamayı amaçlamaktadır.
- Almanya: Ulusal Hidrojen Stratejisi (Haziran 2020) (BMW, 2020); yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojeni, uzun vadede yeşil hidrojen ve sürdürülebilir olarak tanımlamaktadır.
- Avustralya: Avustralya Ulusal Hidrojen Stratejisi (Kasım 2019) (COAG Energy Council, 2019); hidrojenin ticarileştirilmesini hızlandırma, ulusal bir üretim ve tedarik zinciri oluşturma ve iç talebi teşvik etme planını ortaya koymaktadır.
- Avrupa Birliği: İklim açısından nötr bir Avrupa için bir hidrojen stratejisi (Temmuz 2020) (European Commission, 2020); bölgenin enerji sisteminin karbondan arındırılmasında, Avrupa için bir öncelik olarak hidrojenin nasıl geliştirilebileceğini araştırmaktadır.
- Fransa: Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (Haziran 2018) (DGEC & CEA, 2018); yeşil hidrojen üretimi ve üretim sanayinin dönüşümü, doğal gaz arzıyla entegrasyon, ulaştırma ve enerji depolama gibi alanlarda kullanımına başlamak için bir strateji sağlamaktadır.
- Hollanda: Kuzey Hollanda'da Yeşil Hidrojen Ekonomisi (Mayıs 2019) (NIB, n.d.); yeşil enerjinin kimya, ulaşım, elektrik ve ısıtma sektörlerinin geçişini nasıl kolaylaştırabileceğini göstermektedir.

- İtalya: İtalya'da enerji dönüşümü ve gaz ve enerji sektörlerinin rolü (Ekim 2019) (CDP, n.d.); hidrojen ve diğer e-yakıtların farklı enerji senaryoları altında, gaz sektörünün karbondan arındırılmasına nasıl yardımcı olabileceğini araştırmaktadır.
- Japonya Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Stratejik Yol Haritası (Mart 2019) (Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council, 2019); bir hidrojen toplumuna geçiş stratejilerini araştırmaktadır.

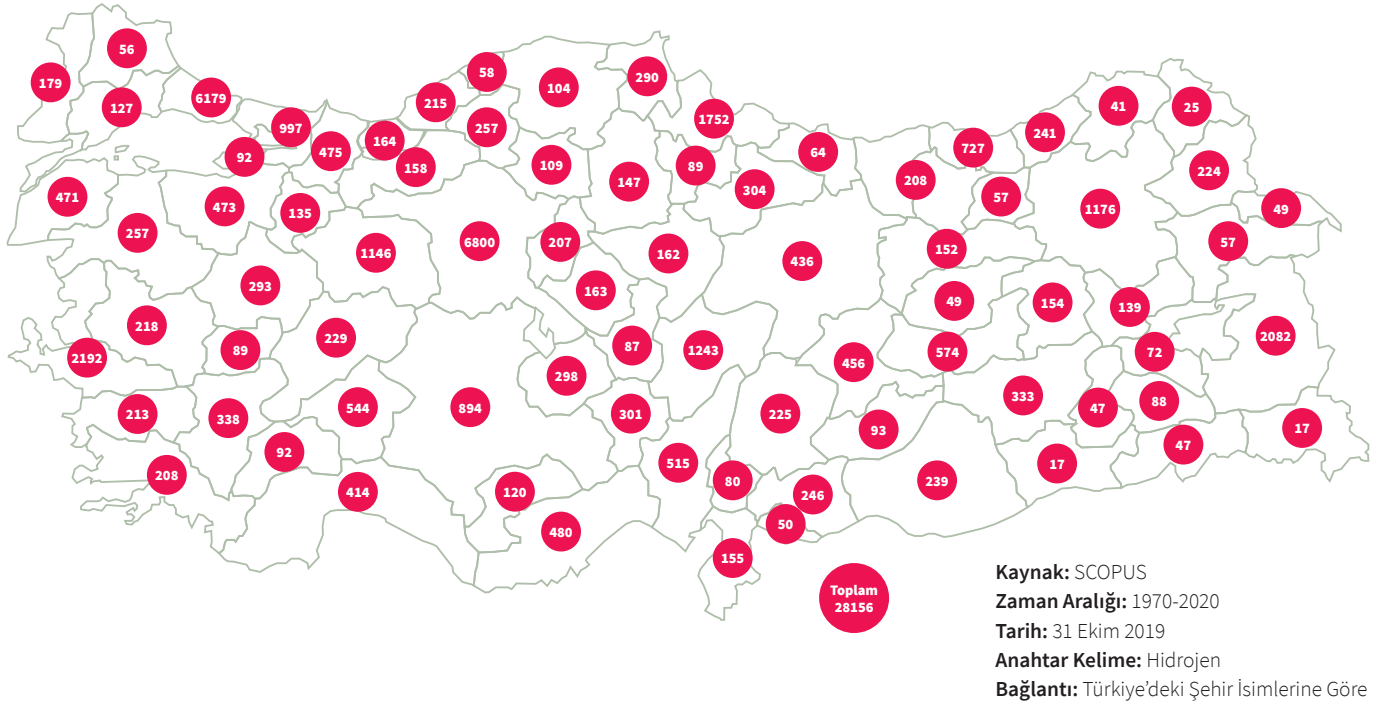
Şekil 7: Haziran 2018 ve Kasım 2020 döneminde ülkelerin ilan ettikleri hidrojen girişimlerinin özeti



Ulusal seviyedeki gelişmelere paralel olarak özel sektörde de girişimlerin sayısı artmaktadır. 2017 yılının haziran ayında, CEO düzeyinde bir danışmanlık kurulu olarak kurulan “Hidrojen Konseyi”- şu anda 90’dan fazla üyeye sahiptir (Hydrogen Council, n.d.). Ayrıca, Uluslararası Enerji Ajansı (*International Energy Agency*, IEA) (IEA, 2019) ve IRENA gibi hükûmetler arası kuruluşlar tarafından üstlenilen ve temiz enerji kaynaklarına odaklanan artan sayıda çalışma da mevcuttur (IRENA, 2019a; 2020c; 2020d).

Türkiye, daha önce İstanbul’da UNIDO-ICHET’i desteklemek suretiyle hidrojen araştırma ve geliştirmesini (Ar-Ge) artırmaya çalışmıştır. Ancak bu destek, politika belirleyicilerinin beklentilerini karşılamaması sebebiyle bir müddet sonra kapatılmıştır. Daha sonrasında ekipmanlar, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın (ETKB) Hidrojen Laboratuvarları’na taşınmıştır. Ocak 2020’ye kadar hidrojen, Türkiye’nin enerji politikalarında kısıtlı görünürlüğe sahip olmuş fakat 15 Ocak 2020 tarihinde, ETKB’nin düzenlemiş olduğu bir başlangıç toplantısı (“Hidrojen Arama Konferansı”) ile kamuoyundan görüş alma dönemi başlatılmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020). O zamandan beri de hidrojen, Türkiye’nin enerji dönüşüm stratejisinin önemli bir parçası hâline gelmiştir. Toplantıda, Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Sayın Fatih Dönmez, 2021 yılına kadar Türkiye’nin dağıtım şebekesinde, hidrojeni doğal gazla karıştırmayı test edeceğini açıklamıştır. Görev, doğal gaz dağıtım şirketleri birliği olan Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği’ne (GAZBİR) verilmiştir. Şu anda GAZBİR, GAZMER ile birlikte proje üzerinde çalışmaktadır. Konferansta ele alınan önemli bir çalışma da “Türkiye’deki Hidrojen Çalışmaları Haritası”dır. 31 Ekim 2019 itibarıyla, Türkiye genelinde toplam 28.156 adet hidrojenle ilgili çalışma tamamlanmıştır (Şekil 8). Tüm illerde hidrojen ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Dolayısıyla, hidrojen çalışmaları konusundaki akademik hazırlık, ilerlemek için yeterli olabilir.

Şekil 8: Türkiye’deki hidrojen araştırmalarına genel bakış (31 Ekim 2019 itibarıyla)



Bahsi geçen Hidrojen Arama Toplantısı'nda, hidrojen ve malzeme dâhil ilgili konularda çalışan Türkiyeli girişimciler, Hidrojen Laboratuvarı'nda bir araya getirilmiştir. Ayrıca gayri resmi olarak bilgi alışverişi ve kayıtlı anket gerçekleştirilmiştir. Ankete göre, katılımcıların çoğu, hidrojenin 2030 yılına kadar Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminde %1'lik bir paya sahip olmasını beklemektedir. Ankete katılanların hâlihazırda hidrojen veya ilgili teknolojilerle çalıştığı göz önüne alındığında, beklentinin seviyesi düşük olduğu gözlemlenmektedir.

Anket sonuçlarının tamamı, toplantı notlarına eklenmiş ve ETKB web sayfasında yayınlanmıştır. Ancak toplantıda tartışılan iki önemli konu, hidrojenin yakılmasının sanayideki üretim süreçlerini ve güvenli yakma teknolojilerini nasıl değiştireceği yönündedir. Şu anda, büyük sanayi oyuncuları, hidrojeni temel düzeyde araştırmaktadırlar ve hidrojenin nihai ürün kalitesi ve özellikleri üzerindeki etkileri hakkında birçok soru da cevaplanmayı beklemektedir. Bu, devlet destekli Ar-Ge için önemli bir alandır.

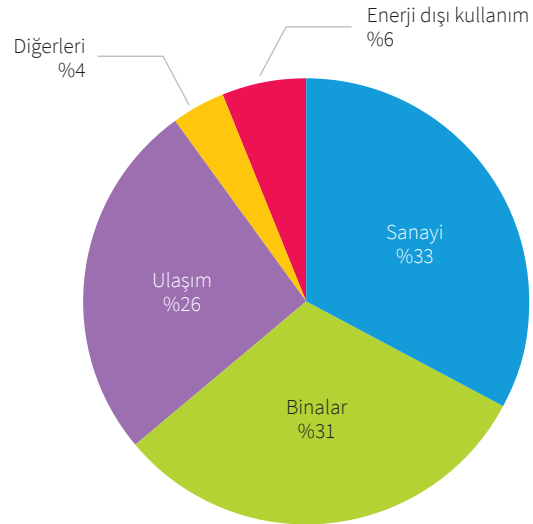


2. Türkiye’de hidrojenle ilgili fırsatlar

Türkiye’nin toplam nihai enerji tüketimi (enerji ve enerji dışı kullanımlar dâhil), 2018 sonu itibarıyla yılda 109 Mtep’e ulaşmıştır.

Türkiye’nin toplam nihai enerji tüketimi (enerji ve enerji dışı kullanımlar dâhil), 2018 sonu itibarıyla yılda 109 Mtep’e (veya 4,6 EJ’a) ulaşmıştır (bkz. Şekil 9) (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, n.d.-b). İmalat sanayi, toplam nihai tüketimin üçte birini oluşturan en büyük enerji kullanıcı sektördür.² Ağırlıklı olarak kimya ve petrokimya sektörü tarafından fosil yakıt ham maddelerinin kimyasallara ve plastiğe dönüştürülmesinde yararlanılan enerji dışı kullanımlar hesaba katıldığında, sektörün payı %39’a kadar çıkmaktadır. Toplam nihai tüketimde, %31’lik payla imalat sanayini, binaların enerji talebi takip etmektedir. Ulaştırmanın payı %26 olup sektör, petrol yakıtlarının en büyük kullanıcısı konumundadır. Sonraki bölümlerde, farklı nihai kullanım uygulamaları ile her sektörde enerjinin nasıl tüketildiği daha ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bu bölümün ilk kısmı, hangi sektörlerin karbonsuzlaşmasının zor olduğunu gösteren bir adım olarak Türkiye’nin imalat sanayi, ulaştırma ve binaların mevcut enerji tüketimlerini açıklamaktadır. Sonraki bölümde, Türkiye’de yeşil hidrojen kullanımına ilişkin fırsatlar ele alınmaktadır.

Şekil 9: Türkiye’nin toplam nihai tüketiminin dağılımı, 2018



Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (n.d.-a)

2.1. İmalat sanayi

Türkiye imalat sanayi, ülke ekonomisinin bel kemiğidir. Çelik ve çimento üretiminde, Türkiye, dünya çapında ilk onda yer almaktadır ve gıda, içecek, tekstil, makine üretimi ve ulaştırma ekipmanları üretimi gibi çeşitli sektörleri, Orta Asya, Avrupa, Orta Doğu ve Kuzey Afrika’nın ortasında bölgesel bir üretim merkezidir (Saygın, Hoffman & Godron, 2018). Büyüyen ekonomi ve artan nüfus nedeniyle artan kişi başına düşen yurt içi talep ve ülkenin batıdan doğuya yaşanan küresel sanayi gelişim eğilimine rağmen iyi sürdürülen rekabet gücü, sektörün yıllık enerji talebinin on yıldan fazla bir süredir ortalama %2 büyümesine neden olmuştur (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, n.d.-b).

² Burada tanımlanan imalat sanayi, 7’den 33’e ve 41’den 43’e kadar NACE yönetmeliklerini kapsamaktadır (7-9 madenciliği temsil etmektedir, ancak ham fosil yakıtların çıkarılması hariçtir, 10-33 imalat sanayiyi, 41-43 ise inşaat sektörünü temsil etmektedir).

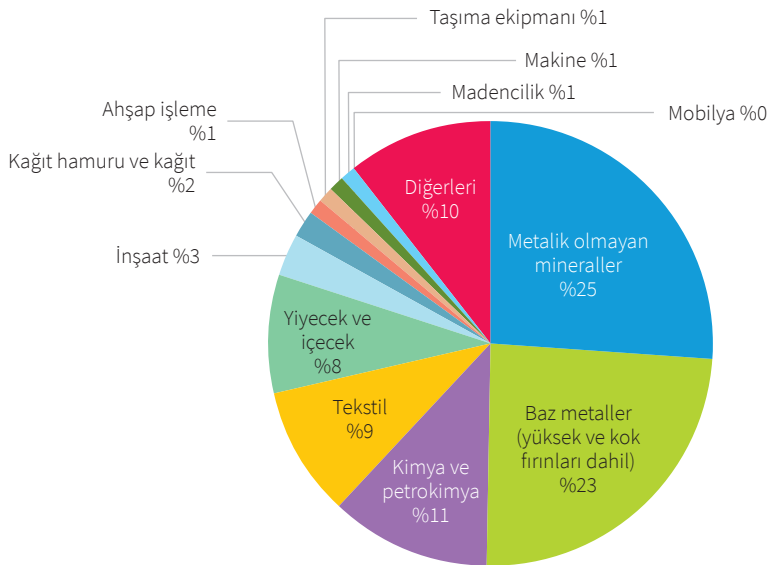
Sanayi, Türkiye'nin toplam elektrik talebinin yarısından sorumludur ve sektörün toplam nihai enerji tüketimi içindeki elektriğin payı dörtte bir oranından biraz fazladır. Yerli yenilenebilir enerji kaynakları ise toplam elektrik arzının neredeyse yarısını temsil etmektedir.

Türkiye'nin iddialı sanayi stratejisi, düşük maliyetli elektrik kaynaklarının (mesken elektrik tarifesinden daha pahalı olmasına rağmen) tüm ülkede çelik üretimi için elektrik ark ocakları ve çimento fırınları inşa etmeye yardımcı olduğu bu harekete, önemli ölçüde katkıda bulunmuştur (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2019a). Geleneksel olarak tarıma dayalı bir ekonomiye sahip olan Türkiye, aynı zamanda, komşu bölgelere ve ötesine çok sayıda ürün ihracatı yapılabilmesi için zengin fırsatlar sunan yiyecek ve içecek sektörünün oluşturulmasında yılların deneyiminden de faydalanmıştır. Tekstil sektörü, büyüyen hizmete dayalı ekonomi pahasına son yıllarda, küresel pazarda bir pay kaybetmiş olsa da Türkiye hâlen ağırlıklı olarak ihracata yönelik hazır giyim ve diğer ürünlerin tüm tedarik zincirinde faaliyet gösteren çok sayıda üretim tesisine sahiptir (Özkadı, 2020).

Türkiye'nin güçlü imalat sanayinin büyüme başarısı, ihracat yoluyla ülkede yarattığı katma değer açısından dikkatle değerlendirilmelidir. Türkiye'nin imalat sanayinde, toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık yarısı, ithal taş kömürü, doğal gaz ve ham petrol ürünlerinden sağlanmaktadır. Sanayi, Türkiye'nin toplam elektrik talebinin yarısından sorumludur ve sektörün toplam nihai enerji tüketimi içindeki elektriğin payı dörtte bir oranından biraz fazladır (bkz. Şekil 10). Yerli yenilenebilir enerji kaynakları ise toplam elektrik arzının neredeyse yarısını temsil etmektedir. Geri kalan yarısı ise çoğunlukla ithal fosil yakıtların karışımından elde edilmektedir. Türkiye'de imalat sanayi büyük ölçüde ithal enerji kaynaklarına bağımlıdır. İmalat sanayinin enerji maliyetleri (2018 yılı sonu, tahmini 50 milyar ABD\$), sektörün aynı yılki 400 milyar ABD\$'lık toplam değerinin yaklaşık %12'sini oluşturmaktadır (World Bank, n.d.). Yerel olarak çıkarılan ve dönüştürülen enerji kaynakları yoluyla ithalat bağımlılığının azaltılması, büyük bir kısmının enerji ithalatından kaynaklandığı Türkiye cari açığının azaltılması ve sanayi sektörünün rekabet gücünün sürdürülebilirliğinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu durum, Avrupa Birliği'nin Türkiye'nin tüm ihracatının yarısından fazlasını oluşturduğu, Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde gerçekleşecek olası bir sınır karbon düzenlemesi bağlamında daha da önem kazanmaktadır (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi & Agora Energiewende, 2020).

Türkiye'de imalat sanayi büyük ölçüde ithal enerji kaynaklarına bağımlıdır. İmalat sanayinin enerji maliyetleri (2018 yılı sonu, tahmini 50 milyar ABD\$), sektörün aynı yılki 400 milyar ABD\$'lık toplam değerinin yaklaşık %12'sini oluşturmaktadır

Şekil 10: Türkiye'nin imalat sanayi nihai enerji tüketiminin ve enerji dışı kullanımının sektörlere göre dağılımı, 2018



Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (n.d.-b)

Türkiye'nin 2018'deki toplam nihai enerji tüketiminin dörtte birinden biraz fazlası ulaştırmayla ilgilidir. Sektörün enerji talebi, Türkiye'nin toplam enerji talebinde tarım sektörünün hemen üzerinde ikinci en düşük paya sahiptir. Ağırıklı olarak fosil yakıtı dayanan sektörün enerji tüketimi içerisinde petrol ürünleri toplam yakıt talebinin %99'undan fazlasını temsil etmektedir.

2.2. Ulaştırma

Türkiye'nin 2018'deki toplam nihai enerji tüketiminin dörtte birinden biraz fazlası ulaştırmayla ilgilidir. Sektörün enerji talebi, Türkiye'nin toplam enerji talebinde tarım sektörünün hemen üzerinde ikinci en düşük paya sahiptir. Ağırıklı olarak fosil yakıtı dayanan sektörün enerji tüketimi içerisinde petrol ürünleri toplam yakıt talebinin %99'undan fazlasını temsil etmektedir. Elektriğin payı %0,4'tür ve yenilenebilir enerji kaynakları, toplam enerji tüketiminin %0,1'inden (etanol ve biyodizel karışımı) daha az olmakla birlikte göz ardı edilebilir bir paya sahiptir. Bu da ulaştırma sektörünü, Türkiye'nin en büyük petrol kullanıcısı yapmaktadır.

Karayolu taşıtlarının toplam binek taşımacılığı içindeki payı %90'a ulaşmıştır. Geri kalan %10'un çoğunluğu ise Türkiye'nin en hızlı büyüyen taşımacılık türü olan havacılık sektöründe gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, tüm yük taşımacılığının yaklaşık %90'ı karayolu taşıtları ile taşınmıştır. Geri kalan %10'luk kısım ise demiryolları ve deniz taşımacılığı arasında eşit olarak bölünmüştür (Ulaştırma Bakanlığı, 2015).

Karayolu taşımacılığı, Türkiye'deki tüm enerji ihtiyacının %90'ından fazlasını temsil etmektedir. Buna otomobiller, iki tekerlekli (motosiklet, scooter vb. gibi), minibüsler ve otobüslerle yolcu taşımacılığı ve kamyonlar, hafif ticari araçlar vb. ile yük taşımacılığı dâhildir. Toplam enerji talebinin %8'lik kalan dilimi ise havacılık, deniz yolları, demiryolları ve boru hattı taşımacılığı arasında bölünmüş durumdadır. Ulaştırma sektöründeki enerji talebi, nüfusun ve kişi başına düşen gelir seviyesinin artmasıyla hızla artmaktadır.

Binek otomobil segmentindeki gelişmeler dikkat çekicidir. Şu anda, Türkiye'de kullanılmakta olan yaklaşık 12,5 milyon binek araç vardır. Binek araçlar dışında ise 3,7 milyon küçük kamyon, 3,2 milyon motosiklet ve 1,9 milyon traktörle toplamda, 22,7 milyon karayolu taşıtı yollarda bulunmaktadır. Binek araç sahipliği oranı her 1.000 kişide 154'e ulaşmıştır. Bu, Almanya ve ABD gibi diğer OECD ülkeleriyle kıyaslandığında, düşük bir seviye olmakla birlikte, Türkiye'de satılan 10 araçtan 6'sını temsil eden binek otomobillere sahiplik oranı hızla artmaktadır.

Türkiye'de binek araçlar, benzin, mazot ve sıvılaştırılmış petrol gazı (liquefied petroleum gas, LPG) olmak üzere üç tür yakıt kullanımından yararlanmaktadır. Toplam binek araç stokunda 2.000'den (plug-in ve bataryalı araçlar) biraz daha az sayı ile elektrikli araçlar son derece küçük bir paya sahiptir. Fakat son yıllardaki istatistiklere göre toplam otomobil satışlarında elektrik araçların payı artmaktadır.

Türkiye'de hızla artan araç kullanımının hava kirletici emisyonlarından kaynaklanan çevresel etkileriyle ilgili endişeler de giderek artmaktadır. Bu emisyonların büyük bir kısmı, trafik sıkışıklığının yüksek olduğu kentsel alanlarda meydana gelir ve bu da insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açar.

2.3. Binalar

Türkiye, yıllık %2'lik bir büyüme oranına yaklaşan yüksek bir kentleşme oranına sahiptir. Yapı stokunun hızlı büyümesi, genellikle %4'ü aşan yeni inşaat oranlarıyla göze çarpmaktadır. İnşaat sektörü, reel gayrisafi yurtiçi hasıla büyümesinin %6,6'sını gerçekleştirerek Türkiye ekonomisinin en önemli itici güçlerinden birisini oluşturmaktadır. Türkiye'de yaklaşık 9,1 milyon yapı ve 23 milyon hane vardır.

Türkiye’de, ortalama bir yılda yapı stokuna, 100.000 kadar yeni yapı eklenmektedir. Konut, ticari ve kamu binaları dâhil olmak üzere bunların toplam enerji kullanımları, 2018 yılında ülkenin toplam nihai enerji tüketiminin üçte birine yakın bir orandan sorumluydu. Bu bağlamda, sektörün enerji talebinin son yıllarda, yılda ortalama %4,4 oranında hızla artması, inşaat sektörünü etkin bir şekilde Türkiye’deki en büyük enerji kullanıcılarından biri hâline getirmiştir.

Konut sektörünün enerji talebi, tüm binaların toplam nihai enerji tüketiminin yarısından biraz fazlasını temsil etmektedir. Geri kalanını, kamusal ve ticari yapılar oluşturmaktadır. Ancak, mevcut istatistikler, bu toplamın daha ayrıntılı bir dökümüne izin verecek yeterli veri sağlamamaktadır. Türkiye’nin yapı stoku, genellikle 1980’den sonra inşa edilmiş nispeten yeni konutlar şeklinde ön plana çıkmaktadır. Binaların yaklaşık dörtte üçü 1980 ile 2016 arasında ve bu toplamın da yaklaşık %40’ı 2000 yılından sonra inşa edilmiştir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2020a).

Alan ve su ısıtma, Türkiye’deki tüm binaların enerji tüketiminin yarısından fazlasına neden olmaktadır. Bu, aynı zamanda enerji verimliliği iyileştirme açısından en yüksek potansiyellerden birinin bulunduğu alandır. Ev aletleri, elektrik talebinin en büyük payını oluşturmaktadır. Soğutmanın (iklimlendirme) payı, ABD gibi benzer iklime sahip gelişmiş ülkelere kıyasla düşük kalmaktadır; bunun ana nedeni, nispeten daha düşük olan kişi başına düşen gelir seviyelerinin klima kullanım oranının daha düşük seyretmesine yol açmasıdır. Ancak soğutmayla ilgili enerji ihtiyacının nüfusun satın alma gücünün artmasıyla birlikte en hızlı büyüyen alanlardan biri olacağı beklenmektedir.

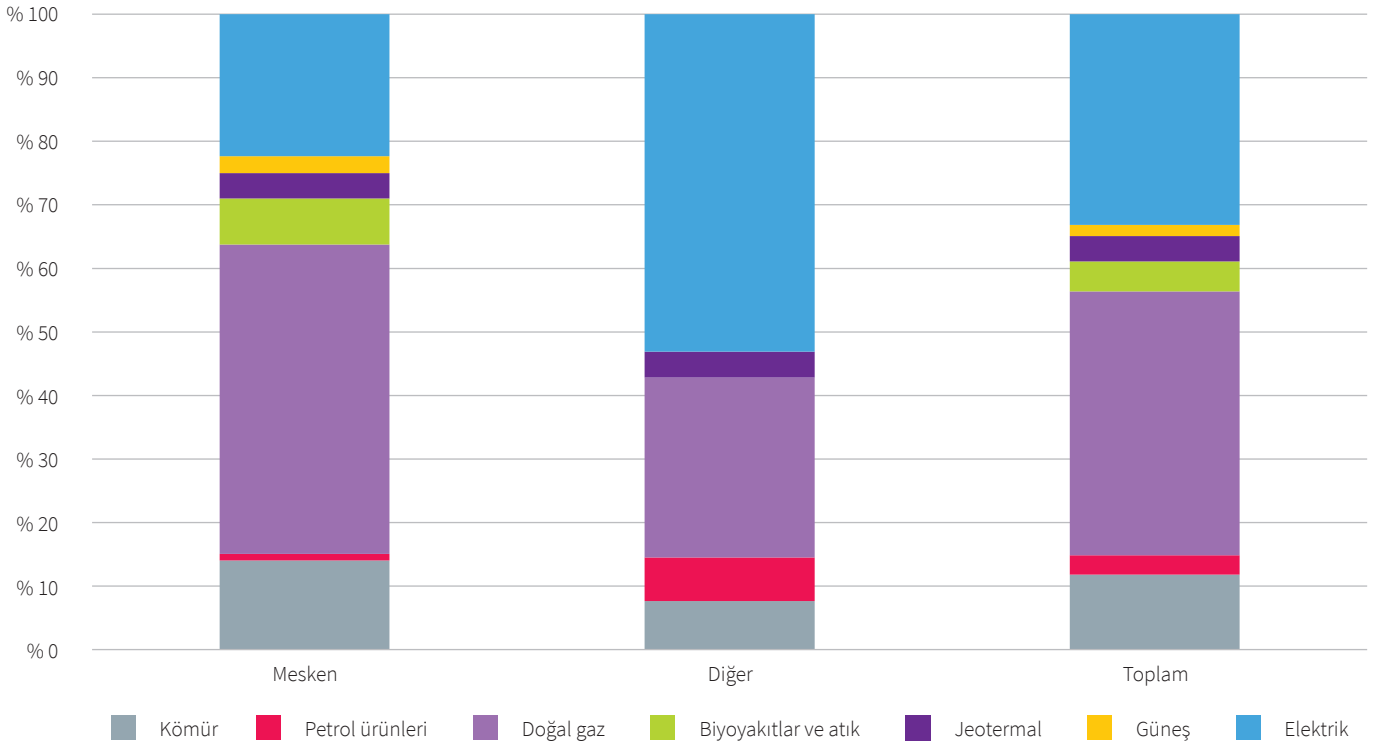
Fosil yakıtlar, 2018 yılında binaların toplam nihai enerji tüketiminin %60’tan biraz daha azını karşılamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğrudan kullanımının payı, toplamın yaklaşık %12’si olmuştur.

Şekil 11’de Türkiye’deki binaların toplam nihai enerji tüketiminin enerji taşıyıcı türüne göre, konut ve ticari/kamusal binalar için ayrı ayrı dökümü sunulmaktadır. Fosil yakıtlar, 2018 yılında binaların toplam nihai enerji tüketiminin %60’tan biraz daha azını karşılamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğrudan kullanımının payı, toplamın yaklaşık %12’si olmuştur.³ Yenilenebilir enerjinin neredeyse tamamı, konutlarda tüketilmektedir. Biyokütle, alan ve su ısıtmada ve kısmen yemek pişirmede kullanılmakta ve yenilenebilir enerjinin toplam doğrudan kullanımının %60’ını oluşturmaktadır. Kalan %40, jeotermal ve güneş ısısından elde edilmektedir. Türkiye, 2018 yıl sonu itibarıyla toplam kurulu kapasitesi 17,6 gigavat (GW) olan güneş enerjili su ısıtıcılarında, dünya liderleri arasında yer almaktadır (Weiss & Spörk-Dür, 2020). Bu kapasitenin çoğu, Türkiye’nin yüksek düzeyde güneş ışınması ile bilinen batı ve güney bölgelerinde kurulmuştur. Soğutma için de termal güneş enerjisi uygulamaları artmaya başlamıştır. İstanbul’da, bir süpermarket binasını soğutmak için toplam 840 kW kapasiteli büyük ölçekli bir güneş soğutma sistemi kurulmuştur.

Bina toplam nihai enerji tüketiminde elektriğin payı yaklaşık %30’dur. Bu pay, ticari ve kamusal binalarda (%44), konutlara (%21) göre daha yüksektir. Ticari ve kamusal binalardaki yüksek elektrik talebinin bir kısmı PV gibi dağıtık sistemlerden karşılanabilmektedir. Ancak, bu tür sistemlerin payı, Türkiye’de kısıtlı bir seviyede kalmaktadır. Günümüzde, Türkiye’nin toplam elektrik talebinin yaklaşık yarısı, çoğunlukla hidroelektrik olmak üzere yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır (2018 yılında üçte biri civarında). Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik tüketiminin payı da hesaba katıldığında, yenilenebilir kaynakların Türkiye bina enerji tüketimindeki payını %10’dan (yenilenebilir enerjinin sadece doğrudan kullanımı) %21 civarına çıkarmaktadır.

³ Bu rakama, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik tüketimi dâhil değildir.

Şekil 11: Türkiye'deki yapıların toplam nihai enerji tüketiminin dağılımı, 2018



Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (n.d.-a)

Doğal gaz, Türkiye'de binalarda en çok kullanılan yakıttır. Türkiye'de hane başına, yılda ortalama 1.000 m³ doğal gaz tüketilmektedir. Türkiye'de gaz arzının neredeyse tamamı ithal edilmektedir. Yerli üretim ise toplam arzın %1'inden azını temsil etmektedir. Binalardaki gaz talebi, büyük ölçüde o yılın hava koşullarıyla ilişkilidir. Örneğin, 2017'nin ilk dört ayında, sıcaklık seviyeleri beklenen ortalamanın altında kalmıştır (yaklaşık 5°C daha düşük). Bu da 2016 yılının aynı dönemine göre toplam gaz talebinde, yaklaşık %14,5'lik bir artışla sonuçlanmıştır. Türkiye'nin farklı iklim özellikleri ve çok çeşitli iklim bölgelerine neden olan sıcak yazlar ve soğuk kışlar göz önüne alındığında, Türkiye'nin doğu bölgelerindeki tüketim, ulusal ortalamanın yaklaşık %50 civarında üzerinde kalmaktadır. Bu sıcaklık farklılıkları, yıllık bina enerji tüketim oranlarını karşılaştırırken çeşitli iklim bölgelerini dikkate alma ve sıcaklıklar açısından mevsimsel aşırılıklara göre ayarlama yapma ihtiyacını vurgulamaktadır.

Binaların doğal gaz talebi, %33'lük pay ile doğal gaz tüketiminde, en büyük paya sahiptir. Türkiye genelinde doğal gaz arzına erişimin artması nedeniyle, bu payın artması muhtemeldir. Aynı zamanda, genel eğilim, doğal gazın yenilenebilir enerji kaynakları ve linyit gibi yerli enerji kaynaklarıyla değiştirilmesi olduğu için doğal gazın elektrik üretimindeki payı da azalmaktadır. 2019 yılı sonu itibarıyla, Türkiye'de 53 milyondan fazla kişi aktif olarak doğal gaz kullanmaktadır. Türkiye'nin toplam doğal gaz talebinde, ısınma amaçlı doğal gaz kullanım payı, elektrik üretimi için kullanılması pahasına hızla artmaktadır (Saygın & Şanlı, 2020).

Kömür de Türkiye'de yaygın olarak kullanılmaktadır. 2015 yılı sonu itibarıyla ısınma için 8,2 milyon ton eşdeğer kömür (Mtek) tüketilmiştir. Bu rakamın üçte ikisi, ticari ve kamu hizmeti binalarının ısınma talebini karşılamak için kullanılmış ve ağırlıklı olarak %95'ten fazlası ithal edilen taş kömüründen elde edilmiştir. Kalan üçte biri, konut sektöründe taş kömürü veya linyit şeklinde kullanılmıştır. 2015 yılında, Türkiye'de arz

edilen toplam 70 milyon ton (Mt) linyitin %5'i, yapılardaki ısınma talebini karşılamak için kullanılmıştır. Geri kalanı ise enerji santralleri tarafından ve endüstriyel ısıtma için kullanılmıştır. Linyit, taş kömüründen iki ila üç kat daha düşük kalorifik değere sahiptir ve üretilen kWh enerji başına önemli ölçüde daha yüksek CO₂ emisyonu ve hava kirlenici madde üretir. Ne var ki linyit genelde yerel olarak çıkarıldığı ve Türkiye'nin tüm coğrafyasında mevcut olduğu için daha ucuzdur. Taş kömürünün ısıl değeri, linyite göre daha yüksektir ve yanması enerji açısından daha verimlidir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi & Buildings Performance Institute Europe, 2019). Petrolün Türkiye'deki binaları toplam enerji arzındaki payı, buna kıyasla çok daha düşük olup genel rakamın yalnızca %3'ünü oluşturmaktadır. Günümüzde, doğal gaz şebekelerine bağlantı gibi başka alternatiflerin olmadığı yerlerde, nadiren ısıtma ve pişirme yakıtı olarak kullanılmaktadır.

2.4. Karbonsuzlaşması zor olan sektörler

2020'de rüzgâr ve güneş payı, %15 civarında gerçekleşmiştir.

Türkiye, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji gibi yerli yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça zengin bir ülkedir. Su kaynakları, büyük ölçüde elektrik sektörü tarafından kullanılmaktadır. Biyokütle ve atık potansiyeli henüz sadece kısıtlı oranda kullanılmakla birlikte, potansiyelleri Türkiye'nin toplam enerji talebine kıyasla küçüktür. Şimdiye kadar elektrik sektörü, yerli kaynak payını artırmak ve ithalata bağımlılığı azaltmak amacıyla Türkiye'nin yenilenebilir enerji stratejilerinin merkezinde yer almıştır. Son yıllarda, hidroelektrik (büyük hidroelektrik santralleri de dâhil) sayesinde, Türkiye'nin toplam elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji payı, yaklaşık yarı seviyeye kadar çıkmıştır. 2019, olağan dışı seviyede yağmurlu geçen bir yıl olmuştur. Düşük elektrik talebi ile birleştiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı, toplam üretimin yaklaşık %44'ünü oluşturmuş ve bu pay, 2020'nin ilk yarısında %50'nin üzerine çıkmıştır. 2019'un sonunda, hidroelektrik, tüm enerji üretiminin %30'unu oluşturmuş ve onu çeşitli rüzgâr ve güneş kaynaklarından oluşan %10 ve jeotermal ve biyogazdan oluşan %4'lük pay izlemiştir. 2020'de rüzgâr ve güneş payı, %15 civarında gerçekleşmiştir.

Diğer bir yerli kaynak ise ülkenin hemen hemen tamamına yayılmış durumdaki linyittir. Türkiye linyitinin ısıl değeri, kg başına 1000 kilokalori (kcal) ile 4200 kcal arasında değişmesine karşın, kaynakların çoğunun enerji kalitesi, bu aralığın alt ucuna daha yakındır. Örneğin, nispeten düşük kaliteye sahip olan Hindistan'ın linyit kaynakları, bu kaynakların iki katı kadar ısıl değere sahiptir. Böyle bir linyit kalitesiyle çalışan santraller verimsiz kalmaktadır (%30 ile %35 arası verimlilik) ve kömür tedariki için büyük lojistik altyapıya gereksinim duymaktadırlar. Türkiye, mevcut linyit kullanımını ikame edecek yeterli taş kömürü rezervine sahip olsaydı aynı miktarda enerjiyi tedarik edebilmek için üç kat daha az karayolu taşımacılığına ihtiyaç duyacaktı. Ayrıca, linyitle çalışan elektrik santralleri, daha küçük yenilenebilir enerji santrallerinin aksine önemli yatırımlar gerektirmektedir. Türkiye, 2020 yılı sonuna kadar 405 milyar m³'ten fazla potansiyele sahip doğal gaz rezervlerinin keşfedildiğini duyurmuştur. Bu, Türkiye'nin mevcut kanıtlanmış doğal gaz rezervlerinin yaklaşık 100 katıdır. Mevcut plan, bu gazı 2023 yılına kadar son kullanıcılara ulaştırmaktır (Saygın & Şanlı, 2020).

Hâlihazırda Türkiye'nin elektrik sistemi, aşırı arz kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum, yatırımcıların enerji talebindeki hızlı büyümenin süreceğini varsaydığı, liberalleşme dönemindeki önemli doğal gaz kapasitesi yatırımları ve elektrik fiyatlarında beklenen ölçüde gerçekleşmeyen artışın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Bu etki, doğal gaz ve ithal kömüre dayalı çalışan bazı santrallerin

üretim sepetinden çıkarıldığı COVID-19 salgını döneminde, daha da belirgin hâle gelmiştir. Sınırlı finansman ve borç yapısının mevcut durumunda, büyük ölçekli kömür santrallerine yatırım yapmak oldukça zorlaşmıştır. Bu durum, Paris İklim Anlaşması'nın beşinci yılı olan 2020'de, uluslararası iklim değişikliğini önleme müzakerelerinin ülkeler tarafından eşi görülmemiş bir ilgi görmesiyle, bu tür yatırımlara borç vermeyi reddeden küresel finansör sayısının artmasıyla daha da belirgin hâle gelmiştir. Tüm bunlar, Türkiye'nin enerji stratejisinde, artan elektrik talebine, acil ve uygun fiyatlı bir çözüm sağlama konusunda cevap bekleyen önemli bir soruya işaret etmektedir. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından yapılan 2018 tarihli bir çalışma, Türkiye'nin iletim şebekesinin, herhangi bir ek şebeke yatırımı ve sistem işletimiyle ilgili ilave esnekliğe gerek olmadan, mevcut payın neredeyse iki katı olan %20'ye kadar rüzgâr ve güneşi barındırabileceğini göstermektedir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2020b). %30 gibi daha yüksek bir pay mümkündür, ancak bu, depolama ve talep tarafı katılımı gibi esneklik önlemlerinin uygulanmasını gerektirecektir. Türkiye'nin sistem esnekliğini geliştirme stratejisi, batarya depolama teknolojilerinin yerli üretimine odaklanmaktadır. Talep tarafı katılımı ve pompajlı hidroelektrik enerji politikası birkaç yıldır gündeminde yer almaktadır.

Elektrik sektörü ile karşılaştırıldığında, yenilenebilir enerji kullanımı, enerjiyi son tüketen sektörlerde büyük ölçüde kısıtlı kalmıştır.

Elektrik sektörü ile karşılaştırıldığında, yenilenebilir enerji kullanımı, enerjiyi son tüketen sektörlerde büyük ölçüde kısıtlı kalmıştır (Saygın & Şanlı, 2020):

- İmalat sanayisinin toplam nihai tüketiminin yalnızca %2'lik bir payı, yenilenebilir kaynaklardan gelmektedir. Sanayi sektörü, değişen proses ısısı sıcaklıklarında (sıcak su üretimi için düşük sıcaklıktaki proses ısısından çelik, çimento veya seramik üretimi için 1000°C'nin üzerinde seyreden sıcaklıklara kadar) ve buhar basınçlarında çalışan entegre üretim süreçlere sahip karmaşık bir sektördür. Yıllara dayanan işletim deneyimi, üretim süreçlerinin malzeme ve enerji akışlarının optimize ve entegre edilmesine yardımcı olarak üretim proseslerinin verimliliklerini oldukça artırmıştır. Tüm bu unsurlar, biyokütlenin kullanılabilirliği yüksek sıcaklık prosesler (400°C ve üzeri) istisna olmak üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının yalnızca düşük ve orta sıcaklıkta (250°C'den az) buhar sağlayabildiklerinden ve yeni tesis yatırımlarının dışında kalan mevcut tesislerin geleneksel proseslerine entegrasyonları için pahalı proses değişikliklerine gerek olduğundan, dönüşümü zorlayıcı hâle getirmektedir. Yenilenebilir enerji, henüz sanayide diğer enerji sektörlerinde gördüğü ile aynı ilgiyi görmemesine ve karşılaştığı güçlüklerle rağmen, toplam küresel endüstriyel fosil enerji ve ham madde kullanımının dörtte birini biyokütle ile ikame etmek ve güneş ısısı enerjisi ile daha da yüksek paylara ulaşmak teknik ve ekonomik olarak mümkündür. Günümüzde, güneş enerjili su ısıtıcıları ile düşük sıcaklıklı proses ısısı üretimi veya düşük maliyetli biyokütle artıklarından buhar üretimi gibi yalnızca belirli yenilenebilir enerji uygulamaları maliyet açısından etkindir. Süt ürünleri sanayi gibi bazı gıda üretimi alt sektörleri ve tekstil işleme endüstrileri, bu teknolojilerin uygulanabileceği tipik sektörler olarak ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojileri, proses ısısı üretimi için uygun maliyetli alternatifler ve kimyasal ve plastik üretimi için yenilenebilir bir karbon kaynağı sağlayabilir.
- Yukarıda belirtildiği gibi, ulaştırma, ağırlıklı olarak geleneksel içten yanmalı motorlarda kullanılan petrol ürünlerine dayanmaktadır. Ulaştırma sektöründe, en öncelikli alternatif sunan teknoloji çözümü elektrikli araçlardır. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından yürütülen 2019 tarihli bir araştırma, Türkiye'nin 2030 yılındaki toplam binek araç stokunun %10'unun dağıtım şebekesi üzerinde

Dönüşümü zor olan sektörler, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin %60'tan fazlasını ve ülkenin enerji ve prosesle ilgili CO₂ emisyonlarının yaklaşık %43'ünü temsil etmektedir.

herhangi önemli bir etkisi olmaksızın elektrikli araçlara dönüştürebileceğini göstermektedir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2019b). Bununla birlikte, hızla büyümekte olan karayoluyla yük taşımacılığı ve karayolu taşımacılığı dışındaki ulaştırma biçimlerindeki alternatif teknolojiler, ancak sınırlı bir seviyede ticarileşmiş ve pahalı oldukları için düşük karbonlu çözümlerin sınırlı olarak uygulandığı alanlardır.

- Binaların enerji talebini dönüştürmede, enerji verimliliği birinci rolü oynayacaktır. Binalarda enerji tasarrufu sağlanırken aynı konfor hizmetini sağlamaya yardımcı olabilecek çok sayıda düşük maliyetli teknoloji, sınırlı ilave yatırımlarla tüketici tarafında enerji talebini yönetme seçenekleriyle birlikte mevcuttur. Buna ek olarak, düşük sıcaklıklı alan ve su ısıtması, güneş ısı, jeotermal ve ısı pompaları (ihtiyaç duyulan elektriğin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması şartıyla) dâhil olmak üzere farklı yenilenebilir enerji teknolojileri ile sağlanabilir. Ancak, doğal gaz hâlâ Türkiye'deki binaların enerji talebinin çoğunluğunu temsil etmektedir. Altyapı, iletim ve dağıtım seviyesinde, Türkiye'de doğal gaz tedarikinin yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamakla birlikte, bunun ikamesi için hazırda bir çözüm yoktur. Doğal gaz sistemlerine, biyometan ve biyogaz enjeksiyonu ticari alternatiflerdir, ancak Türkiye'nin biyokütle kaynak potansiyeli nispeten sınırlıdır.

Bu durum ışığında, çok sayıda sektör düşük karbonlu teknoloji seçenekleriyle tam bir dönüşüm için engellerle karşılaşmaktadır. Tablo 2, bu sektörlerin toplam enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının bir özetini sunmaktadır. Bunlar, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin %60'tan fazlasını ve ülkenin enerji ve prosesle ilgili CO₂ emisyonlarının yaklaşık %43'ünü temsil etmektedir.

Tablo 2: Dönüşümü zor sektörler ve bunların Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarına katkıları, 2018

	Toplam nihai enerji tüketimi (Mtep/yıl)	Toplam CO ₂ emisyonları (Mt CO ₂ /yıl)
Demir çelik	5,2	19,1
Kimya ve petrokimya	1,7	4,3
Plastik	2,0	6,3
Çimento	6,4	21,3
Karayolu taşımacılığı	7,3	23,6
Havacılık	1,2	4,0
Denizcilik	0,4	1,3
Doğal gaz sektörü	41,2	96,5
Elektrik	15,0	35,2
Isıtma	25	59,1
Boru hatları	0,3	0,7
Sektörlerin toplamı	~65	~176
Toplam	108	419

2.5. Yeşil hidrojen için fırsatlar

Türkiye genelinde enerjiyi son tüketen bütün sektörler için optimum bir dönüşüm stratejisi belirlemek zor olacaktır. Bu nedenle, bu sektörlerin her birinin ortak yönlerini ve bireysel özelliklerini anlamak önemlidir. Bu alanlar için ortaya çıkan ortak bir çözüm, yeşil hidrojenidir.

DRI gibi hidrojene dayalı yeni süreçler ortaya çıkabilir ve bunlar, yeşil çelik üretimi için Türkiye'deki elektrik ark ocağı hatları ile entegre edilebilir. Yeşil hidrojenen üretilebilecek metan/metanol ve nafta gibi sentetik yakıtlar kimyasallar ve plastik üretimi için ham madde olarak da kullanılabilir.

Türkiye genelinde enerjiyi son tüketen bütün sektörler için optimum bir dönüşüm stratejisi belirlemek zor olacaktır. Bu nedenle, bu sektörlerin her birinin ortak yönlerini ve bireysel özelliklerini anlamak önemlidir. Bu alanlar için ortaya çıkan ortak bir çözüm, yeşil hidrojenidir.

Son yıllarda, imalat sanayisini dönüştürmek için dikkat çeken bir strateji, mevcut proses ısılarının yenilenebilir elektrik üretimine dayanan elektrifikasyon alternatifleriyle dönüştürülmesidir. Yenilenebilir elektrik, fosil yakıtların yerine kullanılacak hidrojen üretmek için de kullanılabilir. DRI gibi hidrojene dayalı yeni süreçler ortaya çıkabilir ve bunlar, yeşil çelik üretimi için Türkiye'deki elektrik ark ocağı hatları ile entegre edilebilir. Yeşil hidrojenen üretilebilecek metan/metanol ve nafta gibi sentetik yakıtlar kimyasallar ve plastik üretimi için ham madde olarak da kullanılabilir. Aynı şekilde, yeşil hidrojen, kamyonlar için dizel kullanımına ve mevcut doğal gaz altyapısını korurken doğal gaz ile karıştırılarak fosil yakıtlara uygun bir alternatif sağlar. Bundan sonraki bölümlerde yeşil hidrojenin farklı sektörler için sunduğu fırsatlar özetlenmektedir.

Üretim sanayi için proses ısı üretimi

Üretim tesislerinin çeşitli süreçleri ve mevcut tesislerin yüksek entegrasyonu, karbonsuzlaşmayı zorlaştırmaktadır. Bunun altında yatan ana nedenler, özellikle proses ısı ile ilgili farklı gereksinimlerin olması, alternatiflerin uygulanması için gerekli olan ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve biyoyakıt gibi düşük karbonlu alternatiflerin yerel kaynakların olup olmamasıyla ilgili olması olarak ön plana çıkmaktadır. Proses ısısının üretimi için hâlâ yüksek oranda fosil yakıtlara bağımlılık vardır ve özellikle yüksek sıcaklıklı uygulamalar, kömür ve doğal gaza dayanmaktadır. Ayrıca kimyasal ve plastiklerin üretimi için gerekli olan ham maddeler de fosil yakıt kaynaklarından tedarik edilmektedir.

Örneğin, demir cevherinden demir üretme amaçlı yüksek fırınlardaki redüksiyon işleminin yanı sıra, yakıt ihtiyacının karşılanması için de kömüre ihtiyaç vardır. Özellikle demir-çelik sanayinde hidrojen, yakıt ve ham madde olarak kömürün yerini alabilir. Doğal gaz, daha çok amonyak imalatı için sentez gazı (yani hidrojen üretimi) üretme amaçlı buhar-metan prosesi için ham madde olarak hâlâ kullanılmaktadır. Alüminyum ve diğer demir harici metaller, elektrik ark ocakları için büyük miktarda elektrik ve yaklaşık 1.600°C sıcaklık gerektirir. Çimento endüstrisi, 1.450°C'ye kadar sıcaklıklara ihtiyaç duyarken, kâğıt hamuru üretimi sülfat prosesi için 170°C sıcaklığa ihtiyaç duyar.

Proses ısı için düşük karbonlu alternatifler belirlenmeli ve çeşitli sanayi proseslerinde uygulanmalıdır. Bu alternatifler, her endüstriyel sektörün proses ısı seviyesi ve ısı talepleriyle ilgilidir. Üretimleri değişken karaktere sahip güneş gibi bazı yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, endüstrideki proses ısılarının sıcaklık seviyeleri ve üretim proseslerinin kapasite faktörleri ile sınırlıdır. Bazı düşük karbonlu seçenekler mevcuttur, ancak bunların hiçbiri henüz yeterli seviyede kullanılmamaktadır. Proses ısı için düşük karbonlu seçenekler, hidrojen, biyokütle (ve biyoyakıtlar), elektrifikasyon, karbon yakalama, kullanma ve depolama, güneş ısı ve bazı durumlarda gelişmiş nükleer termaldir.

Sektör için daha önce yapılmış analizler, sanayide enerji verimliliği iyileştirmelerinin günümüzdeki seviyeye kıyasla %25'e varan enerji tasarrufu ve CO₂ emisyonlarında

benzer ölçekte azalma sağlayabileceğini göstermiştir. Enerji verimliliğini artırmak önceliklidir ve 2020'den sonra tüm yeni endüstriyel tesislerin düşük karbonlu hâle getirilmesinin merkezinde yer alacaktır. Buna rağmen enerji verimliliği iyileştirmeleri, uzun süredir devam eden yılda ortalama %1 civarındaki tasarruf oranlarının ötesine geçememiştir.

Yenilenebilir kaynaklar ve enerji verimliliği, sanayiden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına önemli katkı sağlayabilecekken bu teknolojilerin sunduğu toplam potansiyel sektörü tamamen karbondan arındırmak için yeterli değildir. CO₂ yakalama ve depolaması ve kullanımı, demir, amonyak, çimento klinkeri ve etilen oksit üretimi için mevcut durumda doğrudan kullanılabilir. Özellikle çimento klinkeri üretimi gibi yüksek proses emisyonlarına sahip endüstriler için bu seçenek, önemli bir rol oynayabilir. Tüm endüstriyel CO₂ emisyonları, karbon yakalama teknolojileri ile üçte birine varan oranda azaltılabilir. Bununla birlikte karbon yakalama teknolojisinin kendi prosesleri ek enerjiye ihtiyaç duyduklarından, enerji verimliliğini iyileştirmekten kaynaklanan enerji tasarruflarını azaltmaktadır.

Düşük karbonlu proses ısı teknolojilerinin uygulanması büyük ölçüde endüstri tesisinin kurulu olduğu alanın büyüklüğüne, enerji talebine ve mevcut bölgesel altyapıya bağlıdır. Dahası, yenilenebilir ısı kaynaklarının uygulanabilirliği, genellikle coğrafi konuma bağlıdır. Bu özellikle güneş enerjisinden tedarik edilen ısı ve jeotermal kaynaklar için geçerlidir. Hangi düşük karbon teknolojisinin uygulanabilir olduğu, sadece sanayinin sahip olduğu karakteristiklere bağlı değildir; aynı zamanda endüstriyel tesislerin kendisine de (örneğin, ekipman yaşı) bağlıdır. Bu nedenle, hangi teknolojinin en iyisi olabileceğini söylemek genelde zordur. Ayrıca, karbonsuzlaşma, mevcut tesislerde maliyetli olabilecek modifikasyonlar gerektirecektir. Demir çelik endüstrisi gibi bazı sanayi tesisleri son derece entegredir, bu da proses ısını tedarik eden sistemlerdeki değişikliklerin tesisdeki tüm prosesleri etkilediği anlamına gelir. Bu endüstrilerde, atık ısı ve atık malzeme çoğu zaman ya tesis içerisinde kullanılır veya başka sanayilere satılır.

Farklı sanayi sektörleri incelendiğinde, birçok ortak özelliğe sahip olduğu göze çarpmaktadır: üretimde tüketilen enerjisi yoğun sanayiler demir, seramik, çimento gibi temel malzemelerin üretiminden sorumludurlar, yüksek sıcaklıklı proses ısısına ihtiyaç duyarlar ve sayıca çok fazla olmayan tesis tarafından temsil edilirler (Türkiye'de yaklaşık kırk elektrik ark ocağı, benzer sayıda çimento fırını, üç entegre çelik fabrikası, 10'dan az rafineri ve büyük ölçekli birkaç kimyasal üretim tesisi). Çelik üretimi, büyük ölçüde geleneksel elektrik ark ocağı teknolojisi ile elektrikle çalışmaktadırlar. Çimento fabrikaları, esas olarak yeni ve verimli üretim teknolojilerini kullanmaktadırlar, ancak çimentonun öğütülmesi hâlâ yoğun elektrik kullanımı gerektirir. Türkiye'nin kimya ve petrokimya endüstrisi, faaliyet hâlindeki tek bir steam cracker ile oldukça küçük olmasına karşın, çok sayıda gübre üretim ve ara mamulleri plastiğe dönüştürme faaliyeti, üretim tesisi başına daha az enerji kullanan daha küçük tesislerle ülke geneline dağılmıştır (Saygın, 2012).

Yeşil hidrojen, sanayi sektörünün ihtiyaç duyduğu karbonsuzlaşma sorununun çözülmesine önemli katkıda bulunabilir. Yenilenebilir elektriğin depolanmasına yardımcı olabilir ve sonrasında yüksek kapasite kullanımına ihtiyaç duyan üretim tesislerinin enerji ihtiyacını karşılayabilir. Dahası hidrojen, farklı sanayi proseslerin ihtiyaç duyduğu tüm sıcaklık seviyelerini karşılayabilir. Hidrojene dayalı yanma teknolojileri, mevcut sanayi altyapısına sonradan eklenebilir. Bununla birlikte,

yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen, altyapı ve üretim için yüksek yatırım maliyeti gerektirmektedir. Hidrojen üretimi için gerekli elektrik talebi ve bu hidrojen üretiminin verimliliğinin artırılması, çözülmesi gereken sorunlar arasındadır. Yine de elektrolizden elde edilen yeşil hidrojen, yenilenebilir kaynaklardan doğrudan elektrifikasyona göre 1,4 kat daha fazla elektrik gerektirir. Ayrıca, yeşil hidrojen tedariki, sadece hidrojenin üretimi için gerekli olacak elektrik üretim kurulu gücünün yatırımını da gerektirecektir.

Ulaştırma

Dizelle çalışan ve uzun mesafelerde yük taşıyan karayolu taşımacılığı için kullanılan içten yanmalı kamyonların motorlarının ihtiyaç duyduğu güç, büyük olmakla birlikte, bu araçlar genellikle binek araçlara kıyasla çok daha az verimlidirler. Elektrikli araç teknolojilerinin mevcut gelişimi, yük taşımacılığını elektrifikasyon yoluyla dönüştürmek için kısıtlı fırsat sunmaktadır. Böyle bir donuşum için gerekli olan teknolojiler, maliyetlidir ve şarj için önemli bir altyapıya ihtiyaç duymaktadırlar.

Yük taşımacılığının karbonsuzlaşması için bataryalı elektrikli araçlar ve yakıt hücreli elektrikli kamyonlar, çözümün bir parçası olabilirler.

Yük taşımacılığının karbonsuzlaşması için bataryalı elektrikli araçlar ve yakıt hücreli elektrikli kamyonlar, çözümün bir parçası olabilirler. Fakat bunun gerçekleşmesi binek araçların elektrifikasyonundan farklı olarak, navlun yükü, uzun mesafe seyahat sıklığı, şarj/yakıt ikmali süresi ve toplam araç kullanım maliyeti gibi faktörlere bağlıdır. Kamyonla yük taşımacılığı hem biyoyakıt hem de e-yakıt alternatiflerinin kullanımına odaklanmıştır. Ne yazık ki her iki alternatif de karbon açısından nötr çözümler sunabilecekken, bunların geliştirilmesi ve kullanımı farklı zorluklardan dolayı kısıtlı kalmaktadır.

Çok sayıda bataryalı elektrikli araç (*battery electric vehicles*, BEV) hâlihazırda mevcut veya gelişme aşamasında olmasına rağmen, yakıt hücreli elektrikli araçlar (*fuel cell electric vehicles*, FCEV) mevcut eğilimde hâlâ niş bir varlığa sahiptirler. Ancak, Toyota, Hyundai, Daimler, Nikola Motors ve diğer birçok otomotiv üreticisi, yakıt hücreli elektrikli kamyonlar (*fuel cell electric truck*, FCET) üzerinde çalışmaktadırlar fakat FCET hala gelişme aşamasında olup, henüz piyasada tam yerini bulamamıştır. Nikola Motors, altı elektrikli çekiş motoruna ve toplam 750 kW güce sahip Nikola One adlı sekizinci sınıf bir kamyon modelini duyurmuştur. Güç kaynağı olarak 320 kWh'lik bir batarya ve 300 kW'lık bir yakıt hücresine sahiptir. Yakıt hücresinin, 100 kg hidrojen kapasiteli tanklardan 100 kilometrede (km) 4,6 kg hidrojen tüketmesi, bunun da 1.900 km'ye kadar menzile sağlanması beklenmektedir. Ayrıca, Streetscooter, DHL ile iş birliği içinde, 4,2 ton brüt ağırlığı ve 800 kg kapasiteli bir teslimat kamyonu üzerinde çalışmaktadır. Toyota ve Kenworth, bir ortak girişim bünyesinde, her biri 114 kW gücünde iki Toyota Mirai yakıt hücresine sahip Kenworth T680 tabanlı bir kamyon geliştirmektedir. Bu kamyonların teknik özellikleri, Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3: Duyurulan yakıt hücreli elektrikli kamyonların teknik özellikleri

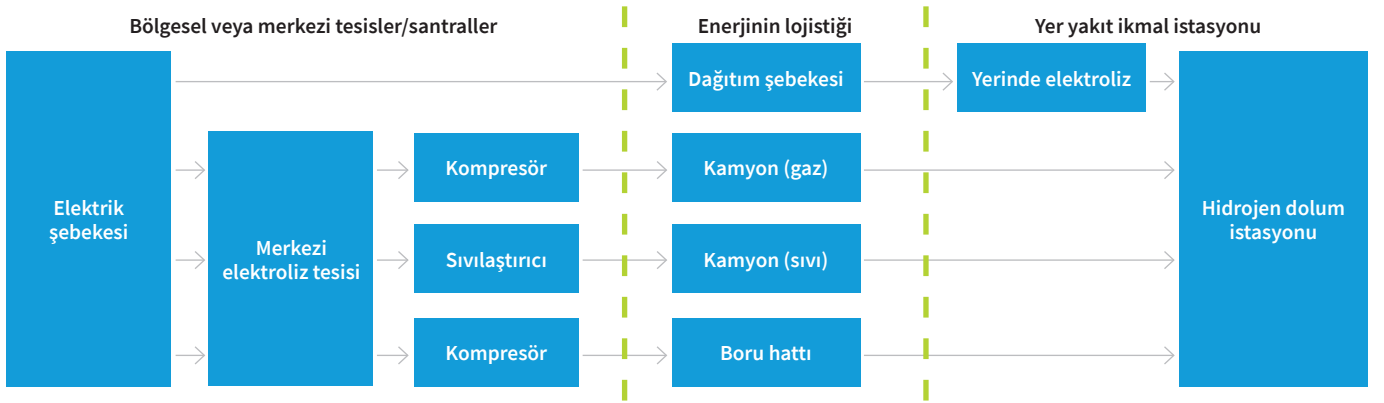
Üretici	Ticari adı	Motor gücü (kW)	Maksimum ağırlık (t)	Batarya kapasitesi (kWh)	Menzil (km)	Enerji tüketimi (kg H ₂ /km)	Yakıt Hücresi (kW)
Nikola Motors	One	750	36	320	1900	4,6	300
Streetscooter	H ₂ Panel van	122	4,2	40	500	1,2	26
Toyota/Kenworth	Beta (T680)	492	36	12	480	-	228

Kaynak: Boenninghausen (2019), Nikola Motors (2019), O'Dell (2018)

Batarya elektrikli kamyonlar şarj istasyonları ve elektrik şebekesinde yatırımlara ihtiyaç duyarken, FCET tipi araçlar ise yakıt istasyonları ve hidrojen altyapısı gerektirir.

Şekil 12, elektrolize dayalı yakıt istasyonları için hidrojen dağıtım ve nakliye yollarını göstermektedir. Hidrojen, merkezi bir elektroliz tesisinin yanı sıra, merkezi olmayan dağıtık bir şekilde de üretilir. Bir yanda, merkezi olarak üretilen hidrojen, kamyonla (gaz hâlinde veya sıvılaştırılmış) veya boru hattı aracılığıyla yakıt istasyonuna taşınabilir. Diğer yanda, hidrojen, dağıtık şekilde üretilir ve sonrasında tanklarda saklanabilir. Bu seçenek, kamyon veya boru hattı dağıtım ağına ihtiyaç duymaz, bu da altyapı maliyetlerini azaltır ve uzak bölgelerde kapsama alanı sağlar. Altyapıya olan ihtiyaç, elektrikli kamyonlara geçişin darboğazını oluşturmaktadır. Batarya elektrikli kamyonlar şarj istasyonları ve elektrik şebekesinde yatırımlara ihtiyaç duyarken, FCET tipi araçlar ise yakıt istasyonları ve hidrojen altyapısı gerektirir.

Şekil 12: Hidrojen lojistik ve dağıtım seçenekleri



Mevcut doğal gaz şebekelerine hidrojen ekleme, binalarda ısı üretimi için hidrojenin doğrudan kullanımı ve yerel bölgesel ısıtma şebekeleri için dolaylı kullanım fırsatı sunmaktadır.

Binalar

Isıtma ve soğutmanın elektrifikasyonu ve pasif evler, binaların karbonsuzlaşmasına yönelik bilinen en etkin düşük karbonlu teknoloji çözümlerdir. Fakat kentleşme ve yapı stoku gelişiminin mevcut hızında, bunların sunduğu potansiyel sınırlı kalmaktadır; zira karbonsuzlaşma için gereken düşük enerji talebini elde etmek için mevcut yapı stokunun büyük bir kısmının yenilenmesi gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan mevcut doğal gaz şebekesine, entegre edilebilecek çözümlere ihtiyaç vardır.

Mevcut doğal gaz şebekelerine hidrojen ekleme, binalarda ısı üretimi için hidrojenin doğrudan kullanımı ve yerel bölgesel ısıtma şebekeleri için dolaylı kullanım fırsatı sunmaktadır. Şekil 13 'de gösterildiği gibi yeşil hidrojen, doğal gaz şebekesine entegre edilmesi, sentetik metan üretimi ve yenilenebilir kaynaklardan saf hidrojen üretimi yoluyla karbonsuzlaşmaya katkıda bulunma potansiyeline sahiptir.

Binalarda yakıt hücreleri veya hidrojen kazanları aracılığıyla doğrudan hidrojen kullanımı, büyük ticari yapılar veya bina kompleksleri ve bölge enerji ağlarında elektrifikasyon şeklinde uygulanabilir. Hidrojen fiyatı ve teknoloji maliyetleri, konut sektöründe hidrojen pazarını genişletmek için kritik faktörlerdir ve her ikisi de şu anda tüketiciler için son derece yüksektir. 2018 sonu itibarıyla, dünya genelinde, yalnızca 225.000 adet yakıt hücreli ev ısıtma sistemi satılmıştır (Staffell et al., 2019).

Şekil 13: Yapıların ısı tedariki için hidrojen kullanmanın potansiyel yolları

Strateji	Avantajlar	Gereksinimler	Örnekler
Karıştırma	Çoğu mevcut gaz altyapısı ve ekipmanlarının ile uyumlu düşük maliyetli çözüm	Çoğu durumda bükülme oranları %5-20 civarındadır. CO ₂ emisyonlarını daha da azaltmak için ek verimlilik önlemleri.	Fransa'da GRHYD projesi (2017). Birleşik Krallık'ta HyDeploy (2019).
Temiz hidrojenden üretilen metan	Düşük karbonlu hidrojen ve düşük karbonlu CO ₂ girdileri varsa, gazın tamamen karbondan arındırılması. Mevcut gaz şebekesi ve ekipmanlarının kullanılması	Metanasyon tesislerine yatırım. Metanasyon verimliliğini artırmak için Ar-Ge. CO ₂ gibi bir karbon karnağı.	STORE & GO (2016) Katalitik ve biyolojik metanasyon odaklı Avrupa projesi (200 kW ile 1 MW arası ispat projeleri)
%100 hidrojen	Düşük karbonlu hidrojen olduğunda, gazın tamamen karbondan arındırılması. Sentetik metandan daha düşük verimlilik kayıpları	Gaz şebekesini ve ekipmanını geliştirmek için yatırım. Çeşitli ağların bir arada bulunması halinde, gaz tedarikçileri ve dağıtıcıları arasındaki koordinasyon	Birleşik Krallık'taki H21 Leeds City Gate (>2025) ve H21 Network Innovation Competition (NIC-2018) projeleri
Yakıt hücrelerinin kullanımı ve kojenerasyon	Çoklu enerji hizmetleri (örn. ısı ve elektrik). Talep tarafı katılım potansiyeli	Yakıt hücresi veya kojenerasyon teknolojisine yatırım. Ekipmanın verimliliğini artırmak için Ar-Ge	Japonya'da ENE-FARM programı (2009)*. Almanya'da Enerji Verimliliği Teşvik Programı (2016)**

* Mevcut ENE-FARM tesisleri doğal gaz veya sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışıyor ve temelde maliyet düşürmeyi hedefliyor.

** Program binalardaki yakıt hücresi uygulamalarını içeriyor.

Kaynak: IEA (2019)

Doğal gaz şebekesine hidrojen karışımının sağlanması, karbonsuzlaşma için tek başına bir çözüm olmamakla birlikte bu süreç içerisinde önemli bir ara önlemdir.

Türkiye'de yapılan son yanma testleri, gaz şebekesine %5 oranında hidrojen enjeksiyonunun başarılı olduğunu göstermiştir.

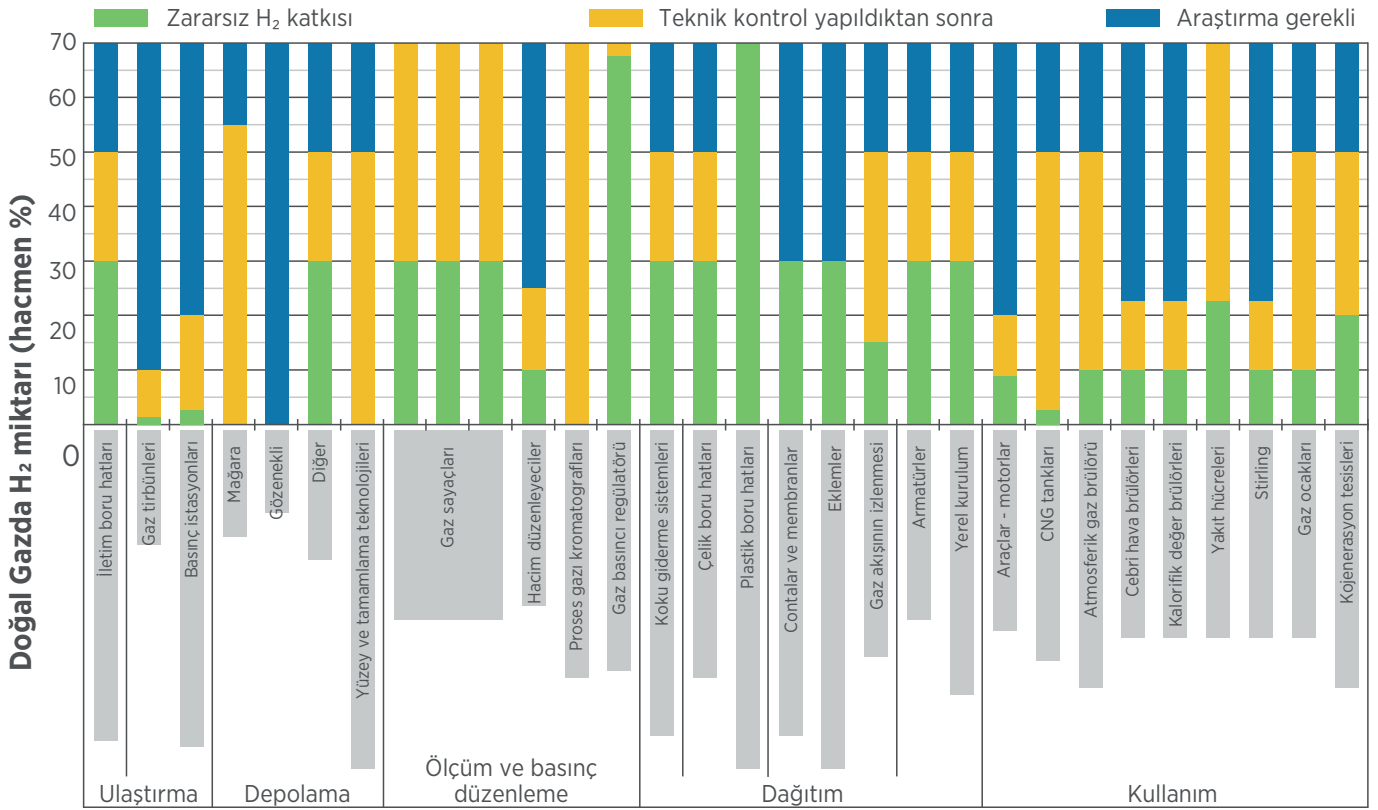
Doğal gaz şebekelerine hidrojen eklenmesi

Doğal gaz şebekesine hidrojen karışımının sağlanması, karbonsuzlaşma için tek başına bir çözüm olmamakla birlikte bu süreç içerisinde önemli bir ara önlemdir. Hidrojen karışım oranı, ülkeden ülkeye önemli ölçüde değişmektedir. Bazı ülkeler, %50'ye varan oranda seviyelere ulaşmışlardır. Binalarda, hidrojen, mevcut doğal gaz şebekelerine düşük oranlarda karıştırılabilir. Kullanım açısından en büyük potansiyel ise özellikle yoğun nüfuslu şehirlerde çok aileli ve ticari binaların olduğu bölgelerdir. Çoğu gelişmiş ülke kapsamlı doğal gaz şebekesine sahip olmakla birlikte, tüketilmiş petrol ve doğal gaz alanlarına sahip olanların önemli miktarda doğal gaz yeraltı depoları ve bazılarında ise depolama için kullanabilecek tuz mağaraları vardır. Bu, özellikle yerli doğal gaz kullanımının artmasını destekleme yönünde önemli bir strateji olabilir (Saygın & Şanlı, 2020). Türkiye'de yapılan son yanma testleri, gaz şebekesine %5 oranında hidrojen enjeksiyonunun başarılı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte doğal gaz şebekesindeki hidrojen payı arttıkça, teknik olarak bazı sınırlamalarla karşılaşılmaktadır. Optimum karışım seviyesi, mevcut şebekenin özelliklerine, doğal gaz bileşimine ve nihai kullanım uygulamalarına bağlıdır. Nispeten düşük hidrojen karışım oranlarında (hacmen %10'dan %20'ye kadar), altyapıda büyük yatırım veya değişiklik gerekmeden güvenli bir şekilde yapılabilir. Buna Avrupa'da kanıt olabilecek birçok örnek vardır (GAZBİR-GAZMER Uluslararası İlişkiler Komisyonu, 2020).

Hacmen %20'den fazla hidrojen karışımı, mevcut altyapı ve nihai kullanım uygulamalarında önemli değişiklikler gerektirecektir.

Şekil 14'te görüldüğü gibi, karışım oranları ile ilgili en kritik uygulamalar, gaz türbinleri, gözenekli depolama, kompresör istasyonları ve sıkıştırılmış doğal gaz tanklarıdır (şu anda kabul edilebilir karışım oranları herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duymadan hacmen %2 ile sınırlandırılmaktadır). Gaz akış detektörleri, miktar dönüştürücüler ve nihai kullanım sayaçlarının yanı sıra, konutlarda doğal gaz ile çalışan cihazların çoğunun uyarlanması veya değiştirilmesi gerekebilir. Hacmen %20'den fazla hidrojen karışımı, mevcut altyapı ve nihai kullanım uygulamalarında önemli değişiklikler gerektirecektir.

Şekil 14: Gaz altyapı bileşenlerinin hidrojen toleransı



Kaynak: IRENA (2018)

3. Türkiye’de yenilenebilir hidrojen potansiyeli: sektörler ve uygulamalar

3.1. Türkiye’nin yeşil hidrojen talep potansiyeli

Toplam enerji talebini karşılayan fosil yakıtların %5 ila %15 arasındaki payını ikame etme yönünde genel bir varsayımda bulunulacak olunursa, Türkiye’nin mevcut toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %5’ine denk gelen yılda yaklaşık 4,6 Mtep’lük bir yeşil hidrojen potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Bu da toplam 12,1 GW’lık bir elektrolizör kapasitesiyle karşılanabilir.

Türkiye’nin karbonsuzlaşması zor sektörlerinin enerji talebine dayalı olarak Türkiye’nin yeşil enerji talep potansiyeliyle ilgili basit bir tahmin yapılabilir (bkz. Tablo 4). Toplam enerji talebini karşılayan fosil yakıtların %5 ila %15 arasındaki payını ikame etme yönünde genel bir varsayımda bulunulacak olunursa, Türkiye’nin mevcut toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %5’ine denk gelen yılda yaklaşık 4,6 Mtep’lük bir yeşil hidrojen potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Bu da toplam 12,1 GW’lık bir elektrolizör kapasitesiyle karşılanabilir (%75 kapasite kullanım faktörü ve %60-%75 arasında hidrojen üretim verimliliği varsayılarak). Bu değer, 2,1 Mtep sanayi, 1,8 Mtep karayolu yük taşımacılığı ve 0,7 Mtep gaz şebekelerine karışım olarak pay edilir. Bu potansiyelin kullanılması için yılda, 1,6 milyon ton (Mt) yeşil hidrojen ve 80 milyar kWh elektrik üretimi gerekmektedir. Bugün, Türkiye’de yeşil hidrojen üretimi mevcut değildir. 12,1 GW’lık elektrolizör kapasitesi için gerekli yatırım, 750 ABD\$/kW’lık sermaye maliyeti ile 9,1 milyar ABD\$ olarak tahmin edilmektedir.

Elektroliz için gerekli olan elektrik ihtiyacı da dikkate alınmalıdır. Değişken yapıdaki yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi, %20 (güneş enerjisi) ve %60 (açık deniz rüzgârı) arasındaki kapasite kullanım faktörleriyle çalışır. Türkiye’nin kaynak kalitesinin iyi olduğu bölgelerdeki kapasite kullanım faktörleri rüzgâr için %35, güneş içinse %20 civarındadır. Kaynakların birbirlerini tamamlayabilecekleri varsayıldığında (gündüzleri güneş ve akşamları/ geceleri rüzgâr) varsayıldığında, 1 GW güneş ve 1 GW rüzgâr %55 oranında birleşik kapasite faktörü verecektir. 12,1 GW’lık yenilenebilir enerjinin günün 24 saati kullanılabilirliği, yaklaşık 12,1 GW güneş PV, 12,1 GW rüzgâr ve 12,1 GW rüzgâr/güneş ve depolama kombinasyonu olmak üzere toplam en az 36,3 GW’lık yenilenebilir enerji üretim kapasitesi anlamına gelir. Bu da Türkiye’nin yaklaşık 15 GW seviyesindeki kurulu PV ve rüzgâr kapasitesinden fazladır. Ortalama 1.000 ABD\$/kW’lık yatırım maliyeti varsayıldığında bu, elektrolizör kapasitesi için gereken yatırımın dört katı olan 36,3 milyar ABD\$ tutarında bir yatırım anlamına gelir.

12,1 GW’lık elektrolizör kapasitesi için gerekli yatırım, 750 ABD\$/kW’lık sermaye maliyeti ile 9,1 milyar ABD\$ olarak tahmin edilmektedir.

12,1 GW’lık yenilenebilir enerjinin günün 24 saati kullanılabilirliği, yaklaşık 12,1 GW güneş PV, 12,1 GW rüzgâr ve 12,1 GW rüzgâr/güneş ve depolama kombinasyonu olmak üzere toplam en az 36,3 GW’lık yenilenebilir enerji üretim kapasitesi anlamına gelir.

Tablo 4: Türkiye için yeşil hidrojen potansiyeli

	İkame potansiyeli	Toplam hidrojen talebi (ktoe/yıl)	Toplam kurulu elektrolizör kapasitesi (GW)	Toplam yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi (GW)	Toplam yatırım ihtiyacı (milyar ABD\$)
Demir-çelik 1)	DRI ile entegre tüm EAF'nin %5'i (ek talep)	405	1,1	3,2	4,0
Kimya ve petrokimya 2)	Yakıtların %15 sentetik metan ile ikame edilmesi	500	1,3	4,0	5,0
Plastik işleme 2)	Yakıtların %15 sentetik metan ile ikame edilmesi	40	0,1	0,3	0,4
Çimento 2)	Yakıtların %15 elektrikten yakıt elde edilmesi ile ikame edilmesi	1200	3,2	9,5	11,9
Karayolu taşımacılığı, havacılık, denizcilik 2)	Yakıtların %15 elektrikten yakıt elde edilmesi ile ikame edilmesi	1785	4,7	14,2	17,7
Gaz sektörü 3)	Gaz şebekesine %5 enjeksiyon	645	1,7	5,1	6,4
Toplam	-	4.570	12,1	36,3	45,4

- 1) 1 ton sıcak haddelenmiş sac 1,2 ton DRI gerektirir (Muscolino et al., 2016). Bir ton DRI için 3400 kWh hidrojen gerekmektedir (Gielen et al., 2020).
- 2) İkame potansiyelinde sırasıyla Saygin ve Gielen (yakında çıkacak) ve IEA esas alınmaktadır. Ulaştırmanın ikame potansiyelinin ise diğer sektörlerle uyumlu olacağı varsayılmış olup, tüm karayolu taşımacılığının enerjisinin %30'unun yük taşımacılığı için kullanıldığı varsayılmıştır. 1 GJ e-yakıt/metan üretimi için 1,87 GJ elektrik gerekmektedir (Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Frontier Economics, 2018).
- 3) Doğal gaz ve hidrojen alt ısı değerleri metre küp başına sırasıyla 35,8 ve 10,8 megajul olarak varsayılmıştır.

Hidrojen üretiminin verimliliğinin artırılması, enerji sistemine en ekonomik şekilde entegrasyonunun sağlanması için de önemli rol oynayacaktır. Bu nedenle, elektriğin hidrojene çevrilmesi ve ardından hidrojenin yakılması, kısa ve orta vadede çok daha verimli ve ekonomik bir çözümdür.

En büyük zorluklar, maliyetle ilgili konular, yabancı teknolojiye bağımlılık ve hidrojen-elektrik sistemlerinin verimliliğidir. Maliyetlerdeki düşüş ölçek ekonomisine bağlı olmasına rağmen yerli teknolojiyi geliştirmek, yalnızca kurulu gücü artırmaya çalışmaktan daha fazla çaba gerektirecektir. Hidrojen üretiminin verimliliğinin artırılması, enerji sistemine en ekonomik şekilde entegrasyonunun sağlanması için de önemli rol oynayacaktır. Bu nedenle, elektriğin hidrojene çevrilmesi ve ardından hidrojenin yakılması, kısa ve orta vadede çok daha verimli ve ekonomik bir çözümdür. Bununla birlikte, daha önce de belirtildiği gibi, yenilenebilir elektriğe dayalı yeşil hidrojen üretimi, fosil yakıt muadillerinden üretime kıyasla henüz maliyet açısından rekabet gücüne sahip değildir. Rekabet edebilmek için üretim maliyetlerinin, 2-3 ABD\$/kg seviyesine ulaşması gerekmektedir. Bu, elektrolizör ilk yatırım maliyetlerini azaltmak için teknolojik öğrenme (yani küresel olarak daha fazla kapasite kurulumu) ve ucuz yenilenebilir elektrik kaynaklarının sürekli tedariki yoluyla üretim maliyetlerindeki düşüşün devamını gerektirecektir. Yenilenebilir enerjiye dayalı elektrik üretiminin maliyeti, dünyanın geri kalanında olduğu gibi Türkiye'de de düşmektedir. 2019 yazında, kara rüzgârı için kazanılan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihaleleri (toplamda 1 GW), kWh elektrik başına yaklaşık 4 ABD\$ sent civarında gerçekleşmiştir. Güneş enerjisi için açılacak olan yeni mini YEKA ihalelerinin teklif limiti, kWh başına 30 kuruş (TL) olup bu da mevcut döviz kurlarında 4 ABD\$ senti civarındadır. Ayrıca, karbon politikalarının uygulamaya konulması, gaz veya kömüre dayalı üretim yollarına kıyasla yeşil hidrojen için eşit şartlar yaratmaya yardımcı olabilir. Bunun bir örneği, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın AB'ye ihracat yapan ülkelere yönelik hayata geçirmeyi planladığı sınır karbon uygulamasıdır. İhracatının yarısından fazlasını karşıladığı Türkiye'nin en

İhracatının yarısından fazlasını karşıladığı Türkiye'nin en büyük ticaret ortağı olan AB ile olan ticareti devam ettirmek için, Türkiye'nin imalat sanayisinin yeşil hidrojen gibi düşük karbonlu alternatiflerle üretimini karbondan arındırması daha önemli hâle gelecektir.

büyük ticaret ortağı olan AB ile olan ticareti devam ettirmek için, Türkiye'nin imalat sanayisinin yeşil hidrojen gibi düşük karbonlu alternatiflerle üretimini karbondan arındırması daha önemli hâle gelecektir.

Yeşil hidrojenin kullanımında, sektöre özgü zorluklar da vardır. Gaz şebekesine hidrojen karıştırmak, hacmen yaklaşık %10-%15 seviyelerine kadar şebekede değişiklik yapılmadan veya küçük değişikliklerle teknik olarak mümkündür. Ancak daha yüksek seviyelere erişmek için şebekede ek yatırımlar ve daha fazla Ar-Ge'ye ihtiyaç duyulacaktır. Doğal gaz karışımındaki hidrojenin payı arttıkça, hidrojenin enerji yoğunluğunun doğal gaza göre çok daha az olması sebebiyle, aynı enerji hizmetini sağlamak için taşınması gereken hacim miktarı da artmaktadır. Bu sebeple ek şebeke yatırımlarının yanı sıra, hidrojenin şebekeye verilme hacmi ve basıncında değişiklikler gerektirebilir ve bu da malzeme seçiminin ve kullanımını etkileyebilir. Bazı kaynaklar, hava gazının daha yaygın olarak kullanıldığı zamanlardan beri yüksek hidrojen içeriğine sahip şebekeleri yönetmede deneyim sahibi olduğundan bahsetmesine karşın, doğal gaz nakli ve dağıtımının daha karmaşık olduğunun altını çizmektedir. Boru hattı malzemesinin seçimi ve özellikleri, güvenliğin sağlanması, gaz akışlarının ölçülmesi ve gazın nakil mesafesi açısından da bu sistemler birbirlerinden önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle, gaz tedarik zincirinin her bir parçası, spesifik önlemlere ihtiyaç duyar. Son olarak, gaz-hidrojen karışımlarını işlemek için modifikasyonlara veya nihai kullanım teknolojilerinde yeniliklere ihtiyaç duyulabilir (GAZBİR-GAZMER Uluslararası İlişkiler Komisyonu, 2020).

Hidrojen bazlı ürünlerin Türkiye imalat sanayisine entegrasyonu, yeşil hidrojenin ve sentetik yakıtlar gibi türetilmiş ürünlerinin üretim şeklinin tedarik zinciri hakkında bir anlayış gerektirir. Sektör yapısını anlamak da çok önemlidir. Fosil yakıtları, yeşil hidrojen bazlı sentetik yakıtlarla ikame etmek, temelde bu tür yakıtları yakmak için ısıtma ekipmanı mevcut olduğundan ve endüstriyel prosesler hiçbir değişiklik gerektirmediklerinden nispeten basittir. Demir çelik endüstrisi söz konusu olduğunda, Türkiye şu anda, elektrik ark ocaklarında çelik hurdası tedariki ve işlenmesi üzerine bir sanayi düzeni kurmuştur. Yeşil hidrojen bazlı çelik üretimi, demir cevherinden doğrudan indirgenmiş demirin üretilmesi ve bunun elektrik ark ocaklarına beslenmeden önce hurda ile karıştırılmasını gerektirir. Bu kanıtlanmış bir teknoloji olsa da Türkiye'deki ticarileştirilmesine uyum sağlamak için, çelik hurdayı işlemek için kurulan lojistik ve üretim altyapısı ve ticaret yollarının değiştirilmesi gerekecektir.

Taşımacılık altyapısıyla ilgili de benzer zorluklar vardır. 2020'nin başında Türkiye, taşımacılık sektörünü, elektrikli araçlarla dönüştürme vizyonu benimsemiştir. Bu vizyon, şarj altyapısının genişletilmesi için yeni kentsel alanlar belirleneceği ve mevcut pompa istasyonlarının elektrikli araçlara yönelik şarj istasyonlarıyla değiştirileceği anlamına gelmektedir. Depolanabilen ve daha sonra yakıt hücreli araçlarda kullanılabilen hidrojen, çok sayıda otomobil üreticisi tarafından değerlendirilmektedir fakat hidrojen tedariki kendine özel bir altyapıyı gerektirir. Bu, elektrikli araçlara yönelik altyapı ile potansiyel olarak rekabet edebilir ve ulaştırmanın genel dönüşüm stratejisinin bir parçası olarak planlanmadığı takdirde ilave yatırımlara ihtiyaç duyulabilir.

Politika geliştirilmesi tarafındaki konuların da ele alınması gerekecektir. Geleneksel olarak, politika yapıcılar, bilinmeyen veya denenmemiş çözümlere kıyasla bilinen seçenekleri önceliklendirmektedirler. Bu nedenle, hidrojen için başlangıç teşkil edebilecek stratejiler, genellikle doğal gaz sisteminde hidrojen karışımına dayanmaktadır. Geçmişte buna benzer tecrübeler Türkiye'nin doğal gaz tarihinde

Rekabet edebilmek için üretim maliyetlerinin, 2-3 ABD\$/kg seviyesine ulaşması gerekmektedir. Bu, elektrolizör ilk yatırım maliyetlerini azaltmak için teknolojik öğrenme (yani küresel olarak daha fazla kapasite kurulumu) ve ucuz yenilenebilir elektrik kaynaklarının sürekli tedariki yoluyla üretim maliyetlerindeki düşüşün devamını gerektirecektir.

yaşanmıştır. Örneğin, Ankara’da 1990’lardan önce, kömür/hava gazı kullanılmaktaydı ve uzmanlara göre (Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi, BOTAŞ, eski Genel Müdürü Gökhan Yardım), Ankara’da iftar yemekleri gibi talep sıkıntısı yaşanan zamanlarda, sistem hidrojen açısından zengin kömür gazı ile beslenmekteydi. Doğal gaz hidrojen karışımının diğer seçeneklere göre önceliklendirme yönündeki tutum, uygulanabilir bir strateji ve Türkiye için önemli bir başlangıç noktası olabilir. Geçmişte aşırı iddialı hidrojen stratejilerinin hayata geçirilmesinde yaşanan tecrübeler, politika çerçevesini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle, özel sektörü merkezine alan ve adım adım ilerleyen bir sanayi yaratma stratejisi, ölçek ekonomisi yaratılması ve güvenilirliğin yaratılması için önemlidir. Ayrıca doğal gaz tüketiminin %5’inin hidrojenle ikame edilmesi, Türkiye’ye yılda 0,6 milyar ABD\$ tasarruf sağlayabilir.

Hidrojen üretimi için yerli kömür kullanımı da bir başka önemli konudur. Bir kamu kuruluşu olan Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ), bu tür teknolojilerin fizibilitesi üzerine araştırmalar yürütmüştür. Gazlaştırma ve ilgili teknolojiler, TKİ tarafından incelenmiştir. Sonuçların ne kadar başarılı olduğun konusunda farklılıklar olmamasına karşın, TKİ’nin Ar-Ge ekibi, bu tür teknolojiler konusunda önemli bir anlayışa sahiptir.

Hidrojen kullanımının enerji sistemine olan etkilerini göz önünde bulundurularak planlanması gerekecektir.

Bu stratejinin temelden farklı bir yönü, politika belirleyicilerinin hidrojen teknolojilerini ele alma şeklidir. Daha önceleri strateji, bir devlet kurumunun veya şirketinin, önemli bir teknolojinin yerleştirilmesinin gerçekleştirilmesine dayanıyordu. Bu sefer strateji, yeni kurulan şirketlerin ve girişimcilerin rol aldığı ve doğal gaz dağıtım şirketleri veya Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi (BOTAŞ) gibi köklü oyuncular tarafından pazarlanan bir “hidrojen ekosistemi”ni hedeflemektedir.

Mavi-yeşil hidrojen tartışması, enerji uzmanlarının gündeminde ilk sırada yer almamaktadır. Bakış açısı, iklim merkezli olmaktansa daha çok pragmatik olarak ön plana çıkmaktadır. Hidrojen, Türkiye’nin Milli Enerji ve Madencilik politikasının çözümünde yer alması önemli olup, yenilenebilir kaynaklar, kömür, ya da yakın zamanda bulunan yerli gaz rezervlerinden olmak üzere hangi kaynaklardan üretilmesi gerektiği fayda ve maliyet açısından araştırılmalıdır. Düşük karbonlu enerji kaynaklarının kullanımı hava kirliliğinin azaltılması ve iklim değişikliğinin önlenmesinde anahtar rol üstlenmekte ve AB’ye Türkiye’den ürün ihraç eden büyük firmalar, sınırda karbon uygulaması rejiminden dolayı endişeli olması sebebiyle, emisyonları azaltacak yöntemleri destekleyecek politika tasarımlarının gerçekleştirilmesini gerektirmektedir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi & Agora Energiewende, 2020).

3.2. Yeşil hidrojenin sistem entegrasyon etkileri

Hidrojen kullanımının enerji sistemine olan etkilerini göz önünde bulundurularak planlanması gerekecektir. Türkiye, güneş ve rüzgâr enerjisine giderek artan bir önem vermektedir. Ancak yakın tarihte Kaliforniya’da yaşanan elektrik kesintilerinin de gösterdiği gibi, değişken karakteristiğe sahip güneş ve rüzgâr enerjisinin sistem entegrasyonunun temel sınırları vardır. Bu kaynaklardan daha iyi yararlanabilmek için ya talep esnek olmalı ya da depolama gibi esnekliği artıracak sistemler kullanılmalıdır. Bataryalı depolama sistemleri, kısa vadeli depolama açısından sorunun ancak bir kısmını çözmektedir. Esas ihtiyaç, mevsimsel depolanmanın geliştirilmesidir. Örneğin, Türkiye, mevcut yenilenebilir enerji kapasitesine ek olarak 50.000 MW güneş enerjisi kuruyorsa üretimin en yüksek olduğu dönemdeki güneş enerjisi kapasitesinin bir kısmı, kış kullanımı için depolanmalıdır. Türkiye’nin politika yapımcıları, güneş enerjisi fazlasının hidrojen kullanarak mevsimsel depolanması fikrini desteklemektedirler.

Türkiye, mevcut yenilenebilir enerji kapasitesine ek olarak 50.000 MW güneş enerjisi kuruyorsa üretimin en yüksek olduğu dönemdeki güneş enerjisi kapasitesinin bir kısmı, kış kullanımı için depolanmalıdır. Türkiye’nin politika yapımcıları, güneş enerjisi fazlasının hidrojen kullanarak mevsimsel depolanması fikrini desteklemektedirler.

Elektrik sektörünün karbonsuzlaşması farklı şekillerde olabilir. Elektroliz teknolojisi mevcut ticari teknolojiler değerlendirildiğinde ve ileriye dönük beklenen iyileştirmeler göz önünde bulundurulduğunda önemli ölçüde gelişmiştir (Buttler & Spliethoff, 2018). Mevcut elektroliz teknolojilerinin, enerji depolama ve şebeke dengelemesi de dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalar için teknik açıdan uygunluğuna dikkat çekilmektedir. Ayrıca, karbonsuzlaşmada, depolamaya dayalı ikinci bir adım olarak yenilenebilir elektrikten doğal gaz ve sıvı yakıt üretimi yoluyla sektörel eşleşmeleri destekleme fırsatları da tespit edilmektedir.

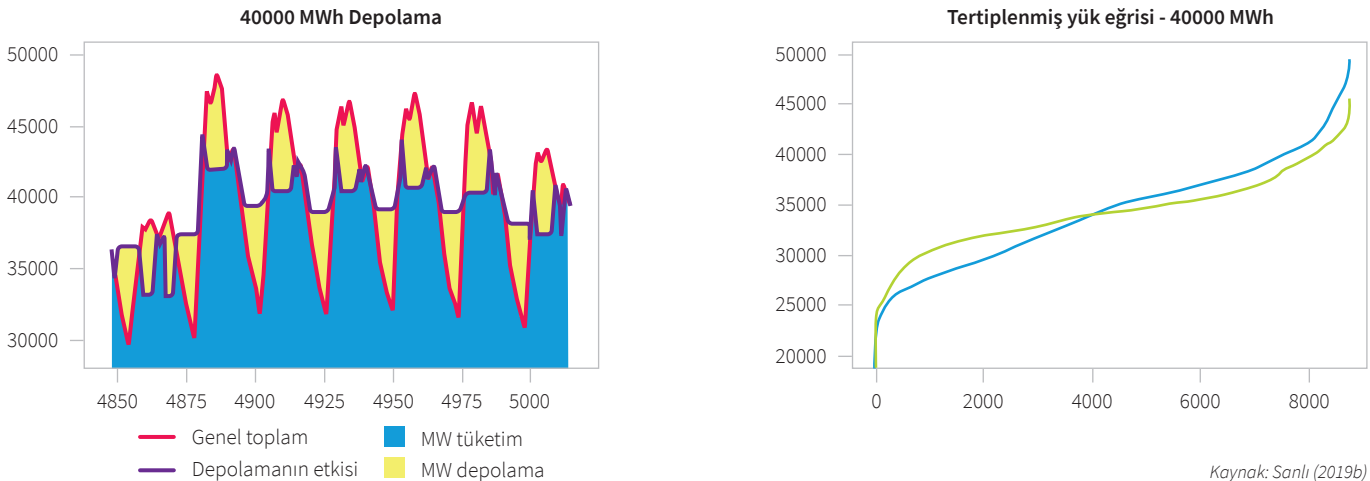
Elektrik enerji sistemi için bir destek mekanizması olarak hidrojen depolama ile esnek elektroliz teknolojileri kullanıldığında farklı sonuçlar elde edilmektedir.

Elektrik enerji sistemi için bir destek mekanizması olarak hidrojen depolama ile esnek elektroliz teknolojileri kullanıldığında farklı sonuçlar elde edilmektedir. Fransa'nın enerji sistemine esnek elektroliz ve hidrojen depolamanın dâhil edilmesi, yük takibinde kullanımın (Fransa'nın büyük baz yük nükleer kapasitesi bağlamında) yanı sıra, üretimde değişkenliğin yarattığı dengesizliklerin ortadan kaldırılması için önemli bir potansiyel sunmaktadır (Bennoua et al., 2015). Özellikle frekans düzenleme faaliyetlerine katılan hidroliz tesislerinin uygulanabilirliğini inceleyen başka bir çalışmada, santrallerin gelirlerinin daha çok ödemelerin kapasite bileşeni tarafından sağlandığı ortaya konmuştur. Ancak bu tür işletim seçeneklerinin santraller için kârlı olabilmesi, geri ödemenin 2010 yılı başlangıç seviyesi iki ila üç kat daha fazla artması gerekecektir (Guinot et al., 2015).

Sistem geneline bakıldığında, İspanya'da modern bir enerji sisteminin daha düşük karbonlu bir sisteme dönüşümü için büyük ölçekli esnek enerji depolaması amacı doğrultusunda elektrolizin başarılı entegrasyonu için iyimser bir tahminle 50 MW'lık bir elektroliz kapasitesinin entegrasyonu gerekli olduğu görülmüştür (Gutiérrez-Martín et al., 2015).

Batarya depolamanın yaygın bir tartışma konusu olduğu Avustralya'da, Horndale Battery Storage gibi bazı iyi vaka çalışmaları bulunmaktadır. Ancak Türkiye elektrik sistemi üzerinde yapılan simülasyonlar, önemli bir etki yaratmak için devasa bir batarya depolamaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bunun en önemli nedeni, yüksek ve düşük talep dönemlerinin 2-3 hafta kadar sürüyor olmasıdır. Bu da yüksek talep döneminde, daha geç saatler için elektrik depolama talebinin büyük bir fark yaratmadığı anlamına gelir ve düşük talebin olduğu dönemler için de durum aynıdır. Kısa vadeli esneklik sağlamasına rağmen, mevsimsel kullanım için ekonomik şekilde depolama yapılması zor olmaktadır.

Şekil 15: 40000 MWh depolamanın Türkiye'nin yaz talebi ve yük-süre eğrisine etkisi

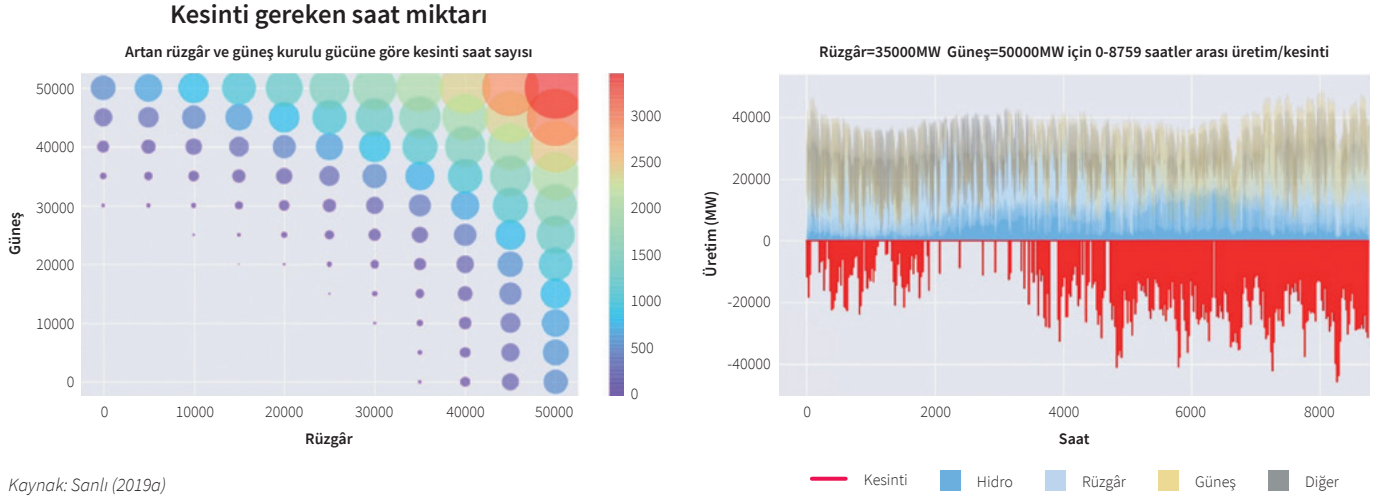


Yeşil hidrojenin nihai kullanım sektörleri ve gaz şebekelerinin yanı sıra enerji sistemi dönüşümündeki kullanımları arasındaki sinerjilerini önceliklendirmek için, batarya depolama gibi diğer esneklik seçeneklerinin sistem maliyetleriyle karşılaştırılması da dâhil olmak üzere bir maliyet-fayda analizine ihtiyaç duyulacaktır.

Bir başka simülasyona göre, 20.000 MW güneş ve 20.000 MW rüzgâr kurulu gücünün Türkiye elektrik sistemi üretiminin en yüksek olduğu saatlere denk geldiğinde işletim açısından bazı sorunlar yaşanabilir. Güneş, rüzgâr ve talebin kombinasyonunun yanı sıra, bu kaynakların konumu da bu sorunların yaşanmasında rol oynamaktadır. Ayrıca, özellikle düşük talebin yaşandığı dönemlerde, hidroelektrik santrallerinde üretimin bahar aylarında artma olasılığı yüksektir. Şekil 16'nın (sağda) üzerindeki kırmızı çizgiler, rüzgâr ve güneş enerjisinde duyulan kesinti (*curtailment*) ihtiyacıdır. Yaz mevsimi talebin yüksek olacağı varsayılarak kesintilerin en az olduğu dönemdir. Diğer zamanlarda muhtemelen en uygun depolama çözümü hidrojen ve gaz şebekesinin kullanımıdır. Yeraltı tuz mağaralarında depolanan hidrojen elektrik talebinin arttığı dönemlerde ve kışın hem ısı hem de elektrik üretimi için kullanılabilir.

Yeşil hidrojenin nihai kullanım sektörleri ve gaz şebekelerinin yanı sıra enerji sistemi dönüşümündeki kullanımları arasındaki sinerjilerini önceliklendirmek için, batarya depolama gibi diğer esneklik seçeneklerinin sistem maliyetleriyle karşılaştırılması da dâhil olmak üzere bir maliyet-fayda analizine ihtiyaç duyulacaktır.

Şekil 16: Türkiye elektrik sistemi, kapasiteleri 20000 MW'ın üzerine çıktığı takdirde güneş ve rüzgâr enerjisinde çok fazla kesinti yapmaya başlamak zorunda kalacaktır



4. Hidrojen dönüşümünün sağlanması için gerekli olan altyapı

Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretiminin sunduğu önemli potansiyele karşı, hidrojen stratejisinin geliştirilmesinde, hidrojen lojistiği ve ticaret potansiyelinin anlaşılması gerekmektedir.

Hidrojen üretimi için elektrik şebekesi yatırımlarını en aza indirmek için strateji geliştirmede tedarik, altyapı ve talep potansiyeli haritalama çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Tedarik ve talep konularının birbirleriyle eşleştirilerek birbirine olan yakınlıklarının yarattığı avantajlar kullanılmalıdır.

Türkiye kendi enerji stratejisi doğrultusunda, doğal olarak yerel kaynaklardan hidrojen üretmeyi hedeflemektedir. Bu kısa çalışmanın öncesinde tartışıldığı gibi, bu potansiyelin hayata geçirilmesi için büyük yatırımlar ve bunu destekleyecek finansman kaynakları gerekmektedir. Türkiye'nin geniş coğrafyasında yer alan talebin potansiyelinin belirlenmesi ve tüketimin de nerede olabileceğinin anlaşılması önemli olacaktır. Demir çelik üretimi esas olarak batı ve güney bölgelerinde bulunurken (bkz. Şekil 17), çimento fabrikaları tüm ülkeye yayılmıştır (Şekil 18). Şekil 19 ise yeşil hidrojenin doğal gaz şebekesine enjekte ederek diğer ülkelere ihraç olasılıklarının anlaşılması bakımından önemlidir. Karşılaştırma yapmak gerekirse, doğal gaz 16 milyondan fazla abone ve 53 milyon aktif kullanıcı ile tüm ülkede kullanılmaktadır (bu rakam Türkiye'nin 85 milyona ulaşan toplam nüfusu ile karşılaştırılmalıdır). Rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli tüm ülkede mevcuttur, ancak rüzgâr enerjisi Türkiye'nin batı kesimlerinde ağırlıklı olarak en yüksek verimi sağlarken, ülkenin orta ve güney kesimlerinde güneşin sunduğu kaynak kalitesi en yüksek seviyededir. Hidrojen üretimi için elektrik şebekesi yatırımlarını en aza indirmek için strateji geliştirmede tedarik, altyapı ve talep potansiyeli haritalama çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Tedarik ve talep konularının birbirleriyle eşleştirilerek birbirine olan yakınlıklarının yarattığı avantajlar kullanılmalıdır. Bu ayrıca hidrojenin lojistiğiyle ilgili maliyetleri en aza indirilerek, elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde en düşük maliyetli elektrik kaynaklarının kullanımının sağlanmasına yardımcı olacaktır. Yerli hidrojen üretiminin bir kısmı, doğal gaz boru hatları veya sıvı hidrojen şeklinde veya Türkiye'nin rüzgâr ve güneş açısından önemli bir kaynak potansiyeline sahip liman bölgelerinden amonyak veya demir gibi nihai kullanım ürünleri olarak başka ülkelere ihraç edilebilir. Türkiye'nin batı ve güney kesimlerindeki önemli liman bölgelerinden bazıları, aynı zamanda güneş ve rüzgâr kaynağı potansiyelinin mevcut olduğu bölgelerdir. Ancak, bu bölgelerdeki ekonomik faaliyetin de önemli ölçüde yüksek olması sebebiyle müsait arazi bulunmasında güçlük çekilmekte ve üretilen elektriğin öncelikle bölgesel talebi karşılama zorunluluğu getirmektedir.

Yerli hidrojen üretiminin bir kısmı, doğal gaz boru hatları veya sıvı hidrojen şeklinde veya Türkiye'nin rüzgâr ve güneş açısından önemli bir kaynak potansiyeline sahip liman bölgelerinden amonyak veya demir gibi nihai kullanım ürünleri olarak başka ülkelere ihraç edilebilir.

Bu tartışma elektrik ve gaz sistemlerinin hidrojen yoluyla entegrasyonunun önemine işaret etmektedir. Bu entegrasyon, Türkiye'nin doğu-batı elektrik yük akışı dengesizliklerinin bir kısmının çözülmesinde faydalı olabilir. Bunun için elektrik yük akışları talep esnekliği sağlayan elektroliz kurulu gücüyle kontrol edilebilir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen Türkiye'nin doğal gaz şebekesine beslenebilir ve belli bir süre için depolanabilir. Doğal gaz/hidrojen karışımı ayrıca doğal gaz kombine çevrim santralleri tarafından kullanılabilir. Gaz fazlası, Tuz gölü veya Silivri doğal gaz depolama tesislerinde depolanabilir.

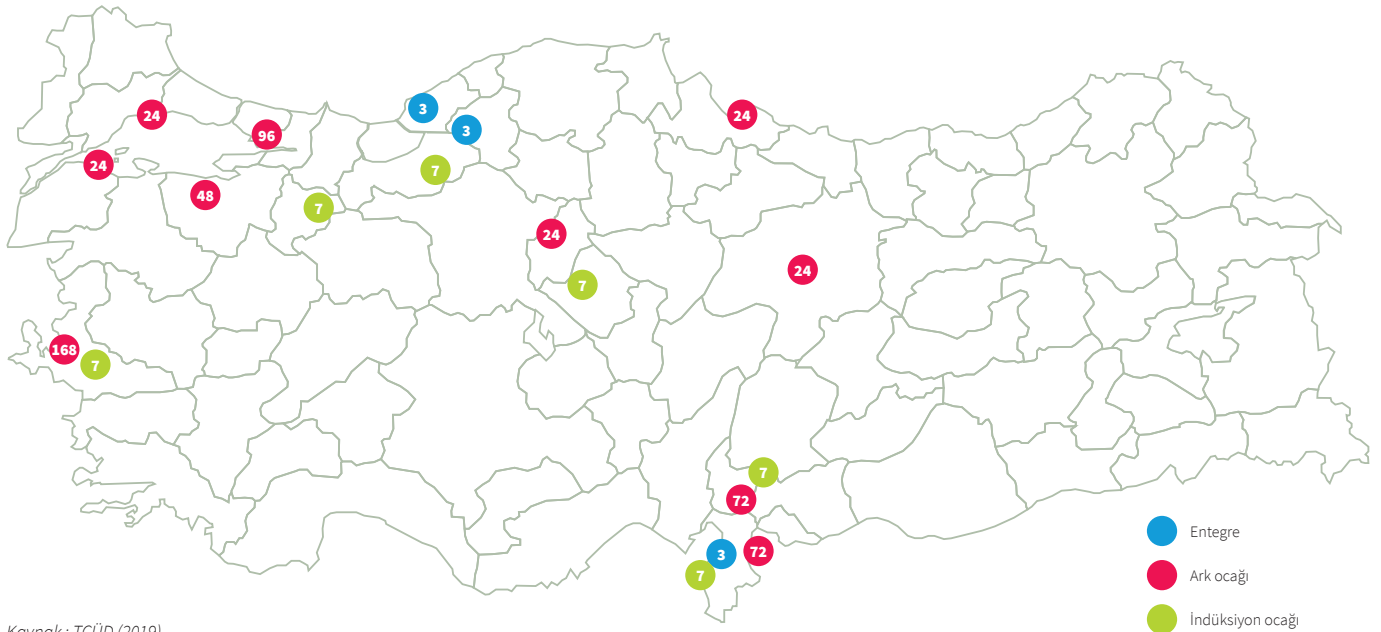
Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP), Türkiye-Yunanistan veya Türkiye-Bulgaristan ara bağlantılarından doğal gaz/hidrojen karışımı veya saf hidrojen tedariki sağlamak gibi bir seçenek daha vardır. Bu, şu anda mümkün olmasa da mevcut altyapı ileride AB bölgesine yeşil hidrojen ihraç etmek için önemli bir seçenek oluşturabilir. Bu da Türkiye'de daha fazla yenilenebilir enerji kapasitesi entegrasyonunun önünü açabilir.

Eğer elektroliz maliyetlerindeki düşüş diğer enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmelere benzer şekilde “yaparak öğrenme” ve ölçek ekonomileri ile gerçekleşecekse hidrojen için bir pazar yapısı ve üretilen hidrojenin lojistiğini sağlayacak altyapının inşa edilmesi zorunludur.

Bu varsayımlara dayalı bir planın 2017 yılında açıklanan Türkiye'nin Milli Enerji ve Madencilik politikası ile uyumlu olmalıdır. Teknolojinin yerleştirilmesi bu sebepten dolayı son derece önemli olacaktır. Bu nedenle, YEKA ihale modeli hidrojen alanına kaydırılabilir. Bu yöndeki ilk adım, BOTAŞ'ın iletim şebekesinin, hidrojen için teknik sınırlarının belirlenmesidir. Ayrıca, yerli teknolojiyle yapılacak üretim için Hidrojen-Elektrik satın alam garantileri (YEKDEM benzeri) veya bütünleşmiş YEKA-hidrojen projeleri de birer olasılık olabilirler. Ayrıca, bugüne kadar YEKDEM modelinden yararlanmış olan yenilenebilir enerji santrallerinin hidrojen üretiminde kullanılmasına yönelik yeni düzenleyici seçenekler de araştırılabilir.

Eğer elektroliz maliyetlerindeki düşüş diğer enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmelere benzer şekilde “yaparak öğrenme” ve ölçek ekonomileri ile gerçekleşecekse hidrojen için bir pazar yapısı ve üretilen hidrojenin lojistiğini sağlayacak altyapının inşa edilmesi zorunludur. Yine de, bir pazarın kurulduğu ve altyapının mevcut olduğu bir durumda elektroliz teknoloji maliyetlerinde önemli bir düşüş gerçekleşmeden önce, hidrojen üretimi etrafında mevzuatla ilgili ilerleme kaydedilmesi gerekecektir.

Şekil 17: Türkiye'deki demir-çelik fabrikalarının yerleri, 2019



Şekil 18: Türkiye'deki çimento fabrikalarının yerleri, 2018



Kaynak: TÇMB (2018)

Şekil 19: Türkiye'de doğal gaz boru hatları, 2020





5. Türkiye’de Hidrojen Girişimciliğinin Getirdiği Fırsatlar

Hidrojenin enerji sektörünün karbonsuzlaştırmasında üstleneceği rol, girişimcilik için benzersiz fırsatlar yaratmaktadır.

Yeşil hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak yaygın şekilde benimsenmesi, tüm değer zinciri boyunca uygun maliyetli teknoloji seçeneklerinin kullanılabilirliğine bağlıdır.

Hidrojen üretim noktasındaki önemli hususlardan bir diğeri de sistem optimizasyonun gerçekleştirilmesidir. Bir diğeri önemli unsur da mevcut altyapının kullanım amacını değiştiren alternatif hidrojen taşıma biçimlerini keşfetmektir.

Türkiye’nin hidrojen stratejisinin başarısı, büyük oranda yenilikçilik ve girişimcilik ekosisteminin gelişmesine bağlı olacaktır. Hidrojenin enerji sektörünün karbonsuzlaştırmasında üstleneceği rol, girişimcilik için benzersiz fırsatlar yaratmaktadır. Burada aşılması gereken ilk engel, özellikle altyapı alanında yapılması gereken büyük sermaye yatırımını çözmektir. Daha fazla hidrojene dayalı bir ekonomiye doğru ilerlemek için hidrojene gerçekten ihtiyaç duyacak veya onu kullanmaktan fayda sağlayabilecek sektörlerin ve son kullanıcıların belirlenmesi gerekmektedir. Bir diğeri önemli konu da hidrojen üretiminden kaynaklanan etkileridir. Hidrojen kullanıldığında, doğrudan herhangi bir emisyonu sebep olmasa da hidrojen üretiminin çevre ve iklim üzerinde olumsuz etkileri olabilir. Günümüzde, hidrojen üretiminin yaklaşık %95’i fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Bunun sonucunda, hidrojen üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları oldukça yüksektir ve bu sebeple yeşil hidrojen üretimine geçişin önemi daha fazla ön plana çıkmaktadır. Hidrojen ekosisteminin oluşturulmasının üç ayağı, Ar-Ge, ticarileşme ve büyük ölçekli uygulamalar olarak sıralanabilir. Raporun bu kısmında, Türkiye’nin küresel seviyede yaşanan hidrojene dayalı dönüşüm eğilimine nasıl katılabileceği bu konu başlıkları altında incelenmektedir.

Araştırma ve Geliştirme

Hidrojen, çeşitli sektörlerde yaygın olarak uygulanabilecekken, mevcut kullanımı esas olarak kimya ve rafineri ürünleri ve gübre üretimi içindir. Üretimin de neredeyse hemen hemen hepsi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Hidrojenin çok yönlü kullanım alanlarının olması, enerji sektörünün bütününde büyük bir potansiyel oluşturmaktadır. Ancak, yeşil hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak yaygın şekilde benimsenmesi, tüm değer zinciri boyunca uygun maliyetli teknoloji seçeneklerinin kullanılabilirliğine bağlıdır. Ar-Ge, teknolojiye yenilikçilik ve güvenlik önlemleri olarak iki genel kategoriye ayrılabilir.

Teknolojide yenilikçilik

Yeşil hidrojen üretimi: Alkali ve PEM elektrolizörler, ticarileşmiş teknolojilerdir. Ancak hidrojenin mevcut ve kısa vadede öngörülen üretim maliyetleri fosil yakıtı dayalı alternatiflerden daha yüksektir. Maliyetlerin düşürülebilmesi için yenilikçilik son derece önemlidir. Yeşil hidrojen üretiminin zorluklarından biri de yenilenebilir enerji kaynaklarının (özellikle güneş ve rüzgâr) değişken karakteristiğe sahip yapısıdır. Hidrojen üretimi elektrik yükündeki değişkenliği takip ederek gerçekleştirilmeli ve elektrolizörlerin düşük kapasite kullanım oranlarıyla çalışmaları sonucu ortaya çıkan maliyet, düşük ilk yatırım maliyetleriyle telafi edilebilmelidir. Bir diğeri önemli unsur ise üretim yöntemi ile tüketim koşulları arasındaki uyumdur. Bu, öncelikle merkezi büyük ölçekli üretim ile dağıtık küçük ölçekli üretim arasındaki dengeyi içermektedir. Ayrıca sıcaklık, basınç ve hidrojenin fazı gibi üretimle ilgili bazı koşullarda eşit derecede öneme sahiptir.

Hidrojenin nakliyesi ve işlenmesi: Hidrojen günümüzde, boru hatları, tır, kamyonlar ve yakıt tankerleri aracılığıyla sıkıştırılmış (gaz) veya sıvılaştırılmış (sıvı) koşullar altında taşınmaktadır. Her iki taşımacılık yolu da nakliye mesafesi ve nihai kullanım uygulamalarına bağlı olarak önemli enerji ve maliyet yükü getirmektedir. Hidrojen üretim noktasındaki önemli hususlardan bir diğeri de sistem optimizasyonun gerçekleştirilmesidir. Bir diğeri önemli unsur da mevcut altyapının kullanım amacını değiştiren alternatif hidrojen taşıma biçimlerini keşfetmektir. Mevcut boru

Yeşil hidrojen bağlamında üretim, büyük olasılıkla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliğini takip edeceği için depolama özellikle önemli olacaktır.

hatları, hidrojen taşımak için doğrudan kullanılamaz. Düşük maliyetli iyileştirme teknolojilerinin geliştirilmesi, hidrojen taşımacılığı için mevcut altyapının kullanım fırsatlarını doğurabilir. Kaplama malzemelerinin geliştirilmesi, standartların ve ekipmanların izlenmesinin yanı sıra boru içi robotlar gibi hızlı uygulama yöntemleri, hidrojen taşımacılığı inovasyonuna öncülük etmelidir.

Hidrojen depolaması, taşıma yöntemlerine benzer şekilde çeşitli aşama ve koşullarda mevcuttur. Mevcut düşük maliyetli, uzun vadeli seçenek, jeolojik depolama sahaları (tuz kubbeleri) kullanmaktır. Yeşil hidrojen bağlamında üretim, büyük olasılıkla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliğini takip edeceği için depolama özellikle önemli olacaktır. Ne yazık ki jeolojik depolama, her yerde mevcut değildir ve potansiyel depolama sahalarının bölgesel envanteri kapsamlı olarak incelenmemiştir. Hidrojen taşıyıcılarının geliştirilmesi ve sıvı organik hidrojen taşıyıcıları gibi depolama alternatifleri, başka bir önemli darboğazın üstesinden gelinmesine yardımcı olabilir. Araçlar için sıkıştırılmış hidrojen tankları gibi mobil uygulamalar da dâhil olmak üzere, küçük ölçekli depolama uygulamalarında, uygun maliyetli ve güvenli seçeneklerin geliştirilmesi önemlidir.

Hidrojenin son ürüne çevirimi, hidrojen değer zincirindeki son adımdır. Bu raporun önceki bölümlerinde de sunulduğu gibi hidrojen, her biri farklı bir çevirim prosesine sahip olacak çok sayıda uygulama için kullanılabilir. Elektrik enerjisi uygulamaları için mevcut gaz türbinlerinin iyileştirilmesi, yüksek önceliğe sahiptir. Ulaştırma için yakıt hücreli araç teknolojilerinin geliştirilmesi ve ağır hizmet uygulamaları için yüksek performanslı makinelerin geliştirilmesi önemlidir. Toplu taşıma araçları, maksimum sürüş süresini korurken hava kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olabilir. Konut ve ticari uygulamalar için hidrojen veya hidrojen karışımı yakıt yakma ekipmanının geliştirilmesi ve/veya tadilat seçenekleri son derece önemlidir. Sanayi içinse, hidrojen ve türevlerinin kullanımının artırılması ve hidrojenin doğrudan kullanımından yararlanacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi, inovasyon gündeminin en başında yer almaktadır.

Uygulanabilirliği göstermek ve kamuoyundaki kabulünü artırmak için başarılı hidrojen projelerinin sayısı artmalıdır.

Güvenlik önlemleri

Hidrojen, günümüz enerji sisteminde kullanılan geleneksel yakıtlardan daha güvenli bir şekilde taşınmasını ve kullanılmasını sağlayan bir dizi özelliğe sahiptir. Hidrojen, toksik değildir ve havadan çok daha hafiftir. Bir sızıntı durumunda, hafifliği nispeten hızlı dağılım sağlar. Kullanılan tüm yakıtlar kendi özelliklerine bağlı olarak bir miktar tehlike yaratırlar, ancak yakıt sistemleri mühendislik kontrolleri ile tasarlanabilir ve güvenli taşıma ve kullanım sağlama amaçlı standartlar belirlenebilir. Ancak, uygulanabilirliği göstermek ve kamuoyundaki kabulünü artırmak için başarılı hidrojen projelerinin sayısı artmalıdır.

Ticarileştirme

Karbonsuzlaşma için hidrojen kullanımını için önümüzdeki on yıl içinde keskin bir artış ile kullanımının enerji sektöründe belli bir paya erişmesi gerekmektedir. Bu nispeten kısa süre zarfı, hidrojen teknolojisinin geniş alanlardaki kullanımını hızlandırma yönünde ticarileştirilme için baskı oluşturmaktadır. Ar-Ge kısmında, en büyük öneme sahip alanlar sıralanmıştır. Bu bölümde ise kapsamlı bir liste oluşturmak yerine, Türkiye'nin avantajlı bir başlangıç sağlayacak mevcut güçlü yanlarını ön plana çıkarmaya odaklanılmıştır.

Konut ve ticari yapılarda hidrojen kullanımı, hidrojen ile uyumlu beyaz eşyaların geliştirilmesine ihtiyaç duyacaktır.

Hidrojen değer zincirinde birçok aktör ve paydaş bulunmaktadır. Bu da yeni iş modelleri oluşturmak için benzersiz fırsatlar yaratmaktadır.

Ar-Ge, düşük karbonlu hidrojen üretim tesislerinin hayata geçirilmesi, altyapı modernizasyonu ve hidrojenin çok sektörlü kullanımına yönelik teşviklere öncelik veren ulusal bir hidrojen stratejisi benimsenmelidir.

Cihaz geliştirme

Konut ve ticari yapılarda hidrojen kullanımı, hidrojen ile uyumlu beyaz eşyaların geliştirilmesine ihtiyaç duyacaktır. Bu, belli hidrojen karışımlarını tolere eden ürünlerden saf hidrojen ile çalışan ürünlere kadar geniş bir yelpazeyi içermektedir. Söz konusu beyaz eşyalar arasında, ısıtıcılar, su ısıtıcıları, ocaklar, fırınlar yer alacaktır. Türkiye'nin beyaz eşya imalat sanayi, bu alanda yatırım yapmak için mükemmel bir konuma sahiptir.

Ulaştırımda niş uygulamalar

Hidrojenin mevcut kullanım uygulamaları, depolarda kullanılan forkliftler, taksiler ve trenlerdir. Bu örnekler hem imalat hem de kullanım perspektifinden değerlendirildiğinde Türkiye pazarında kendine yer bulabilir. Başlangıçtaki altyapı gereksinimi, merkezi yakıt istasyonları kullanılarak hayata geçirilebilecek uygulamalara odaklanılarak en aza indirilebilir. Metrobüs, depo makineleri ve araçları, hidrojen pazarına giriş noktası olarak büyük bir potansiyele sahiptir.

İş modelleri

Hidrojen değer zincirinde birçok aktör ve paydaş bulunmaktadır. Bu da yeni iş modelleri oluşturmak için benzersiz fırsatlar yaratmaktadır. Hidrojen sanayi büyüdükçe, hidrojen değer zincirindeki farklı varlıklar için sahiplik modelleri, nakliye ve dağıtım ağı geliştirme, üretim, depolama ve yakıt ikmali istasyonlarının stratejik olarak konumlandırılması için planlama, güvenlik protokollerinin oluşturulması ve uygulanması, hidrojenli cihazlar için sertifika standartlarının geliştirilmesi, sektörler arası uygulamalar oluşturulması gibi yeni çözümler geliştirilmesi gerekmektedir.

Büyük ölçekli uygulamaya geçiş

Hidrojenin karbonsuzlaşmadaki rolünün etkinliği, büyük ölçekte benimsenmesine bağlıdır. Hidrojenin potansiyelini artıracak birçok faktör vardır. Ar-Ge, düşük karbonlu hidrojen üretim tesislerinin hayata geçirilmesi, altyapı modernizasyonu ve hidrojenin çok sektörlü kullanımına yönelik teşviklere öncelik veren ulusal bir hidrojen stratejisi benimsenmelidir. Türkiye'de hidrojenin büyümesinin itici gücünün özel sektör olması beklenirken, oyuncular ulusal strateji belirleyecektir. Stratejik konular, ana odak noktasını (enerji güvenliği için karbondan arındırma için veya net bir temiz enerji ihracatçısı olmak için hidrojen) ve ulusal hidrojen ağı tasarımını (dağıtılmış hidrojen üretimi için elektron taşımaya karşı merkezi hidrojen üretimi yoluyla hidrojen taşıma) içermektedir.



6. Türkiye için bir ulusal hidrojen stratejisi geliştirilmesinde öncelikli alanlar

Bu kısa rapordan, Türkiye için ulusal bir hidrojen stratejisi geliştirmesinde yardımcı olabilecek birçok öncelikli alan ortaya çıkmaktadır:

- **Yeşil hidrojenin enerji ithalatına bağımlılığı azaltmak için sunduğu fırsatların anlaşılması:** Bu raporda ele alınmış basit bir analizin ortaya koyduğu yeşil hidrojen potansiyeline göre Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %5'i hidrojen ile ikame edilebilir ve bu Türkiye'nin doğal gaz ve diğer fosil yakıtlara olan ithalat bağımlılığının azaltılmasında önemli bir rol yaratabilir. Örneğin, doğal gaz şebekesinde yapılacak %5'lik karışım, yılda 2,5 milyar m³ ithal doğal gazın, yani yılda yaklaşık 0,6 milyar ABD\$'a eşdeğer doğal gaz ithalat maliyetinin ortadan kaldırılması anlamına gelir. Ayrıca yoğun enerji tüketen ağır sanayi, ulaştırma için temiz bir enerji alternatifi sağlayacak ve en önemlisi de Türkiye'nin doğal gaz şebekesini dönüştürecek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke yatırımları için alternatif esneklik seçenekleri sağlayacaktır.
- **Doğal gaz sektörü için fırsatların anlaşılması:** Nakil boru hatları kullanıldığı takdirde, hidrojen, AB bölgesi ve diğer komşu ülke ve bölgelere ihraç edilebilir. Türkiye'nin doğu-batı yönündeki elektrik nakillerinin, yeni üretim kapasitelerinin eklenmesiyle 2023 yılına kadar büyümesi beklenmektedir. Bu üretimin bir kısmı, Türkiye'nin batısındaki kombine çevrim gazı yakıtlı enerji santrallerine hidrojen olarak aktarılabilir.
- **Elektrolizör ve yenilenebilir enerji kapasiteleri için finansman seferberliği:** Yenilenebilir enerji kapasitesine yönelik yatırımlar, elektrolizörlere göre üç kat daha fazla olması sebebiyle yatırımların harekete geçirilmesi için finans yaratılması gerekmektedir. Maliyet rekabet gücünü hayata geçirmede, elektroliz maliyetlerini düşürmek için teknolojinin hızlı şekilde yayılmasına ihtiyaç vardır.
- **Yeşil hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji entegrasyonun planlanması:** Türkiye'nin enerji sektörünü karbonsuzlaştırmak ve ihracat fırsatları yaratmak, böylelikle de hem talep esnekliği hem de hidrojen üretimi olarak elektrolizörler kullanarak başta güneş olmak üzere yenilenebilir enerji kapasitesini en üst düzeye çıkarmak, daha fazla yenilenebilir enerji entegre etmek için Türkiye'nin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynak potansiyelinin nasıl kullanılabileceğine dair bir plana ihtiyacı vardır.
- **Hidrojen üretiminin maliyetleri, sosyal, ekonomik ve çevre açısından faydalarının ölçülmesi:** Yeşil hidrojenin kullanılabileceği birçok sektör mevcuttur. Kullanım alanlarının maliyet ve faydaları, Türkiye'nin enerji sistemini karbonsuzlaştırmak için diğer düşük karbonlu çözümlerle karşılaştırma da dâhil olmak üzere, sektör/uygulama düzeyinde karşılaştırılmalıdır. Yeşil hidrojenin yararları, hava kirleticisi emisyonların azaltılmasından, iklim değişikliğini önlenmesine olan katkısına kadar tüm faydalarıyla birlikte ele alınmalıdır. Enerjiyle ilgili CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik piyasa temelli mekanizmaların uygulanması, Türkiye'nin endüstriyel rekabet gücünü artıracaktır. Bu bulguların kömür ve diğer kaynaklardan hidrojen üretimiyle ilgili maliyet ve faydalarıyla da karşılaştırılmasına ihtiyaç vardır.

- **Yeşil hidrojenin enerji sistemi üzerindeki etkileri hakkında bilgi edinilmesi:** Mevsimsel depolamanın gerekliliği, yüksek oranda yenilenebilir enerjiye bağlı çalışan elektrik sistemlerin önündeki en büyük engeldir. Batarya depolama, elektrik sisteminin kısa vadedeki ihtiyaçları için çok daha yararlı olacaktır. Hidrojen depolama, hidrojen doğal gaz altyapısına ekonomik olarak entegre edilebildiği takdirde uygulanabilir bir seçenek olabilir.
- **Yerli bir hidrojen ekosistemi oluşturulması:** Türkiye'nin enerji politikası, yerli kaynakların yerli teknoloji ile kullanımına dayanmaktadır. Hidrojenin iş fırsatlarının sunduğu yerli bir hidrojen teknolojisi ve başlangıç ekosistemini oluşturmak, tüm ekonomi için fırsatlar yaratacaktır.
- **Türkiye'nin enerji dönüşüm stratejisinde, yeşil hidrojenin rolünün belirlenmesi:** Enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasında, yeşil hidrojen enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve elektrifikasyonu destekleyecektir; bu nedenle de teknoloji geliştirme ve uygulama, optimum lokasyon seçimi, maliyetler ve faydalar, endüstri dönüşüm fırsatları ve iş modelleri için bir zaman planıyla birlikte Türkiye'nin ulusal enerji ve iklim stratejileri bağlamında, yeşil hidrojen için bir strateji geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Frontier Economics (2018). The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels, Eylül 2018. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf
- Bennoua, S., Le Duigou, A., Quéméré, M.-M., & Dautremont, S. (2015). Role of hydrogen in resolving electricity grid issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23), 7231–7245. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.137>
- BMW (2020). The National Hydrogen Strategy, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Haziran 2020. https://www.bmbf.de/files/bmwi_Nationale%20Wasserstoffstrategie_Eng_s01.pdf
- Boenninghausen, D. (2019). DHL und Streetscooter entwickeln E-Transporter mit Brennstoffzelle. *Nutzfahrzeuge*. <https://www.electrive.net/2019/05/24/dhl-und-streetscooter-entwickeln-e-transporter-mit-brennstoffzelle>
- BOTAŞ. (2020). Doğal Gaz ve Petrol Boru Hatları Haritası. <https://www.botas.gov.tr/Sayfa/dogal-gaz-ve-petrol-boru-hatlari-haritasi/168>
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
- CDP (n.d.). The energy transition in Italy and the role of the electricity and gas sector, Cassa Depositi e Prestiti. https://download.terna.it/terna/The_Energy_Transition_8d752160d62f6a6.pdf
- COAG Energy Council (2019). Australia's National Hydrogen Strategy. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>
- DGEC & CEA (2018). Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, La Direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) et au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Haziran 2018. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2018.06.01_dp_plan_deploiement_hydrogene_0.pdf
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2020). “Enerjide Arama Buluşmaları”, Ocak 2020, Ankara. <https://boren.gov.tr/uploads/dosyaYoneticisi/479628-enerjide-arama-bulusmalari-hidrojen-program.pdf>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (n.d.-a). “Denge Tabloları”. <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (n.d.-b). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, <https://enerji.gov.tr/eigm>
- European Commission (2019). Hydrogen, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen_en
- GAZBİR-GAZMER Uluslararası İlişkiler Komisyonu (2020). “Doğal Gaz Sistemlerinde Hidrojene Geçiş : Avrupa Örneği”, Temmuz 2020. <http://www.gazmer.com.tr/dokumanlar/gazbir-gazmer-dogalgaz-sistemlerinde-hidrojene-gecis.pdf>

- Gielen, D., Saygin, D., Taibi, E., & Birat, J. (2020). Renewables based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(5), 1113–1125. <https://doi.org/10.1111/jiec.12997>
- Guinot, B., Montignac, F., Champel, B., & Vannucci, D. (2015). Profitability of an electrolysis based hydrogen production plant providing grid balancing services. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(29), 8778–8787. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.033>
- Gutiérrez-Martín, F., Ochoa-Mendoza, A., & Rodríguez-Antón, L. M. (2015). Pre-investigation of water electrolysis for flexible energy storage at large scales: The case of the Spanish power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(15), 5544–5551. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.184>
- Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council (2019). “The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells -Industry-academia-government action plan to realize a “Hydrogen Society””. https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002b.pdf
- Hydrogen Council (n.d.). <https://hydrogencouncil.com/en/>
- IEA (2019). “The Future of Hydrogen” International Energy Agency, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IEA (2020). “World Energy Outlook 2020” International Energy Agency, Ekim 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IRENA (2017). Biofuels for aviation: Technology brief, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf
- IRENA (2018). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf
- IRENA (2019a). Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf
- IRENA (2019b). Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf
- IRENA (2020a). Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 (Edition: 2020), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Nisan 2020. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf
- IRENA (2020b). Renewable Power Generation Costs in 2019, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf
- IRENA (2020c). Hydrogen from Renewable Power, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/energytransition/Power-Sector-Transformation/Hydrogen-from-Renewable-Power>

- IRENA (2020d). Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf
- IRENA (2020e). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- Muscolino, F., Martinis, A., Ghiglione, M., Duarte P. (2016). "Introduction to direct reduction technology and outlook for its use", La Metallurgia Italiana. http://www.aimnet.it/la_metallurgia_italiana/2016/aprile/Muscolino.pdf
- NIB (n.d.). The Green Hydrogen Economy in the Northern Netherlands, Northern Netherlands Innovation Board. https://www.ebnn-nieuw.nl/wp-content/uploads/2019/05/NIB-Hydrogen-Full_report.pdf
- Nikola Motor. (2019). "Hydrogen Advantages". <https://nikolamotor.com/hydrogen>
- O'Dell, J. (2018). "Toyota Unveils More Advanced Heavy-Duty Fuel Cell Truck Prototype". <https://www.trucks.com/2018/07/30/toyota-advanced-fuel-cell-truck>
- Özkadı, F. (2020). Carbon Border Adjustment Mechanism Potential Impacts on Turkey's Exports to EU, Mayıs 2020. https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/05/SHURA_Agora_BCA_Ozkadi.pdf
- Şanlı, B. (2019a). "Sürdürülebilir Doğal Gaz, Yakıt Piyasa Eşleşmeleri Ve Türkiye'ye etkileri, Ekim 2019." <http://barissanli.com/calismalar/2019/20191017-ingas.pdf>
- Şanlı, B. (2019b). "Python Ile Enerji Analizi." Enerji Depolama Simulasyonu, Mart 2019. <http://barissanli.com/python/depolama.php>
- Saygın, D. (2012). "Assessing industrial energy use and CO₂ emissions Opportunities for energy efficiency, biomass and CCS.
- Saygın, D. & Gielen, D. (yakında yayınlanacak). Zero emission pathway for the global chemical and petrochemical sector.
- Saygın, D., Gielen, D. J., Draeck, M., Worrell, E., & Patel, M. K. (2014). Assessment of the technical and economic potentials of biomass use for the production of steam, chemicals and polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1153–1167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.114>
- Saygın, D. & Şanlı, B. (2020). "Isıtma Sektöründe Yenilenebilir Enerjinin Rolü", Bilkent Enerji Politikaları Araştırma Merkezi, Ocak 2020. <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/09/Enerji-donusumunde-yerli-dogal-gazin-rolu.pdf>
- Saygın, D., Hoffman, M. & Godron, P. (2018). "How Turkey Can Ensure a Successful Energy Transition", Temmuz 2018. <https://www.americanprogress.org/issues/security/reports/2018/07/10/453281/turkey-can-ensure-successful-energy-transition/>
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2019a). "Türkiye enerji sektöründe fiyatlandırma ve piyasa dışı fon akışları", Mayıs 2019, İstanbul. https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/05/raporweb_ENG-.pdf

- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2019b). “Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri”, Aralık 2019, İstanbul. <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/10/Transport-sector-transformation-Integrating-electric-vehicles-into-Turkeys-distribution-grids.pdf>
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2020a). “Binalarda Çatı Üstü Güneş Enerjisi Potansiyeli - Türkiye’de Çatı Üstü Güneş Enerjisi Sistemlerinin Hayata Geçmesi için Finansman Modelleri ve Politikalar” Nisan 2020, İstanbul. https://www.shura.org.tr/binalarda_cati_ustu_gunes_enerjisi_potansiyeli-turkiyede_cati-ustu_gunes_enerjisi_sistemlerinin_hayata_gecmesi_icin_finansman_modelleri_ve_politikalar/
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2020b). “2030 yılına doğru Türkiye’nin optimum elektrik üretim kapasitesi”, Ağustos 2020, İstanbul. <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/09/ExecutiveSum.pdf>
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi & Agora Energiewende (2020). “The European Green Deal’s Border Carbon Adjustment: Potential impacts on Turkey’s exports to the European Union”, Mayıs 2020, İstanbul. https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2020/05/SHURA_Agora_Border_Carbon_Adjustment_Turkey_EU.pdf
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi & Buildings Performance Institute Europe (2019). “Enhancing Turkey’s policy framework for energy efficiency of buildings, and recommendations for the way forward based on international experiences”, Haziran 2019, İstanbul. <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/08/Buildings-Energy-Efficiency-Policy-Working-Paper-3.pdf>
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>
- TÇÜD. (2019). “Çelik Haritası”. <http://celik.org.tr/harita/>
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (2018). Tüm Üye Fabrikalar. https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye_fabrikalar
- U.S. DRIVE (2017). Hydrogen Production Tech Team Roadmap, Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy Sustainability. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/HPTT%20Roadmap%20FY17%20Final_Nov%202017.pdf
- Ulaştırma Bakanlığı (2015). “2003-2014 İstatistiklerle Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme”, Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ankara, s: 11, 18, 30, 41, 54, 56, 61, 106, 108.
- Weiss, W. & Spörk-Dür, M. (2020). “Solar Heat Worldwide Global Market Development and Trends in 2019 Detailed Market Data 2018” Mayıs 2020. <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf>
- World Bank (n.d.). “Manufacturing, value added (% of GDP) – Turkey”. <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?locations=TR>
- Yeşil Ekonomi (2020). “Türkiye’nin sera gazı emisyonları 2018’de geriledi”, Nisan 2020 <https://yesilekonomi.com/turkiyenin-sera-gazi-emisyonlari-2018de-geriledi/#:~:text=Türkiye%20İstatistik%20Kurumu%20tarafından%20yapılan,137%2C5%20oranında%20üstünde%20oldu.>

NOTLAR

İstanbul Politikalar Merkezi

İstanbul Politikalar Merkez (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 Arbuluculuk. 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 çıkarılara değil, iklim değişikliğiyle mücadeleye adanmıştır.



Evliya Çelebi Mh. Kibelezade
Sk. Eminbey Apt. No:16 K:3 D:4
34430 Beyoğlu / İstanbul
Tel: +90 212 243 21 90
E-mail: info@shura.org.tr
www.shura.org.tr

SHURA Kurucu Ortakları:

