

TÜRKİYE’NİN KARBONSUZLAŞMA SÜRECİNDE YENİLENEBİLİR HİDROJEN: ÖNCELİKLİ UYGULAMA ALANLARI VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Hakkında

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

Yazarlar: Hasan Aksoy, Rafet Yağız Çalışkan, Sena Serhadlıoğlu (SHURA), Emir Çolak (Agora Energiewende). Çalışmanın teknolojiler ile ilgili kısımlarına, Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi (MDBF) Dekan Yardımcısı Selmiye Alkan Gürsel liderliğinde Sabancı Üniversitesi Doktora öğrencileri Ahmet Can Kırlioğlu ve Büşra Çetiner katkı sağlamıştır.

Teşekkürler

Raporun hazırlanma sürecinde sağlamış oldukları değerli geri bildirimleri için SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Direktörü Alkım Bağ Güllü'ye teşekkür ederiz. Rapor kapsamında değerli görüş ve yorumlarını paylaşan Barış Sanlı, Dr. Değer Saygın (OECD) ve Prof. Dr. İskender Gökalp'e (ODTÜ) teşekkür ederiz. Raporun hazırlanması sürecinde sağlanan tüm değerli inceleme, geri bildirim ve görüşler için teşekkür ederiz.

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, BMWK'nin bu rapor için sağladığı cömert finansmana müteşekkirdir. Bu rapor, www.shura.org.tr sitesinden indirilebilir.

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

Tasarım

Tasarımhane Tanıtım Ltd. Şti.

Telif Hakkı © 2025 Sabancı Üniversitesi

Sorumluluk Reddi

Bu rapor ve içeriği, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş kabuller, senaryolar ve Haziran 2024 sonu itibarıyla mevcut olan piyasa koşulları doğrultusunda hazırlanmıştır. Bu kabullerin, senaryolar ve piyasa koşullarının değişime açık olması nedeniyle, rapor kapsamındaki gelecek dönem öngörülerinin, gerçekleşecek sonuçlarla aynı olacağı garanti edilemez. Bu raporun hazırlanmasına katkı yapan kurum ya da kişiler, raporda sunulan öngörülerin gerçekleşmemesi ya da farklı şekilde gerçekleşmesinden dolayı oluşabilecek ticari kazanç ya da kayıplardan sorumlu tutulamazlar.

**TÜRKİYE’NİN
KARBONSUZLAŞMA
SÜRECİNDE
YENİLENEBİLİR
HİDROJEN:
ÖNCELİKLİ UYGULAMA
ALANLARI VE POLİTİKA
ÖNERİLERİ**



İÇİNDEKİLER

Şekil Listesi	4
Tablo Listesi	6
Kısaltmalar	7
Ana Mesajlar	9
1. Giriş	10
2. Hidrojen Stratejileri, Politikaları ve Destek Mekanizmaları	16
2.1. Mevcut durum	17
2.2. Hidrojen piyasasının oluşturulması	20
2.2.1. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)	21
2.2.2. Avrupa Birliği (AB)	21
2.2.3. Diğer ülkeler	22
2.3. Hidrojenin gelişiminde önemli noktalar	23
3. Hidrojen Teknolojileri ve Son Kullanım Sektörlerinde Hidrojen Kullanımı	25
3.1. Hidrojen ve türevlerinin üretim teknolojileri	26
3.1.1. Fosil yakıtlara dayalı hidrojen üretim teknikleri	26
3.1.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretim teknikleri	28
3.1.3. Amonyak ve metanol üretimi	30
3.2. Hidrojen depolama teknolojileri	31
3.2.1. Fiziksel teknikler	31
3.3. Hidrojenin taşınması	32
3.4. Hidrojen kullanım alanları	35
3.4.1. Ulaşım sektörü	35
3.4.2. Endüstriyel süreçler	35
3.4.3. Doğal gaz ile hidrojeni karıştırma	36
3.4.4. Elektrik sistemi	36
3.4.5. Hidrojen değer zinciri	38
4. Uluslararası İyi Uygulamalar	40
4.1. Sanayi	41
4.1.1. Demir-çelik sektörü	41
4.1.2. Çimento sektörü	41
4.1.3. Kimya ve petrokimya sektörü	42
4.1.4. Gübre sektörü	42
4.1.5. Cam sektörü	43
4.1.6. Seramik sektörü	43

4.2. Ulaştırma	44
4.2.1 Karayolu taşımacılığı	44
4.2.2 Denizyolu taşımacılığı	44
4.2.3 Havayolu taşımacılığı	45
5. Türkiye’de Hidrojenin Sektörel Kullanımı	46
5.1. Sanayi	48
5.1.1 Demir-çelik	48
5.1.2 Çimento	52
5.1.3 Kimya ve petrokimya	60
5.1.4 Cam	66
5.1.5 Seramik	68
5.2. Ulaştırma	71
5.2.1 Karayolu taşımacılığı	71
5.2.2 Denizyolu taşımacılığı	75
5.2.3 Havayolu taşımacılığı	79
5.3. Elektrik üretimi için uzun vadeli hidrojen depolama	83
5.4. Doğal gaz şebekesinde hidrojen kullanımı	87
6. Fayda-Maliyet Analizi	90
6.1. Sanayi sektörü	92
6.1.1 Demir-çelik sektörü	93
6.1.2 Kimya sektörü	95
6.1.3 Çimento-cam-seramik sektörleri	98
6.2. Elektrik sektörü	100
6.3. Ulaşım sektörü	102
7. Türkiye’de Yenilenebilir Hidrojen Gelişimi İçin Politika Önerileri ve Analizin Temel Çıktıları	104
Kaynakça	111
Ekler	131
Ek 1. Hidrojenin son kullanım sektörlerindeki rolü	131
Ek 1-1. Ulaşım sektörü	131
Ek 1-1-1. Binek araçlar (Otomotiv)	131
Ek 1-1-2. Otobüs	132
Ek 1-1-3. Ağır yük taşımacılığı	132
Ek 1-1-4. Tren	133
Ek 1-1-5. Denizyolu taşımacılığı	133
Ek 1-1-6. Havayolu taşımacılığı	135
Ek 1-2. Endüstriyel süreçler	136
Ek 1-2-1. Petrol rafinerileri ve petrokimyasallar	136
Ek 1-2-2. Metal sanayisi ve malzeme işleme	137
Ek 2. Dönüşüm faktörleri ve katsayılar	141

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Son kullanım sektörlerinde hidrojen uygulamaları	12
Şekil 2. Türkiye’nin ulusal H ₂ hedeflerine göre elektrolizörlerin elektrik talebi	14
Şekil 3. Türkiye (Batı bölgeleri) ve AB için yeşil ve mavi H ₂ maliyetleri	18
Şekil 4. Mayıs 2024 itibarıyla duyurulan ulusal hidrojen stratejileri	20
Şekil 5. Hidrojen piyasası gelişimi için düzenleyici çerçeve örneği	21
Şekil 6. Kaynaklara göre hidrojen üretim yöntemleri	26
Şekil 7. SMR yöntemiyle hidrojen üretiminin şematik gösterimi	27
Şekil 8. Ototermal dönüşüm yöntemiyle hidrojen üretimi kavramsal şeması	27
Şekil 9. Hidrojen depolama yöntemleri – Fiziksel ve malzeme bazlı depolama teknikleri	31
Şekil 10. Gelecekteki hidrojen gazı boru hattı sistemi	33
Şekil 11. Farklı enerji depolama teknolojilerinin enerji depolama kapasitesi ve boşaltma süresi oranı	37
Şekil 12. Yeraltı hidrojen depolama alanlarının kapasite ve deşarj süreleri	38
Şekil 13. Hidrojen değer zinciri	39
Şekil 14. Çelik üretimi sürecinin akış şeması	41
Şekil 15. Küresel ölçekte enerji sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının payları	47
Şekil 16. Enerji kaynaklı CO ₂ emisyonlarının sektörel alt kırılımı	47
Şekil 17. Teknoloji bazında çelik üretim metodları	48
Şekil 18. Türkiye çelik sektörüne genel bakış	50
Şekil 19. Türkiye demir-çelik sektörünün toplam enerji tüketimi (2022)	50
Şekil 20. Türkiye’de bulunan çelik üretim tesislerinin konumları	51
Şekil 21. Çimento üretim prosesi	54
Şekil 22. Çimento sektörünün küresel ölçekte enerji kaynak dağılımı (2022)	54
Şekil 23. Türkiye’de bulunan çimento fabrikalarının illere göre dağılımı	55
Şekil 24. Türkiye’nin çimento üretim ve tüketim seviyeleri (2018-2023)	56
Şekil 25. Sanayi alt sektörlerin fosil yakıt tüketimindeki payları (2022)	56
Şekil 26. Yakıt bazında Türkiye çimento sektörünün enerji tüketimi (2018-2022)	57
Şekil 27. Türkiye çimento sektörü kaynaklı karbon emisyonları (2000-2021)	58
Şekil 28. Türkiye çimento sektöründe biyokütle tüketimi (2008-2022)	59
Şekil 29. Kimya sanayisinin küresel toplam enerji tüketimi (2015-2022 gerçekleşen; 2030 tahmini)	60
Şekil 30. Türkiye kimya sektöründe enerji tüketimi (2022)	62
Şekil 31. Türkiye kimya sektörünün toplam karbon emisyonları (1990 - 2021)	62
Şekil 32. Bölgeler bazında küresel gübre kullanımı (2020)	63
Şekil 33. Gübre fiyatları (ABD\$/Mt) (2016-2022)	64
Şekil 34. Türkiye’deki gübre fabrikalarının konumları	65
Şekil 35. Türkiye’nin yıllara sari gübre ithalatı harcaması (2018-2023)	66
Şekil 36. Cam sektöründe hidrojenin temel uygulamaları	67
Şekil 37. Avrupa seramik sektörünün emisyon kaynakları (2020)	69
Şekil 38. Türkiye seramik sektörünün ihracat performansı (2018-2022)	70
Şekil 39. Türk seramik sektörünün enerji tüketiminin yakıt cinsine göre dağılımı (2022)	71
Şekil 40. Küresel düzeyde karayolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonları (2010-2022)	72

Şekil 41. Türkiye'deki karayolu taşımacılığı kaynaklı CO ₂ emisyonları (2010-2021)	73
Şekil 42. Trafiğe kaydı yapılan otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı (2023)	74
Şekil 43. Türkiye'de son 11 yıl içerisindeki trafiğe kaydı yapılan a) elektrikli ve b) hibrit araçların sayısı	74
Şekil 44. Denizyolu taşımacılığında petrol bazlı fosil yakıt tüketimi	76
Şekil 45. Küresel bazda denizyolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonları	76
Şekil 46. Küresel denizyolu taşımacılığının enerji tüketimi (2030 yılı projeksiyonu)	78
Şekil 47. Türkiye denizyolu taşımacılığının enerji tüketimi	78
Şekil 48. Türkiye denizyolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonları	79
Şekil 49. Havayolu taşımacılığında yenilenebilir hidrojenin farklı kullanım alanları	80
Şekil 50. Havalimanlarına kurulması öngörülen yenilenebilir hidrojen ekosistemi	81
Şekil 51. Türk havayolu taşımacılığında yıllara sari petrol ürünleri kullanımı	82
Şekil 52. Türkiye'de havayolu taşımacılığından kaynaklanan karbon emisyonları	82
Şekil 53. Aylara sari güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretimi (2023)	84
Şekil 54. Aylara sari doğal gaz tüketimi (2023)	84
Şekil 55. Farklı teknolojiler için seviyelendirilmiş hidrojen depolama maliyeti	86
Şekil 56. Yenilenebilir elektrik kaynaklı farklı ısıtma sistemlerinin verimlilik karşılaştırması	88
Şekil 57. Sanayide yenilenebilir hidrojen kullanımının belirlenen dönemlere göre hesaplanan kümülatif fayda ve maliyetleri	92
Şekil 58. Sanayi alt sektörlerinde belirlenen dönemlere göre öngörülen kümülatif karbon azaltım projeksiyonları	93
Şekil 59. Demir-çelik sektöründe (EAF ve entegre tesisler) yenilenebilir hidrojen kullanımının dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet tutarları	94
Şekil 60. Demir-çelik sektöründe 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltım projeksiyonları	95
Şekil 61. Kimya (Petrokimya ve Gübre hariç) sektörünün dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi	96
Şekil 62. Kimya (Petrokimya ve gübre hariç) sektöründe 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltımı	96
Şekil 63. Gübre ve petrokimya (toplam) sektörlerinin dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi	97
Şekil 64. Gübre ve petrokimya (toplam) sektörlerinde 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltımı	98
Şekil 65. Çimento-Cam-Seramik sektörlerinin dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi	99
Şekil 66. Çimento-Cam-Seramik sektörlerinde kaçınılan toplam karbon emisyonu projeksiyonları - 5 yıllık periyotlar halinde ve 2030-2053 döneminde toplam	99
Şekil 67. Yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin sektörel olarak kullanımları (2053)	100
Şekil 68. Elektrik sektöründe 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltımı projeksiyonu	101
Şekil 69. Elektrik sektörünün dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi	101
Şekil 70. Ulaşım sektörünün dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi	102
Şekil 71. Ulaşım sektöründe 5 yıllık periyotlarda toplam karbon emisyonu azaltımı ve 2030-2053 yılları arasındaki kümülatif karbon azaltım projeksiyonları	103

Şekil 72. Türkiye’deki yenilenebilir hidrojen uygulamaları için önerilen öncelikli alanlar	106
Şekil 73. Yakıt hücresel araçların çalışma prensibi şeması	131
Şekil 74. Yeşil amonyak üretimi ve kullanım alanları	134
Şekil 75. Yenilenebilir hidrojen ve atmosferik karbondioksitten sentetik kerosen üretimi	135
Şekil 76. Yüksek fırın (BF) ve hibrit yöntemlerle çelik üretiminin karşılaştırması	138
Şekil 77. Çimento üretim süreci aşamalarında salınan karbon emisyon miktarları	140

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Tanker aracılığıyla hidrojen taşınmasının maliyetleri	34
Tablo 2. Hidrojenin taşınma seçeneğine (boru hattı ve tankerler) göre maliyetleri (ABD\$/kgH ₂) karşılaştırması	34
Tablo 3. Karayolu taşımacılığı kaynaklı yakıt ve altyapı projeksiyonları	72
Tablo 4. Hidrojen depolama türüne göre maliyetler	83
Tablo 5. Kullanılan enerji kaynağı bazında üretilen 1 GWh enerji başına salınan karbon (CO ₂) miktarı	141
Tablo 6. Elektrik sektörü, sanayi ve enerji üretimi için dikkate alınan karbon fiyatları	141
Tablo 7. Enerji kaynakları bazında fiyat projeksiyonu	141
Tablo 8. Bir GWh enerji üretimi için gereken yakıt miktarları	141
Tablo 9. Bir kg hidrojenin (H ₂) LCOH ve enerji değeri	142
Tablo 10. Bir galon benzin ve dizel yakıtından kaynaklı salınan CO ₂ miktarı	142

KISALTMALAR

AA	Anadolu Ajansı
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABD\$	Amerika Birleşik Devletleri Doları
AEM	Anyon Değişim Membranı (Anion Exchange Membrane)
Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
BEV	Bataryalı elektrikli araçlar (Battery electric vehicles)
BF	Yüksek fırın (Blast furnace)
BOF	Bazik oksijen fırını (Basic oxygen furnace)
CAGR	Yıllık Bileşik Büyüme Oranı (Compound Annual Growth Rate)
CAPEX	Yatırım maliyeti (Capital Expenditure)
CCUS	Karbon yakalama, kullanma ve depolama (Carbon capture, usage and storage)
CCfD	Karbon Fark sözleşmesi (Carbon Contract for Difference)
CH ₃ OH	Metanol
cm	Santimetre
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
CO ₂ e	Karbondioksit eşdeğeri
DAC	Doğrudan hava yakalama (Direct air capture)
DRI	Doğrudan indirgenmiş demir (Direct reduced iron)
EAF	Elektrik ark ocağı (Electric arc furnace)
EPDK	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FCEV	Yakıt hücresel elektrikli araçlar (Fuel cell electric vehicles)
FTS	En iyi Teknolojiler Senaryosu (Frontier Technologies Scenario)
GHG	Sera gazı emisyonları (Greenhouse gas emissions)
GMKA	Güney Marmara Kalkınma Ajansı
Gt	Gigaton
GW	Gigavat
H ₂	Hidrojen
ICE	İçten yanmalı motor (Internal combustion engine)
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IF	İndüksiyon fırını (Induction furnace)
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency)
K	Kelvin
kg	Kilogram
km	Kilometre
kt	Kiloton
kW	Kilovat
LCOE	Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost of Electricity)
LCOH	Seviyelendirilmiş Hidrojen Maliyeti (Levelized Cost of Hydrogen)
LCP	Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu (Low Carbon Pathway Scenario)

LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquid natural gas)
Mt	Milyon ton
MW	Megavat
NH ₃	Amonyak
O ₂	Oksijen
°C	Santrigrat derece
PEM	Proton Değişim Membranı (Proton Exchange Membrane)
PHEV	Plug-in hibrit araçlar (Plug-in hybrid electric vehicles)
PV	Fotovoltaik
SMR	Buhar-metan reformasyonu (Steam-methane reforming)
SOEC	Katı Oksit Elektrolizör Hücreleri (Solid Oxide Electrolyzer Cells)
SPS	Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu (Stated Policy Scenario)
Tep	Ton eşdeğer petrol
Tf³	Trilyon fit küp
TWh	Teravat-saat
UHS	Yeraltı Hidrojen Depolama (Underground Hydrogen Storage)

Ana Mesajlar

- Yenilenebilir hidrojen teknolojisiyle ilgili araştırma ve geliştirme süreçlerinin devam etmesi ve verimlilik gibi faktörler dikkate alındığında, kısa-orta vadede yenilenebilir hidrojenin sınırlı miktarda kullanılacağı öngörülmektedir. Bu sebeple, üretilecek hidrojenin en verimli şekilde katma değeri yüksek sektör ve uygulamalar için kullanımının önceliklendirilmesi gerekmektedir. Yaratılan katma değer ve Türkiye sanayisinin öncelikleri doğrultusunda, kısa ve orta vadede hidrojenin özellikle yeşil amonyak (gübre), demir-çelik, kimya ve petrokimya (rafineriler dahil) sektörlerinde kullanılması öne çıkmaktadır. Orta ve uzun vadede ise cam ve seramik sektörleri ile uzun mesafe taşımacılığında kullanımının önceliklendirilmesi faydalı olacaktır.
- Karbonsuzlaşması zor sektörlerde fosil yakıtların yerine yenilenebilir hidrojenin kullanılması, Türkiye’nin ithal yakıt bağımlılığını azaltmada ve 2053 yılı hedefi olan net sıfır emisyonlu bir ekonomiye geçişte önemli katkılar sağlayabilir. Yapılan analizlere göre, 2053 yılına kadar yenilenebilir hidrojenin sektörel kullanımıyla yaratılacak toplam fayda 130 milyar Amerika Birleşik Devletleri Doları’nı bulmaktadır. Bununla birlikte, yenilenebilir hidrojenin kullanımı ilgili sektörlerde toplamda 1.025 Mt CO₂ emisyon azaltımı sağlayabileceği projekte edilmiştir.
- Doğrudan elektrifikasyonun net sıfır karbon emisyonlu bir ekonomiye geçişte yetersiz kaldığı sektörlerde, yenilenebilir hidrojen ve türevlerine yönelik talebin teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, sektöre özel hedefler ve kotalar belirlenerek yenilenebilir hidrojen kullanımına ilişkin talep yaratılabilir. Bu yaklaşım, özellikle sanayinin yenilenebilir hidrojen yatırımlarını destekleyecek ve bu teknolojinin sanayi sektörüne entegrasyonunu hızlandıracaktır.
- Hidrojen ekosisteminin oluşturulmasında, vergi teşviklerinin yanı sıra, yenilenebilir hidrojenin kullanımı ve taşınmasında kritik bir rol oynayacak havalimanı ve liman altyapılarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu yatırımların zamanında ve etkin bir şekilde tamamlanabilmesi için doğrudan finansal desteklerin sağlanması, ayrıca altyapı yatırımlarına yönelik vergi indirimleri veya sübvansiyonların uygulanması faydalı olacaktır.
- Yenilenebilir hidrojenin güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi için üretim, depolama, taşıma ve tüketim süreçlerinde sorumlulukların uluslararası standartlar da dikkate alınarak net bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu sayede, hidrojenin ihraç edilmesi durumunda tüm ilgili ülkelerde aynı standartların uygulanması mümkün hale gelecektir. Böyle bir yaklaşım, Türkiye’nin gelecekte yenilenebilir hidrojen ihracatçısı olma potansiyelini de destekleyecek ve uluslararası piyasada rekabet gücünü artıracaktır.
- Yenilenebilir hidrojene yönelik idari izin süreçlerini ve ilgili destek mekanizmalarını düzenlemek, sektörler arası üretim ve gelişim planlarını koordine etmek amacıyla bir kamu biriminin oluşturulması önerilmektedir. Bu yapı, yenilenebilir hidrojen ekosisteminin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayarak sektörler arası iş birliğini güçlendirecek ve gerekli düzenlemelerin hızlı bir şekilde hayata geçirilmesini destekleyecektir.



BÖLÜM 1

Giriş

Paris İklim Anlaşması’na taraf ülkeler, küresel iklim hedefleri doğrultusunda net sıfır emisyonlu bir ekonomiye ulaşmak için stratejilerini oluşturmakta ve bu stratejileri küresel gelişmelere göre güncellemektedir. Bu bağlamda Türkiye, ilk olarak Temmuz 2021 tarihinde Yeşil Mutabakat Eylem Planı’nı duyurmuş, ardından Ekim 2021’de Paris Anlaşması’na taraf olarak, 2053 yılına kadar net sıfır karbon emisyonlu bir ekonomiye geçiş hedefini taahhüt etmiştir. Bu gelişmelerle birlikte Türkiye, iklim ve enerji politikalarını enerji dönüşümü doğrultusunda yeniden şekillendirmeye başlamıştır.

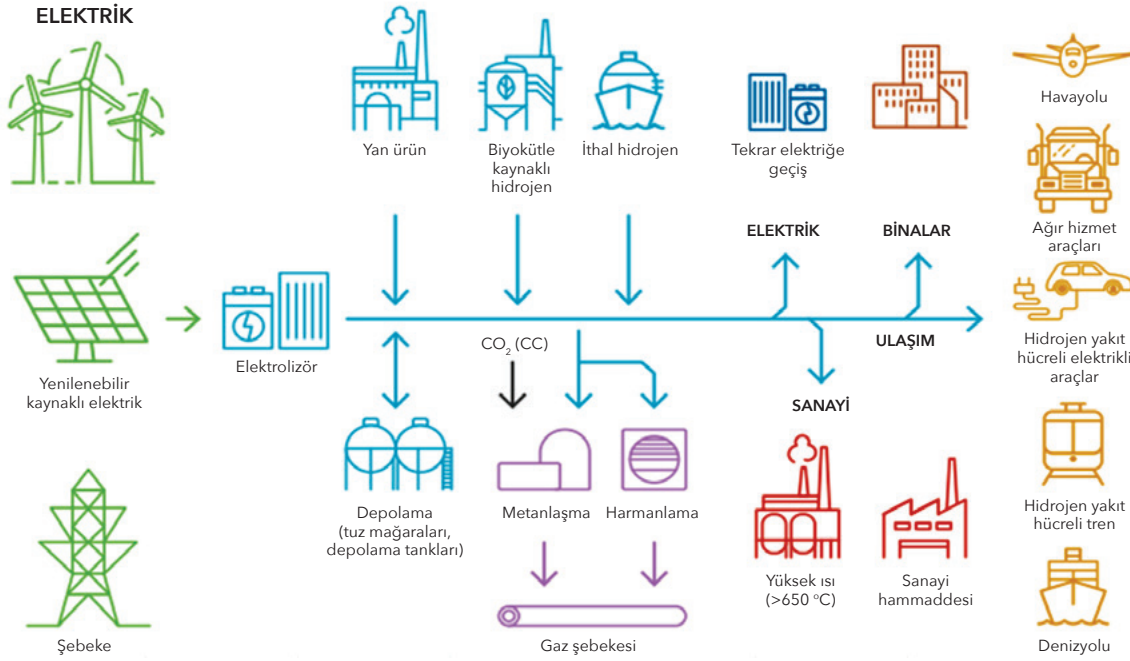
SHURA’nın Şubat 2023 tarihinde yayınladığı “Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası” çalışmasında da, Türkiye’nin 2053 net sıfır emisyon hedefine ekonominin tüm sektörlerini kapsayan kapsamlı bir dönüşüm ile ulaşabileceği gösterilmektedir. Ekonominin büyümeye devam etmesi ve refahtan feragat etmeden karbon emisyonlarını net sıfır seviyesine indirmede, enerji verimliliğinin ve elektrifikasyonun tüm sektörlerde azami seviyelere çıkarılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonun hızlanması ve yeni teknolojilerin son kullanım sektörlerine entegrasyonu ve kullanımını içeren bütüncül bir stratejinin kullanılması gerekmektedir. SHURA Net Sıfır 2053 çalışmasının temel çıktılarına göre, doğrudan elektrifikasyonla karbonsuzlaşması zor olan son kullanım sektörlerinde yenilenebilir (yeşil) hidrojen ve türevlerinin kullanımı kritik öneme sahiptir. Model sonuçlarına göre 2053 yılında toplam enerji talebinin %15’i yenilenebilir hidrojen ve türevleri tarafından karşılanmaktadır. 2053 yılına kadar bu miktarlarda yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin üretimi için yaklaşık 70 gigavat (GW) elektrolizör kapasitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece doğrudan elektrifikasyonla karbonsuzlaşması zor sektörlerin dönüşümü sağlanabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu, elektrifikasyon ve enerji verimliliği emisyonların azaltılmasında ana stratejiler olsalar da, karbonsuzlaşması zor sektörler için yeni stratejiler ve teknolojilere ihtiyaç olacaktır. Diğer taraftan, elektrik sisteminde yenilenebilir enerji payı arttıkça, sistemin esnekliğinin artması gerekmektedir. Sistem esnekliğini artırmada dikkate alınabilecek önemli bir strateji, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen ihtiyaç fazlası elektriğin yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin (amonyak, metanol vb.) üretiminde kullanılmasıdır. Bu yolla üretilen yenilenebilir hidrojen ve türevleri, karbondan arındırılması zor sektörlerde alternatif yakıt kaynağı olarak kullanılabilir. Böylelikle, hem karbon emisyonları azalabilir hem de elektrik sistemi esnekliği artabilir. Üretilen bu enerji taşıyıcıları büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlı ulaşım ve sanayi sektörlerinin karbonsuzlaşmasında rol oynayabilirler. Bu süreçte, yenilenebilir hidrojen üretiminin doğrudan elektrifikasyon uygulamaları ile rekabet etmemesi oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde payının artması elektrik sektörünün karbonsuzlaşması için elzemdir. Dolayısıyla, yenilenebilir hidrojen üretim sürecinde halihazırda var olan yenilenebilir enerji santrallerinden yararlanmak yerine, yeni yenilenebilir enerji santrallerinin kurulması (additionality prensibi) önemli olacaktır.

Sanayi ve uzun mesafe ulaşım sektörleri, doğrudan elektrifikasyon için sınırlı fırsatlar sunmaktadır. Örneğin, sanayi sektörünün yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle elektrifikasyon stratejisi tek başına yeterli kalmamakta ve kimyasal süreçlerden kaynaklı emisyonlar nedeniyle de net sıfır karbon emisyon seviyesine ulaşamamaktadır. Demir-çelik, çimento ve kimya gibi sektörlerde enerji yoğun süreçler büyük ölçüde sera gazı emisyonuna neden olmaktadır. Bu bağlamda,

yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen hidrojen ve türevleri, bu sektörlerde hammadde ve/veya fosil yakıt ikamesi için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Kısacası hidrojen, doğrudan elektrifikasyonun emisyonları azaltmada yetersiz kaldığı son kullanım sektörlerinde kullanılarak, tüm ekonominin karbonsuzlaştırılmasında kritik ve tamamlayıcı bir strateji işlevi görmektedir.

Şekil 1. Son kullanım sektörlerinde hidrojen uygulamaları



Kaynak: IRENA (2019)

Yenilenebilir hidrojen ve türevleri yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde yakıt ya da hammadde olarak kullanılabilir. Örneğin, mevcut demir-çelik üretim teknolojileri önemli miktarda kömür ve doğal gaz kullanımı gerektirmektedir. Ancak, doğrudan indirgenmiş demir (direct reduced iron, DRI) süreçlerinde indirgeyici (reducing agent) olarak yenilenebilir hidrojen kullanılırsa, sektörün genel karbon ayak izi de azalacaktır (Bhaskar ve diğerleri, 2020). Çimento sektörü dikkate alındığında, yenilenebilir hidrojenin kalsinasyon ve yakıt yakma işlemlerinde kullanılmasıyla karbon emisyonları büyük ölçüde azaltılabilir. Cam sektöründe, yüksek sıcaklık gerektiren eritme süreçlerinde yakıt olarak hidrojen kullanmak mümkündür. Yenilenebilir hidrojen ayrıca kimya sanayisinde ham petrol kullanımının yerini alabilir. Ek olarak hidrojen, üretilen azotlu gübrelerin üretiminde birincil hammadde olan amonyak (NH_3) üretimi için de temel bir hammadde. Mevcut durumda amonyak üretiminde kullanılan temel hammadde, doğal gaz ile elde edilen hidrojendir. Bu durum, amonyak üretim sektörünü uluslararası gaz fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı savunmasız bırakmakta ve sera gazı salımına yol açmaktadır. Hidrojenin doğal gazın yerini alması durumunda ise, gübre sektörü sürdürülebilirliğine katkıda bulunabilir ve küresel gıda fiyatlarına olumlu etki sağlanabilir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) analizlerine göre küresel hidrojen projelerinin yaklaşık %80'i amonyak üretmeyi amaçlamaktadır.

(IEA, 2023). Bu durum, önümüzdeki süreçte gübre sektörünün karbonsuz bir hammadde kullanımına geçişi işaret etmektedir.

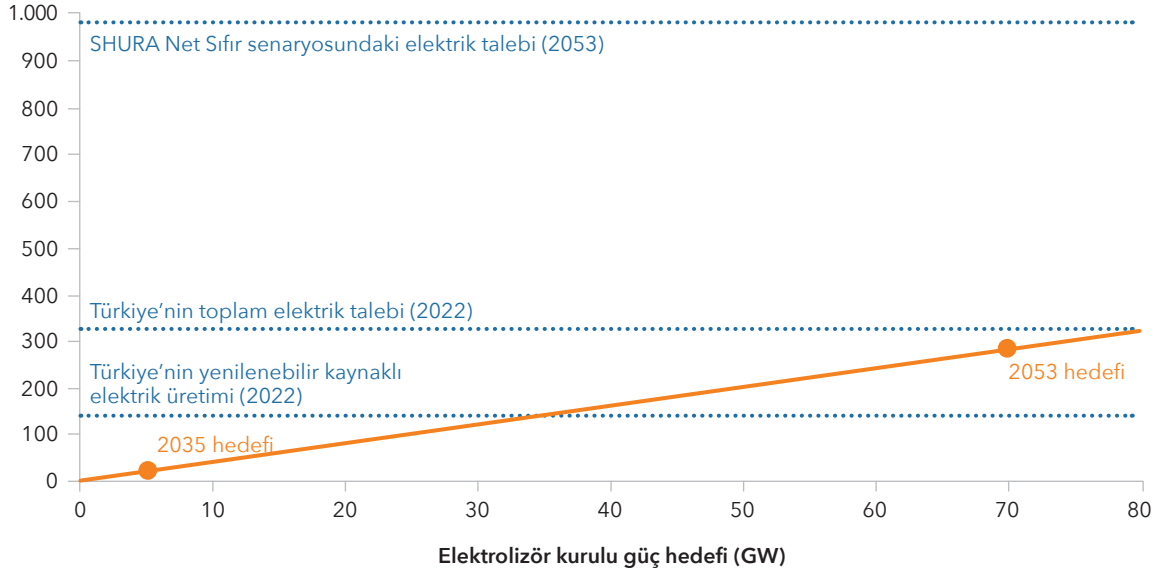
Hidrojenin çeşitli kullanım alanları göz önüne alındığında, ileride oluşacak hidrojen talebini karşılamak için büyük yatırımlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, hidrojen ekonomisinin hızlanması, yatırımcılara öngörülebilir ve pozitif bir piyasa ortamı sağlanması için bütüncül politikaların oluşturulması gerekmektedir. Türkiye’de hidrojenle ilgili orta-uzun vadeli hedefleri ve stratejileri belirleyen Türkiye Ulusal Enerji Planı (UEP) ve Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası Ocak 2023’te yayınlanmıştır.

UEP kapsamında 2035 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçteki payı %64,7’ye ve elektrik üretimindeki payının da %54,8’e ulaşması hedeflenmektedir. UEP’nin orta vadeli projeksiyonlarında 2035 yılına kadar elektrolizör kapasitesinin 5 GW olması hedeflenmektedir (ETKB, 2022). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası’nda ise 2053 yılına kadar yenilenebilir hidrojen konusunda Türkiye’nin izleyeceği bir yol haritası sunulmuştur. Hidrojen yol haritasında, yenilenebilir hidrojen için niceliksel hedefler sunulmakla kalmamış, aynı zamanda Türkiye’nin uzun vadeli vizyonu ve uygulanması planlanan genel politika önerileri de açıklanmıştır. Yol haritasında, 2030, 2035, 2053 yılları için elektrolizör kapasite hedeflerinin sırasıyla 2 GW, 5 GW, 70 GW olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, 2035 yılına kadar yenilenebilir hidrojen üretim maliyetinin 2,4/kgH₂ ABD Doları’nın (ABD\$) altında ve 2053 yılına kadar da 1,2/kgH₂ ABD\$ altında olmasının hedeflendiği görülmektedir (ETKB, 2023).

2053 yılı itibarıyla, Türkiye’de elektrolizörlerin ortalama kapasite faktörünün yaklaşık %50 olacağı varsayıldığında, hidrojen ve türevlerini üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi gereken yıllık elektrik miktarı yaklaşık 280 TWh’tir (Şekil 2). Yenilenebilir hidrojen üretimi için yalnızca elektrolizörlerin kurulumu değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji yatırımları ve ilgili altyapının iyileştirilmesi de gerekmektedir. Bu bağlamda, hidrojenin kullanılacağı öncelikli sektörlerin belirlenmesi ve uygulamalara yönelik sektörel strateji yol haritalarının geliştirilmesi önemli olacaktır.

Yenilenebilir hidrojen üretimine ek olarak, amonyak (NH₃) ve metanol (CH₃OH) gibi hidrojen türevi enerji taşıyıcıların da üretilmesi hedeflenmektedir. 2022 yılında Türkiye’nin toplam dış ticaret açığının %73’ü¹ enerji kaynaklı olduğundan yenilenebilir enerjiden azami seviyelerde yararlanılması, Türkiye’nin enerji arzını desteklerken, dış ticaret açığının azaltılmasına da katkıda bulunacaktır. Yenilenebilir hidrojen üretim sürecinde kullanılacak elektrolizör teknolojisinin yerli olarak üretimi ile yenilenebilir hidrojenin ilgili sektörlerde kullanım adaptasyonunu artıracak ve teknoloji ithalının önüne geçecektir. Bu noktada, yenilenebilir hidrojen üretiminde öncelikle elektrolizörün belirli parçalarının Türkiye’de üretimi, sektörel birikim ve insan kaynağı yetiştirilmesine öncelik verilebilir.

¹ TÜİK, 2023. Dış Ticaret İstatistikleri, Aralık 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Aralik-2022-49633>

Şekil 2. Türkiye’nin ulusal H₂ hedeflerine göre elektrolizörlerin elektrik talebi**Elektrolizörlerin yenilenebilir kaynaklı elektrik talebi (TWh)**

Elektrolizör hedefleri “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” dökümanından alınmıştır. Analizde, elektrolizör kapasite faktörü %45 olarak kabul edilmiştir.

Kaynak: Agora Energiewende

Yenilenebilir hidrojen arz ve talebine yönelik yatırımları hızlandırmak için “Hidrojen Vadisi” (hidrojenhub) kurulumları başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir. Hidrojen vadisi; hidrojenin üretim, depolama, taşıma ve nihai kullanımını yani değer zincirinin tamamını kapsayan bir alandır. Mevcut durumda, dünya genelinde 34 ülkede 89 hidrojen vadisi bulunmaktadır. Türkiye’nin ilk ‘Hidrojen Vadisi’ “Güney Marmara Hidrojen Kıyısı - HYSouthMarmara Projesi” kapsamında Güney Marmara Bölgesi’nde kurulacaktır. Proje kapsamında Avrupa Komisyonu’ndan 7,5 milyon EUR hibe alınmış olup, projenin 5 yıl içinde tamamlanması beklenmektedir. Projenin hedefleri arasında yıllık 500 ton H₂ (500 tH₂/yıl) üretimi de bulunmaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

Bu pilot projelerle hidrojen endüstrisi ivme kazanırken, 2053 yılına kadar net sıfır karbon emisyon hedefine ulaşmak için yatırımların artması esastır. Hidrojen ve türevlerinin üretimine odaklanan küresel yatırımlar dikkate alındığında, yatırım hacminin oldukça sınırlı olduğu ve birçok projenin nihai yatırım kararı aşamasında bulunduğu görülmektedir. IEA, hidrojenle ilgili yatırımların yavaş ilerlemesinin çeşitli nedenleri olduğunu belirtmektedir (IEA, 2022).

Başlıca nedenler şunlardır:

- Talepteki belirsizlikler,
- Düzenleyici çerçevelerin eksikliği,
- Hidrojenin üretilen alandan tüketim alanlarına ulaştırılmasında gereken altyapının yetersizliği.

SHURA, 2021 yılında Türkiye’de enerji dönüşümünde hidrojenin rolünü analiz eden ve Türkiye’de benimsenmesi gereken ulusal hidrojen stratejisi için stratejik öncelik alanlarını belirlemeyi amaçlayan ‘Türkiye’nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları’ çalışmasını yayınlanmıştır. 2022 yılında ise ‘Türkiye’nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi’ başlıklı SHURA raporu yayınlanmıştır. Rapor, yenilenebilir hidrojen üretimi, yurt içi kullanımı ve olası ihracat potansiyelleri hakkında genel bir analiz sunmaktadır. SHURA analizinde, 2050 yılına kadar Türkiye’de yenilenebilir enerji kullanımı ve maliyet etkin yatırımların teşvik edildiği politikalarla birlikte, yıllık 3,4 milyon ton (Mt) yenilenebilir hidrojen (3,4 Mt H₂/yıl) üretilebileceği hesaplanmaktadır. Ayrıca, iç talep haricinde yaklaşık 1,5 Mt H₂ ile 1,9 Mt H₂ arasında bir ihracat potansiyelinin elde edilebileceği de ortaya koyulmuştur. İlgili analiz, 2053 net sıfır emisyonlu bir ekonomiye geçiş hedefinden önce yürütülmüş olup, bu doğrultuda yurt içi hidrojen talebinin tekrar hesaplanmasını gerektirmektedir. SHURA Net Sıfır 2053 raporu kapsamında yürütülen analizlerde ise, 2053 yılında oluşacak toplam enerji talebinin %15’inin yenilenebilir hidrojen ve diğer e-yakıtların üretiminde kullanılacağı modellenmiştir (SHURA, 2023).

Önceki çalışmalar değerlendirildiğinde, yenilenebilir hidrojenin karbonsuzlaşması zor sektörler için önemli bir enerji taşıyıcısı ve hammadde olduğu, bununla birlikte maliyetinin henüz istenen seviyelere gelmediği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, tüm bu gelişmeler ışığında yenilenebilir hidrojenin ilk aşamalarda hangi sektörlerde ve ne amaçla kullanılacağı cevaplanması gereken en önemli konuların başında gelmektedir. Bu çalışma, Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin son tüketim sektörlerindeki kullanım alanlarını incelemeyi ve hidrojen teknolojisinin gelişiminin yanı sıra ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma ayrıca, Türkiye’de hidrojenin kullanımını sektörel açıdan önceliklendirilmesini ve özellikle son tüketim sektörlerine odaklanarak ilgili dönüşümün muhtemel maliyet ve faydalarını analiz etmeyi hedeflemektedir.

Raporun ikinci bölümünde, yenilenebilir hidrojen için belirlenen uluslararası hedefler, stratejiler ve yol haritaları incelenerek, yenilenebilir hidrojenin enerji sistemlerindeki ve son kullanım sektörlerindeki rolü değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde, mevcut hidrojen teknolojileri ve gelişmekte olan yeni teknolojilere ilişkin bilgi sunulmuştur. Dördüncü bölümde, Türkiye’nin son kullanım sektörlerinde yenilenebilir hidrojenin potansiyel uygulama alanları incelenmiş ve ilgili sektörlerle yönelik uluslararası en iyi uygulamalardan örnekler verilmiştir. Beşinci bölümde, Türkiye’de son kullanım sektörlerinde yenilenebilir hidrojen kullanımına ilişkin fayda-maliyet analizi yapılmıştır. Son olarak, altıncı bölümde Türkiye’de yenilenebilir hidrojen uygulamalarını hızlandırmaya yönelik politika önerileri özetlenmiştir.



BÖLÜM 2

Hidrojen Stratejileri,
Politikaları ve Destek
Mekanizmaları

2.1 Mevcut Durum

Devam etmekte olan küresel enerji krizi ve doğurduğu belirsizlikler, ülkelerin enerji arz güvenliği ve enerjiye ekonomik erişim konularını tekrar gündeme taşımıştır. Enerji arz güvenliğini sağlamada öne çıkan stratejilerin başında yenilenebilir enerji arzının artırılması gelmektedir. Yenilenebilir hidrojen ise yenilenebilir enerjinin farklı sektörlerde dolaylı olarak kullanımını sağlayarak tamamlayıcı bir teknoloji olmaya adaydır. Bu bağlamda son yıllarda, hidrojen üretimi ile ilgili hedef ve plan oluşturan ülke sayısında önemli bir artış gözlemlenmektedir. Birçok ülkede bu hedefler, hidrojen pazarının ve ekonomisinin oluşturmada destek mekanizmalarının kurulmasına da zemin hazırlamıştır.

Özellikle Avrupa Birliği (AB), yenilenebilir enerji kapasitesini artırmak, enerji arzını çeşitlendirmek ve yenilenebilir (yeşil) hidrojen ve türevleri gibi yeni teknolojilere yatırım yapmak gibi hedeflerle, enerji arzını güvence altına almak ve iklim nötr bir ekonomiye geçişi sağlamak için önemli adımlar atmıştır. Türkiye’de de hidrojenle ilgili konularda ilerleme kaydedilmektedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), hidrojenin net sıfır ekonomi hedefine ulaşmadaki potansiyel katkısından dolayı geliştirilmesi öncelikli alanlardan biri olarak belirlediğini açıklamış ve uzun vadeli hidrojen stratejisini yayımlamıştır (ETKB, 2023). Çoğu ülke gibi Türkiye de, yerel olarak hidrojen teknolojilerine yönelik talep ve yatırımları teşvik etmeyi hedeflemektedir. Öte yandan, özellikle gelişmiş ekonomilerin sağlayacağı teşvikler, projelerin hayata geçilmesinde önemli bir faktör olacaktır. Finansman kısıtları ve mevzuat eksiklikleri nedeniyle hidrojen projelerinin gelişmekte olan ülkelere kıyasla yavaş ilerlediği gözlemlenmektedir.

Yenilenebilir hidrojenin üretim maliyeti, kullanımının yaygınlaştırılmasındaki en önemli engellerden biri olarak değerlendirilmektedir. Net sıfır hedeflerini gerçekleştirmek için yüksek miktarlarda yenilenebilir hidrojene ihtiyaç duyulacağından, üretim maliyetlerinin düşmesi oldukça önemlidir. Mevcut durumda, yenilenebilir hidrojenin alıcısı ve tedarikçisi olsa da, arz ve talep arasında büyük bir fiyat farkı bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrojen ekosistemi gelişiminin ilk dönemlerinde, yenilenebilir hidrojenin kamu tarafından teşvik edilmesi, ilgili piyasanın yaratılmasında ve öngörülebilirliğin sağlanmasında önemli bir adım olabilir.

COVID-19 salgını sonrası toparlanma önlemleri ve devam eden Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle oluşan yüksek ve dalgalı doğal gaz fiyatları, uzun vadeli yatırım perspektifinden bakıldığında, mavi hidrojenin² yenilenebilir hidrojene oranla rekabet gücünü zayıflatmaktadır. Şekil 3’te, Türkiye ve AB pazarlarındaki doğal gaz fiyatlarının seyri ile beraber yeşil ve mavi hidrojenin üretim maliyetleri gösterilmektedir. Yapılan hesaplamalarda, altyapı maliyetleri dikkate alınmamıştır. Bununla birlikte, hesaplanan maliyetlere ek maliyetlerin de eklenebileceği dikkate alınmalıdır.³ Doğal gaz fiyatları için EPIAŞ Spot Piyasa fiyatları dikkate alınmıştır. Şekilde gösterilen yeşil çizgili alanın gerçekleştiği tarihlerde, Türkiye’nin batı bölgesinde yenilenebilir hidrojenin, Türkiye ve/veya Avrupa’da üretilen mavi hidrojenle karşılaştırıldığında maliyet açısından

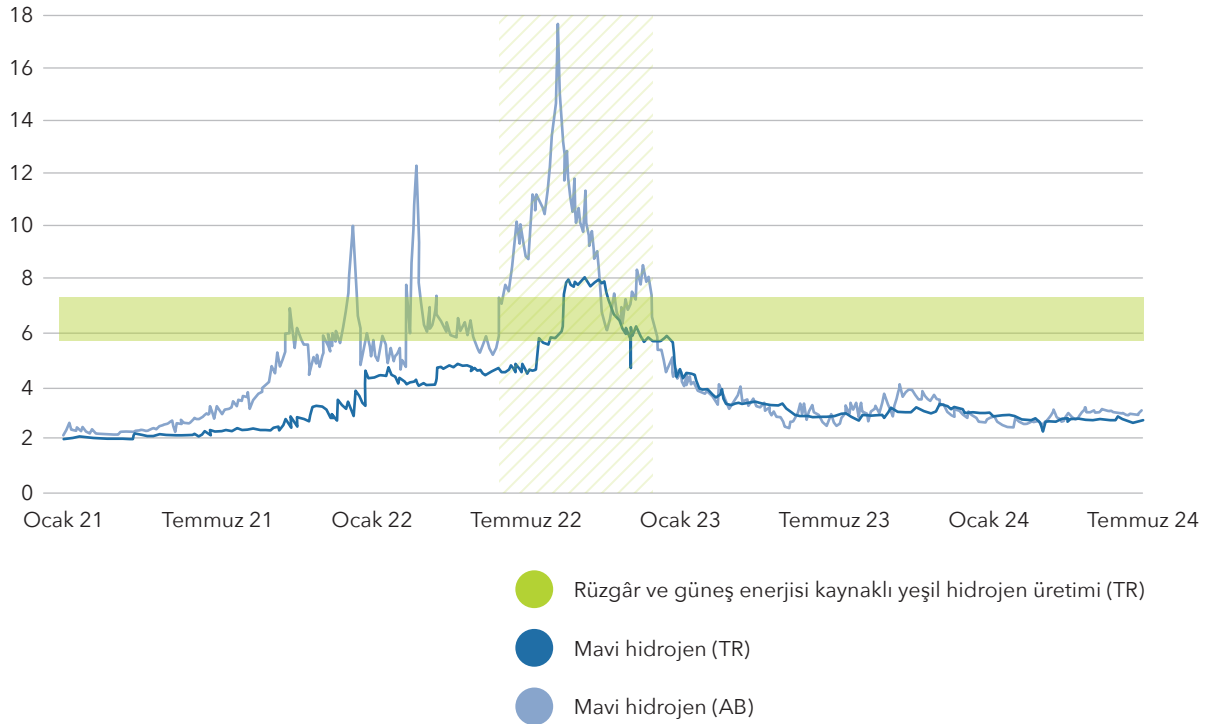
² Mavi hidrojen, doğal gazdan üretilmekte olup, oluşan emisyonların karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) tesislerinde depolandığı hidrojen türüdür.

³ Elektrolizörlerin kapasite kullanım oranları, yenilenebilir enerji kapasite faktörlerinin değişkenliği, altyapı maliyetleri, finansman maliyetleri seviyelendirilmiş hidrojen üretim maliyetlerini etkileyebilir. Taşıma ve depolama gibi üretim maliyetlerine ilave maliyetler ayrıca değerlendirilmelidir.

rekabetçi bir şekilde üretilebileceğini göstermektedir. Ancak, fosil yakıt fiyatları düşük kaldıkça, yenilenebilir hidrojene kıyasla mavi hidrojen daha uygun maliyetli olabilir. Buradaki temel nedenler arasında mevcut durumda yenilenebilir hidrojen üretiminin, fosil yakıt bazlı hidrojen üretimine kıyasla küresel ölçekte daha pahalı olmasıdır. Öte yandan, CCUS teknolojisinin ve doğal gaz fiyatlarının belirsizliği dolayısıyla mavi hidrojen fiyat dalgalanmalarına açık olacaktır. Yenilenebilir hidrojen üretim maliyeti ise; yenilenebilir elektrik⁴ üretimine, elektrolizör yatırım, işletme maliyetleri ve kapasite kullanım oranlarına bağlıdır. Dolayısıyla, yenilenebilir hidrojen üretiminde mavi hidrojene kıyasla enerji maliyetlerinin dalgalanması açısından bir risk oluşmayacağı değerlendirilmektedir. Yenilenebilir hidrojen üretiminin mevcut durumda daha maliyetli olmasının bir diğer nedeni de, elektrolizörlerin yatırım maliyetlerinin (CAPEX) oldukça yüksek olmasıdır. Bu, özellikle küresel enflasyon nedeniyle yatırım ve finansal maliyetlerin artmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3. Türkiye (Batı bölgeleri) ve AB için yeşil ve mavi H₂ maliyetleri⁵

LCOH (EUR/kg)



Yenilenebilir enerji kaynaklarının tam yük saat verileri İzmir özelinde analiz edilmiştir. Mavi hidrojen, %95 yakalama oranına sahip buhar metan reformasyonuna dayanmaktadır. Yenilenebilir hidrojen üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarına doğrudan bağlantılıdır.

⁴ Yenilenebilir enerji santrallerinde üretilen elektrik

⁵ İlgili veriler Agora Energiewende'nin LCOH hesaplama aracı ile hesaplanmıştır (2024). Yenilenebilir enerji kaynaklarının tam yükte çalışma saatleri İzmir şehri özelinde alınmıştır; Doğal gaz fiyatları: EPIAŞ Şeffaflık Platformu (TR); TTF (EU).

Yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, elektrik maliyetlerini küresel ölçekte düşürmektedir. 2010-2021 döneminde, güneş ve rüzgar enerjisi için küresel ortalama seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (LCOE) sırasıyla %88 ve %64 oranında azalmıştır. Aynı dönemde, Türkiye’deki YEKA ihale fiyatları her iki teknoloji için de oldukça düşük seviyelere inmiştir (SHURA, 2022). Diğer yandan, elektrolizörlerin yatırım maliyetleri ise hâlâ yüksek seviyelerdedir. Hidrojen pazarı yeni gelişmekte olan ve sadece küçük ölçekli ya da pilot projeleri kapsadığı için, hem yatırımcılar hem de elektrolizör üreticileri için öngörülebilir bir pazar ortamı henüz oluşmamıştır. Bu zorlukları aşmak için hidrojen arz ve talebinin eşzamanlı olarak oluşturulmasına katkı sağlayacak destekleyici politikalara ihtiyaç vardır. Politikalar, bütüncül yol haritaları ve öngörülebilir pazar dinamikleri, hidrojen teknolojilerinin küresel çapta geliştirilmesindeki belirsizlikler azalabilir.

Birçok ülke, ulusal hidrojen stratejilerini kamu destekli yatırım mekanizmalarıyla geliştirerek hidrojen piyasası oluşturmaya başlamıştır. Mayıs 2024 itibarıyla toplam 46 ülke hidrojen stratejilerini ve bunlara bağlı yol haritalarını açıklamıştır. Bununla birlikte, 35 ülke ise mevcut durumda hidrojen hedef ve stratejilerini geliştirmektedir (Şekil 4). Bu stratejilerin bazıları ulusal koşullara bağlı olarak ülke dinamiklerini gözetken farklılıklar gösterebilmektedir. Ancak, bu stratejiler arasında bazı ortak öncelikler öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, tüm bu yol haritaları ve stratejilerde ortak olan noktalardan biri, başlangıçta kamu politikalarıyla belirlenen desteklerin hidrojen ekonomisinin hızlandırılması için önemli bir itici güç olduğudur. Bu bağlamda, Japonya ve Almanya’nın öncü stratejileri, bölgesel ve küresel söylem üzerinde olumlu etkiler oluşturmuş ve bu konuda küresel ilgiyi artırmıştır.

Stratejiler sadece ulusal düzeyde değil, bölgesel düzeyde de geliştirilmektedir. Örneğin, REPowerEU Planı, 2030 yılına kadar AB’de 20 milyon ton (Mt) hidrojen (H_2) gerekeceğini ve bunun yarısının ithal edileceğini belirtmektedir. Buna karşılık, birçok sektörde doğrudan elektrifikasyonun önceliklendirilebileceği ve bu durumun iklim hedefine ulaşmak için gereken hidrojen miktarını azaltılabileceği de beklenmektedir.

Şekil 4. Mayıs 2024 itibarıyla duyurulan ulusal hidrojen stratejileri

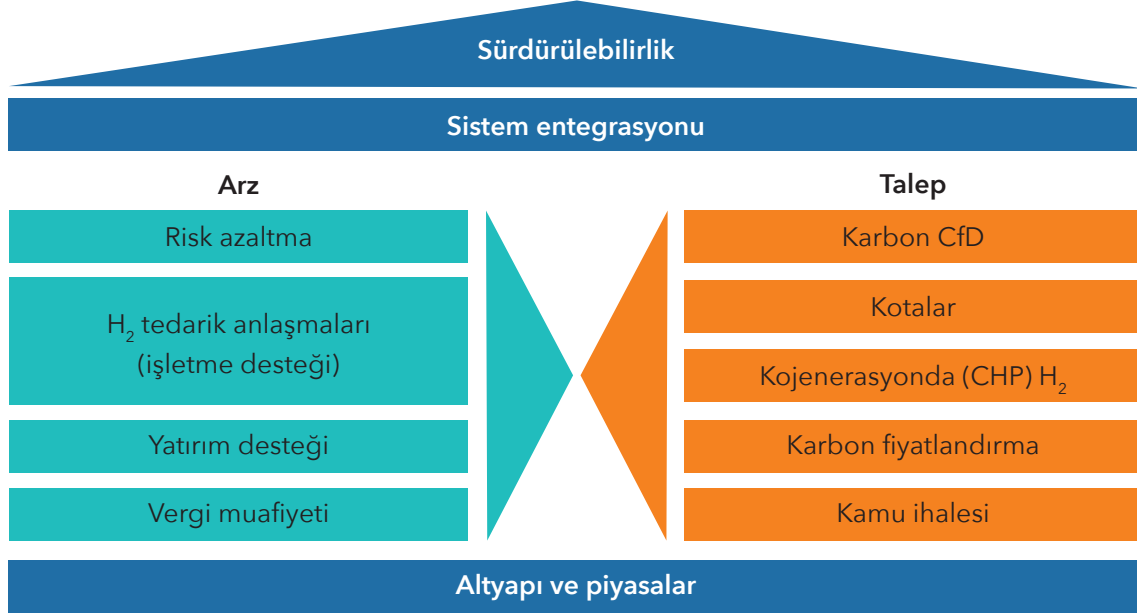


Kaynak: IRENA (2024)

2.2 Hidrojen Piyasasının Oluşturulması

Birçok ülke, hidrojen stratejisi hedeflerini belirlemenin ötesine geçerek gerekli politika, destek mekanizmaları ve araçlarını oluşturarak bir hidrojen piyasası yaratmak için somut adımlar atmaya başlamıştır. Destek mekanizmaları, yeni gelişen hidrojen ekonomisinin yapı taşlarını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bütünsel bir düzenleyici yaklaşıma da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bütünsel yaklaşımda, hem arz hem de talep tarafı sürdürülebilirlik ve sistem entegrasyonu altında ele alınmalıdır (Şekil 5).

Sürdürülebilirlik ve sistem entegrasyonu, net sıfır bir ekonomiye geçiş için esastır. Örneğin, hidrojenin yenilenebilir olarak nitelendirildiği durumları belirlemek için net kriterler gereklidir. Böylece, hidrojen ekonomisinin gelişimi şebekede yeni zorluklar yaratmayacak şekilde düzenlenebilir.

Şekil 5. Hidrojen piyasası gelişimi için düzenleyici çerçeve örneği

Kaynak: Agora Energiewende (2021)

2.2.1 Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

ABD 2022 yılında, enerji dönüşümü teknolojileri için geniş bir vergi indirimi yelpazesini içeren Enflasyon Düşürme Yasası'nı (Inflation Reduction Act, IRA) hayata geçirmiştir. Bu yasaya göre, yaşam döngüsü analizi yapıldıktan sonra "düşük karbonlu" olduğu belirlenen hidrojen için üreticilere üretim vergi kredisi verileceği belirtilmiştir. 10 yıl boyunca kilogram (kg) başına 3 Amerika Birleşik Devletleri Doları (ABD\$) olarak belirlenen vergi teşvikinin tamamının alınabilmesi için üretilen hidrojenin en fazla 0,45 kg karbondioksit eşdeğeri (0,45 kgCO₂e/kgH₂) emisyon sınırı bulunmaktadır (The ICCT, 2024). IRA'nın en önemli avantajlarından biri, proje geliştiricilerinin farklı üretim vergi indirimlerini (örneğin, temiz elektrik vergi indirimi) birleştirebilmeleri ve önemli maliyet düşüşleri elde edebilmeleridir. Bu bağlamda, ABD yakın gelecekte uygun fiyatlı hidrojenin önemli bir ihracatçısı olarak konumlanabilir. Vergi indirimlerinin, düşük karbonlu hidrojen projelerine yapılan yatırımları artırması beklenmektedir. ABD ayrıca, bölgesel hidrojen işbirliklerini desteklemek amacıyla bir talep tarafı girişimi (H₂hubs) geliştirmiştir (Office of Clean Energy Demonstrations, t.y.). Bu girişimle, hidrojen üreticilerinin ticari olarak sürdürülebilirliğini sağlayarak, son kullanıcıların uzun vadede hidrojen tedarikini destekleyeceği beklenmektedir.

2.2.2 Avrupa Birliği (AB)

AB'de "Hidrojen Bankası" hidrojen piyasasının gelişimindeki en önemli araçlardan biridir. Avrupa Hidrojen Bankası, belirlenen hidrojen hedefleri ile nihai yatırım kararına ulaşan projeler arasındaki finansal boşluğu kapatmak için özel olarak tasarlanmıştır. Banka ayrıca, hem AB içindeki yerli üretim hem de ithalatı dikkate alarak hidrojen talebini karşılamak için faaliyet

gösterecektir. Banka, yenilenebilir hidrojen üreticilerinin üretecekleri birim hidrojen (kg H₂) başına sabit bir prim ile ödüllendirileceği ihaleler düzenleyecek ve bu şekilde gelir istikrarını sağlayacaktır (AB Komisyonu, 2023).

Arz tarafında umut vadeden bir husus da, tüketicilerin ödeme istekliliği ile hidrojen arzını ilişkilendiren “Hidrojen Tedarik Sözleşmeleri”dir. Almanya, yakın zamanda Alman Federal Ekonomi ve İklim Eylem Bakanlığı (BMWK) tarafından finanse edilen küresel bir hidrojen (H₂) mekanizması geliştirmiştir. Bu mekanizma, yenilenebilir H₂ üretim maliyetleri ile son kullanıcıların ödeme istekliliği arasındaki fiyat farkını, hükümet destekli bir araçla kapatmayı amaçlamaktadır⁶ (Hintco, t.y.). Amaç, hem kamu hem de özel hibeler kullanılarak çift yönlü bir açık artırma mekanizması⁷ oluşturarak, arz ve talep fiyatları arasındaki fiyat farkını telafi etmektir.

Talep tarafı araçları düşünüldüğünde, AB tarafından tanıtılan önemli bir husus da Karbon Farkı Sözleşmesi’dir (Carbon Contract for Difference, CCfD). Bu Sözleşme ile AB sanayisinin fosil yakıtlardan düşük karbonlu yakıtlara geçişini sağlamak hedeflenmektedir. CCfD, karbonsuz bir yakıtla geçişle ortaya çıkan ek maliyeti telafi etmek üzere tasarlanmıştır. Özellikle, demir-çelik ve çimento gibi sektörlerdeki uzun vadeli yatırım risklerini asgari seviyeye düşürmek hedeflenmektedir. CCfD ayrıca AB Emisyon Ticaret Sistemi’ne (EU ETS) tamamlayıcı bir mekanizma olarak da değerlendirilebilir.

Talep tarafı sektörlerine özgü kotalar dikkate alındığında, yenilenebilir hidrojene yönelik sürdürülebilir bir talep yaratmak için destek mekanizmaları oldukça önemlidir. Örneğin, havayolu taşımacılığında kullanılan kerosenin (Jet A1 yakıtı) sürdürülebilir yakıtlarla ikame edilmesi büyük önem taşımaktadır. AB’de Yenilenebilir Enerji Direktifi’nin (REDIII) revizyonu bağlamındaki tartışmalardan biri de, sentetik kerosen için bir alt sınır içeren sürdürülebilir havacılık yakıtı kotasını değerlendirmek üzerinedir (European Commission, 2020). Mevcut durumda, 2025 yılından itibaren havacılıkta sentetik kerosenin belirli oranlarda uçak yakıtlarına karıştırılması kararı alınmıştır (European Council, 2023).

Hollanda, Avrupa’da AB fonu alan ilk hidrojen vadisine sahiptir. Bu kapsamda 90 milyon EUR fon alan HEAVENN projesinin ana odak noktası, sürdürülebilir ulaşım çözümleri oluşturmaktır (New Energy Coalition, t.y.).

2.2.3 Diğer ülkeler

ABD ve AB’nin yanı sıra, dünyadaki farklı ülkeler de yenilenebilir hidrojen için bir çerçeve oluşturmaya başlamıştır. Örneğin, Hindistan’da yenilenebilir hidrojen, yenilenebilir enerji politikalarının önemli bir ayağı haline gelmektedir. Hindistan’da, birim yenilenebilir hidrojen üretimi (kg H₂) için sabit bir ödeme yapılması ve kurulu elektrolizör kapasitesinin her kilovatı (kW) için teşvik sağlanması planlanmaktadır (Hydrogeninsight, 2023). Bu teşvikin ana odak noktası

⁶ Hintco, H2Global Vakfı’nın tamamına sahip olduğu bir yan kuruluştur. Hintco, H2Global mekanizması tarafından şekillendirilen yenilenebilir hidrojen bazı ürünler ve diğer düşük emisyonlu yakıtların alım ve satımına yönelik rekabetçi ihale süreçlerinin hazırlanması ve uygulanmasından sorumludur.

⁷ Çift yönlü açık artırma, en düşük üretim fiyatının arz tarafı ile ödeme istekliliğine bağlı talep tarafının açık artırmalarla belirlendiği bir yöntemdir.

teknolojinin yerel olarak üretimini sağlamaktır. Bu bağlamda, şirketlerin sübvansiyonlardan yararlanabilmeleri için satışlarının yarısını yerel pazarda yapmaları gerekmektedir.

Güney Kore, hidrojenden üretilen elektriği kamu şirketlerine satmayı mümkün kılan bir hidrojen ihale piyasası kurmuştur. Bu piyasa, yenilenebilir hidrojen üretimini ticarileştirmeyi hedeflemektedir (Argus, 2023). Benzer bir kamu destek mekanizması Japonya tarafından hidrojen ve amonyağı birlikte kullanmak üzerine kurulmuştur. 2030 yılına kadar Japonya elektrik üretiminde hidrojenin gaz türbinlerinde %30, amonyağın ise kömürlü termik santrallerde %50 oranında kullanılmasını hedeflemektedir (IEA 2023). Japonya, Avustralya ile hidrojen ithalatı konusunda bir ilişki geliştirmektedir. Avustralya merkezli hidrojen tedarik zinciri projelerini destekleyecek olan programın ilk etabında, Japonya-Avustralya Teknoloji Yoluyla Karbonsuzlaştırma Ortaklığı⁸ kapsamında Japonya’ya yenilenebilir hidrojen ihracatına odaklanacağı belirtilmiştir (Australian Government, 2022).

Orta Doğu bölgesinde ise Umman, yenilenebilir hidrojen destekleri konusunda öncü bir pozisyonundadır. Umman Hükümeti, hidrojen altyapısının geliştirilmesi ve yenilenebilir hidrojen projeleri için arazi tahsisi sağlamak amacıyla HYDROM adlı bir kuruluşun lansmanını yapmıştır (Hydrom, t.y.).

2.3 Hidrojenin Gelişiminde Önemli Noktalar

Bu bölümde ele alınan politika araçları, düşük karbonlu hidrojen konusunda küresel ilgiyi ortaya koymaktadır. Çoğu ülke, düşük karbonlu hidrojen üretim ve ticaretine yönelik bir pozisyon almıştır ve uluslararası finansman mekanizmalarının çoğu, düşük karbonlu hidrojenin desteklenmesine odaklanmaktadır.

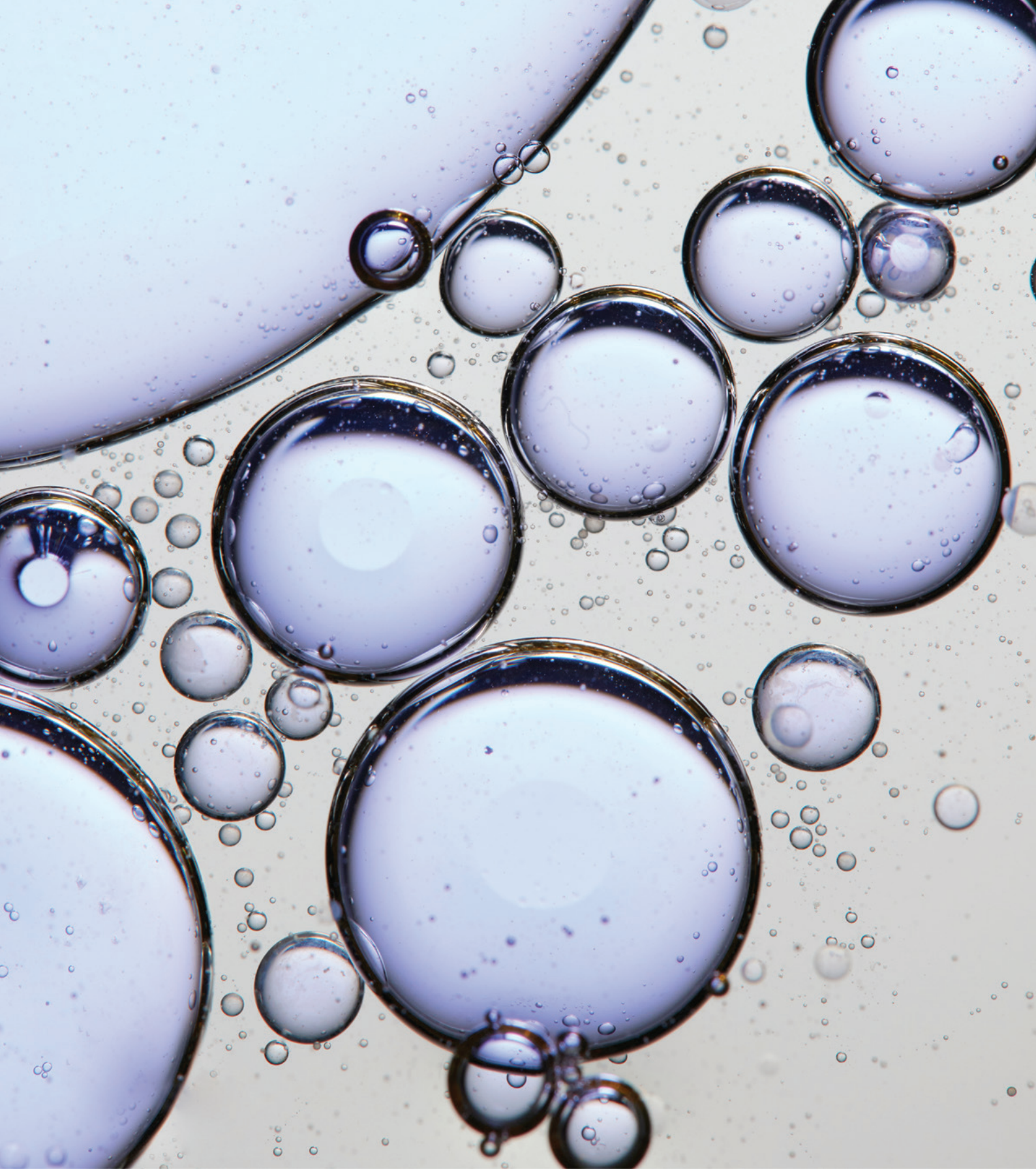
Türkiye açısından, uzun vadeli iklim hedeflerinin belirlenmesi ve ulusal hidrojen stratejisinin yayınlanması, Türkiye’nin enerji ve iklim politikalarını şekillendirmektedir. Bu hedefler, gerekli yatırım ve politikaların belirlenmesinde öncü olarak kabul edilebilir. Bu bağlamda, Türkiye’nin, yerel ve uluslararası yatırımcılar için cazip, güvenilir ve net bir hidrojen piyasası oluşturması önemlidir. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de, hidrojen pazarının gelişimini sağlamak için talep, arz ve altyapının uyumlu bir şekilde gelişmesi gerekmektedir:

- **Arz tarafı:** Düzenlemelerin odak noktası, yenilenebilir hidrojenin maliyetini alıcıların ödeyebilecekleri seviyelere getirilmesini kapsayabilir. Bu konuda uluslararası finansman mekanizmalarından (örneğin H₂ Global) fon sağlama düşünülebilir veya düşük karbonlu hidrojeni doğrudan destekleme (örneğin ABD’nin Enflasyon Azaltma Yasası) yöntemleri kullanılabilir.
- **Talep tarafı:** Sektörlere özel yenilenebilir hidrojen tüketim kotası getirilerek, üreticiler için öngörülebilirlik artırılabilir ve üretim kapasitelerinde önemli artışlar sağlanabilir.
- **Altyapı gelişimi:** Altyapı, elektrolizörlerin yüksek kapasite faktörlerinde ve düşük yenilenebilir elektrik fiyatlarıyla çalışmasına olanak sağlamalıdır. Böylelikle, hidrojenin yenilenebilir enerji açısından zengin bölgelerden, talep merkezlerine maliyet etkin bir şekilde taşınması

⁸ The Japan-Australia Partnership on Decarbonisation through Technology.

sağlanabilir. Farklı bölgeler arasında ilgili altyapı projeleri için teşvik sağlanması bu konuda gelişimi hızlandıracaktır. Özellikle taşıma ve depolama altyapıları önceliklendirilmeli ve ulusal şebeke gelişimi ile birlikte planlanmalıdır.

Fosil yakıt bazlı teknolojiler yerine, yenilenebilir enerji teknolojileri ve yenilenebilir hidrojenin teşvik edilmesi daha büyük faydalar sağlayarak enerji güvenliğini ve sürdürülebilir kalkınmayı olumlu yönde etkileyecektir. Örneğin, yenilenebilir hidrojen yerine mavi veya gri hidrojenin teşvik edilmesi, Türkiye’nin doğal gaz konusunda dışa bağımlı bir ülke olması nedeniyle enerji güvenliği üzerinde ek baskı oluşturabilir. Hidrojen üretiminde doğal gazın kullanılması, aynı doğal gazın ısınma ve enerji sektöründeki kullanımıyla rekabet etmek zorunda kalacaktır. Ayrıca, fosil yakıt bazlı hidrojenin önceliklendirilmesi, fosil yakıt varlıkları için tedarikçiye bağımlılık riskini artırabilir ve ülkenin net sıfır hedefine ulaşmasını geciktirebilir. Bununla birlikte, Türkiye’nin jeolojik karbon depolama kapasitesine ilişkin teknik bilgi ve mevzuat altyapısı mevcut olmadığından belirsizlikler artabilir.



BÖLÜM 3

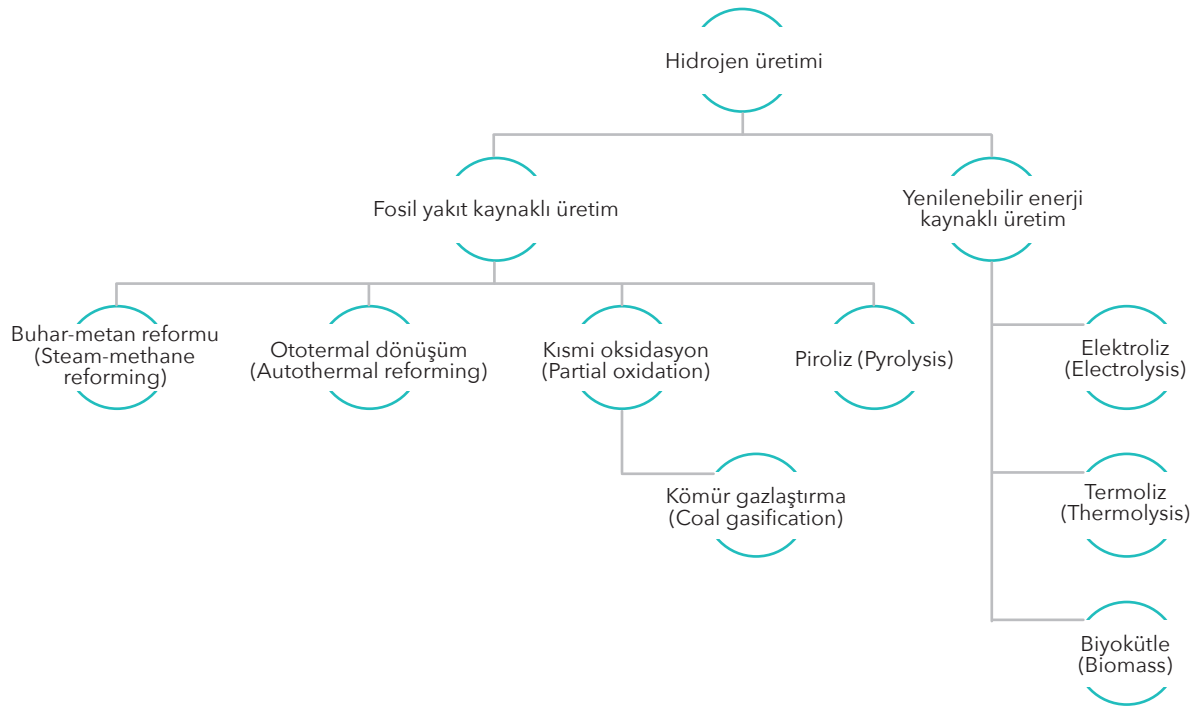
Hidrojen Teknolojileri
ve Son Kullanım
Sektörlerinde
Hidrojen Kullanımı

3.1 Hidrojen ve türevlerinin üretim teknolojileri

Enerji perspektifinden bakıldığında hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu ve sıfır emisyon salımı sağladığından, umut verici bir alternatif yakıt ve/veya enerji taşıyıcılarından biridir (McCay ve diğerleri, 2020; Dash ve diğerleri, 2023). Hidrojenin ayrıca amonyak, petrokimyasallar, sentetik yakıtlar ve metal işleme gibi sanayilerde hammadde olarak da kullanılması mümkündür.

Hidrojen doğada saf olarak bulunmaz ve üretilmesi için belirli teknikler kullanılır (McCay ve diğerleri, 2020). Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın (IRENA) çalışmasına göre, küresel hidrojen üretiminin %47’si doğal gaz, %27’si kömür, %22’si petrol ve kalan %4’ü ise yenilenebilir enerji kaynaklarından (elektroliz yoluyla) üretilmektedir (IRENA, 2021). Hidrojen üretiminde kullanılan yöntemler Şekil 6’da gösterilmektedir.

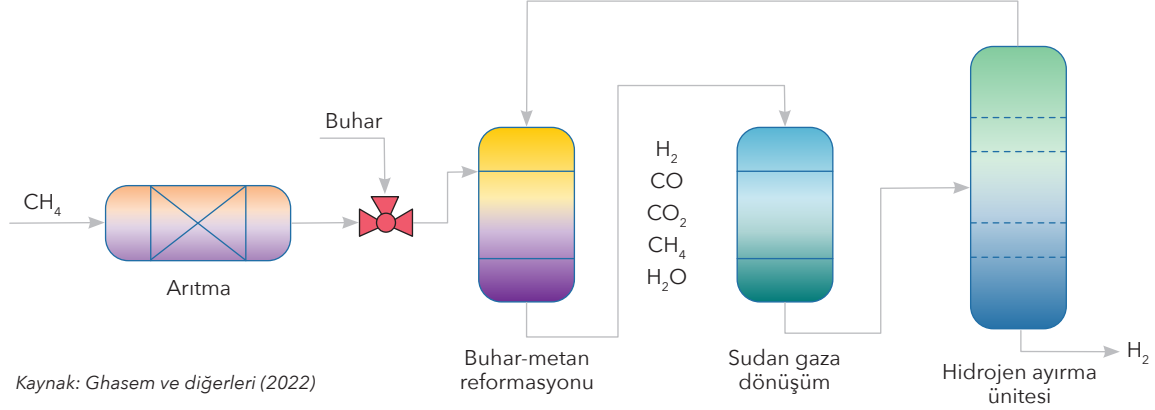
Şekil 6. Kaynaklara göre hidrojen üretim yöntemleri



3.1.1 Fosil Yakıtlara Dayalı Hidrojen Üretim Teknikleri

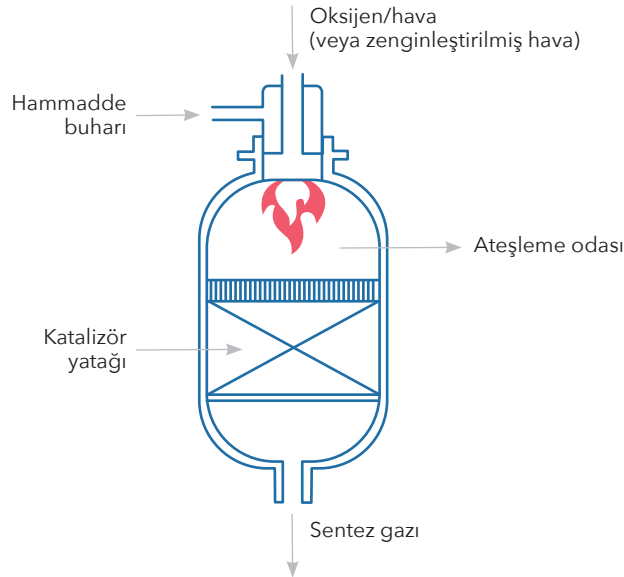
Karmaşık bir altyapı gereksinimi olmadığından buhar-metan reformasyonu (steam methane reforming, SMR) dünya genelinde toplam üretimin yaklaşık %50’sini oluşturmaktadır (Katebah ve diğerleri, 2022). Bu tip üretimde gerçekleşen kimyasal reaksiyon %65-%75 verimliliğe sahip olmasına rağmen yaklaşık olarak 9-12 kgCO₂/kgH₂ seviyesinde sera gazı (GHG) salımı gerçekleşmektedir (Bassani ve diğerleri, 2020). SMR yöntemiyle hidrojen üretiminin ayrıntılı şeması Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7. SMR yöntemiyle hidrojen üretiminin şematik gösterimi



Ototermal dönüşüm (autothermal reforming, ATR) tekniği için buhar, yakıt ve oksijenden (O_2) oluşan karışım brülöre⁹ verilmektedir. Böylece, hem reformasyon hem de oksidasyon reaksiyonları başlatılmakta ve termodinamik olarak dengeli bir reaksiyon gerçekleştirilmektedir. Bu metot kısmi oksidasyon ve buhar metan reformasyonunun bir kombinasyonudur. Dönüştürücüdeki (reformer) havada bulunan oksijen ile buhar, kısmi oksidasyonun gerçekleştiği yanma odasında birleşir (Şekil 8). Reaksiyon sırasında ısı üretildiği için otomatik reformasyon sürecinde ilave bir ısı işlem gerekmez.

Şekil 8. Ototermal dönüşüm yöntemiyle hidrojen üretimi kavramsal şeması



⁹ Brülör, yakıtın kontrollü bir şekilde yanmasını sağlayan cihazdır.

SMR ve/veya ATR süreçleriyle yüksek miktarlarda karbondioksit (CO₂) atmosfere salınır. Süreçleri karbonsuzlaştırmak için, mavi hidrojen üretiminde kullanılan karbon yakalama, kullanma ve depolama (carbon capture, usage and storage, CCUS) teknolojisi kullanılabilir. Açığa çıkan tüm karbon tamamen yakalanamamasına¹⁰ rağmen, üretilen hidrojenin karbon yoğunluğu azaltılabilir (IEA, t.y.).

3.1.2 Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretim teknikleri

Elektroliz ve termoliz gibi üretim teknikleri, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak, emisyon yaratmadan hidrojen üretiminin yenilikçi yollarındandır (El-Shafie ve diğerleri, 2019; Dash ve diğerleri, 2023). Elektrolizde, su moleküllerini hidrojen ve oksijene ayırmak için elektrik kullanılırken; termolizde çeşitli kaynaklardan hidrojen sağlamak için ısı kullanılmaktadır. Her iki yöntem de, yenilenebilir (yeşil) hidrojen üretimi için umut verici seçeneklerdendir.

Hidrojen üretimi bağlamında elektrolizör teknolojisinin seçimi, hem hidrojen üretiminin verimliliği hem de genel sistem maliyeti açısından kritik öneme sahiptir. Çalışma kapsamında dört temel elektrolizör tipi incelenmiştir. Bunlar alkali, proton değişim membranı (PEM), anyon değişim membranı (AEM) ve katı oksit elektroliz hücresidir (SOEC).

Alkali Elektrolizörler, %99,5 saflık ile uzun süredir endüstriyel yenilenebilir hidrojen üretiminin bel kemiğini oluşturmaktadır (Nallapaneni ve diğerleri, 2021). Bu sistemler, potasyum hidroksit (KOH) çözeltisini elektrolit olarak kullanarak, hidroksit iyonlarının (OH-) katottan anoda hareketini sağlarlar. Alkali elektrolizörlerde, değerli metal katalizörlerin kullanılmaları ve teknolojinin olgunluk seviyesi maliyet açısından avantajlı olmalarını sağlamaktadır. Ancak, elektrolitin düşük iyonik iletkenliği ve katalizör zehirlenmesini önlemek için saf besleme suyu gerekliliği, operasyonel verimliliklerini sınırlayan ve bakım gereksinimlerini artıran önemli dezavantajlardandır. Ayrıca, yüksek miktarda alkali atık oluşturmaları bir diğer önemli sorundur.

PEM (Proton Exchange Membrane) Elektrolizörleri, protonları ileten ve gazlara karşı geçirimsiz olan bir katı polimer elektrolit kullanmaktadır. PEM elektrolizörlerinin yüksek enerji verimliliği ve önemli enerji kayıpları olmadan yüksek basınçlarda çalışma kabiliyetleri nedeniyle alan ve verimliliğin ön planda olduğu uygulamalar için uygun bir seçenek olmalarını sağlamaktadır. Ayrıca, bu sistemle yüksek saflıkta (%99,9) hidrojen üretilabilmektedir (Nallapaneni ve diğerleri, 2021). PEM teknolojisinin temel kısıtları, değerli platin grubu metallerin katalizör olarak kullanımı ve bunun yanı sıra performans ile ömrü azaltabilecek kontaminasyonlara karşı hassasiyetleridir.

Anyon Değişim Membranı (Anion Exchange Membrane, AEM) Elektrolizörleri, %99,9 saflıkta hidrojen üretimi sağlayan yeni bir teknolojidir (Nallapaneni ve diğerleri, 2021). Bu sistemler, PEM elektrolizörlerine benzer şekilde çalışmakta fakat negatif yüklü iyonları (anyonları) ileten bir membran kullandıkları için ayrılmaktadır. AEM’ler ile alkali sistemlerin maliyet verimliliğini, PEM sistemlerinin işletme avantajlarıyla, örneğin daha yüksek verimlilikler ve değişken yüklere hızlı yanıt verme gibi özelliklerle birleştirme hedeflenmektedir. Yine de AEM teknolojisi hala gelişim aşamasındadır ve ticari işletme koşullarında uzun vadeli dayanıklılığı ve performansı ile ilgili sorunlar bulunmaktadır.

¹⁰ Yaklaşık %90’ı yakalanıp depolanabilmektedir.

Katı Oksit Elektrolizör Hücreleri (Solid Oxide Electrolyzer Cells, SOEC), PEM ve AEM'nin aksine yüksek sıcaklıkta çalışan ve %99,9 saflıkta hidrojen üreten elektrolizörlerdir (Nallapaneni ve diğerleri, 2021). SOEC'ler, 700 santigrat dereceyi (°C) aşan sıcaklıklarda çalışırlar. Bu durum, hem ısı hem de elektriği kullanarak suyun elektrolizinde yüksek termodinamik verimliliği sağlamaktadır. Bu özellik, SOEC'lerin termal süreçlerle entegrasyon potansiyelini ve böylece genel verimliliğini artırmaktadır. Ancak, yüksek çalışma sıcaklıkları, malzeme stabilitesi ve uzun ömürlülük açısından önemli zorluklar bulunmaktadır. Bu tasarımların karmaşıklığı SOEC kullanımının yaygınlaşmasını da engellemektedir.

Son yıllarda hem alkali hem de PEM elektrolizörler, performans ve verimlilik artırımı için çeşitli teknolojik ilerlemeler kaydetmiştir. Alkali elektrolizörlerde, hücre tasarımı ve mühendislikteki iyileştirmelerle daha dayanıklı ve verimli sistemler elde edilmiş ve daha yüksek hidrojen üretim oranları yakalanarak, bakım gereksinimlerinin azaltılması sağlanmıştır (Megia ve diğerleri, 2021).

Güncel PEM elektrolizörler, gelişmiş iyon değişim polimer membranlar ve yenilikçi membran mimarileri kullanarak daha yüksek akım yoğunlukları ve geliştirilmiş elektrolizör verimliliği (yaklaşık %83) sağlamaktadır. Ayrıca, yığın ve sistem entegrasyonu teknolojilerindeki devam eden ilerlemeler, PEM elektrolizörlerini daha güvenilir, maliyet etkin ve çeşitli uygulamalar için ölçeklenebilir hale getirmektedir. PEM elektrolizörlerde iridyum oksit (IrO_2) ve platin (Pt) gibi katalizörlerin kullanımı kritik öneme sahiptir. IrO_2 , stabilite ve güçlü katalitik aktivite sağlarken, Pt yüksek verimlilik sunmaktadır. Ancak, yüksek maliyetleri ve az bulunur olmaları, daha sürdürülebilir alternatifler üzerine araştırmaları teşvik etmektedir.

Anyon Değişim Membranı (AEM) elektrolizörleri, PEM elektrolizörlere benzer şekilde katı polimer elektrolitler kullanmaktadır. Ancak, değerli metal katalizörler yerine değerli olmayan metal katalizörlerin kullanılmasına olanak tanıyan bir elektrolizör türüdür. AEM teknolojisi, membran stabilitesini ve iletkenliğini artırmak ve bozunmayı azaltmak amacıyla geliştirilmekte olup, sistemin ömrünü ve verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Hem AEM hem de PEM elektrolizörleri, elektrot arayüzlerinde kullanılan katalizörlerdeki teknolojik yeniliklerden faydalanmaktadır. Katalizör malzemeleri ve yapılarındaki ilerlemeler, hidrojen ve oksijen gelişim reaksiyonlarının kinetiğini iyileştirerek enerji tüketiminin azaltılmasına ve elektroliz sürecinin genel verimliliğinin artırılmasını sağlamıştır (Zakaria & Kamarudin, 2021).

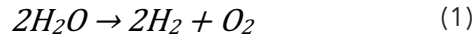
3.1.3 Amonyak ve Metanol Üretimi

Amonyak, gübrede yaygın olarak kullanılan temel bir kimyasal hammadde. Üretimi geleneksel olarak enerji yoğun Haber-Bosch¹¹ işlemine dayanır. Amonyak üretiminde kullanılan hidrojen ise genel olarak doğal gazın buhar metan reformasyonuna (SMR) dayanmakta ve yüksek miktarda karbon emisyonlarına sebep olmaktadır. SMR yöntemi ile üretilen amonyak kaynaklı karbon emisyonu toplam küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %1,8'ini oluşturmaktadır (The Royal Society, 2020).

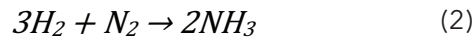
Amonyak sentezi, hammaddeye bağlı olarak üretim maliyetlerinde değişkenlik (%70-%90) göstermektedir. Teorik olarak minimum enerji gereksinimi yaklaşık 21,2 MJ/kg (üst ısı değer) olup, maksimum enerji verimliliği %75 seviyesindedir (Energy Star, 2017; Chehade ve Dinçer, 2021). Bu çevresel zorlukların üstesinden gelmek için yeşil amonyak üretimine yönelik devam eden girişimler bulunmaktadır. Stratejiler arasında, Haber-Bosch işleminin optimize edilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretime entegrasyonu ve hidrojen gereksinimini azaltmak için yenilikçi katalitik süreçlerin araştırılması yer almaktadır.

Yenilenebilir hidrojen kullanarak amonyak üretimi, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen gazının¹² kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Geleneksel yöntemlerin yerine, Haber-Bosch işleminde yenilenebilir hidrojen kullanılır. Bu yöntemde yenilenebilir hidrojen üretimi:

- 1) Elektroliz yoluyla suyun hidrojen ve oksijene ayrımı:



- 2) Havadan azot (N₂) gazı ayrıştırılarak, yüksek basınç ve sıcaklık altında azot ve hidrojen gazlarının bir katalizör aracılığıyla reaksiyona girmesi:



aşamalarından oluşur.

Metanol, temel olarak fosil yakıtlardan elde edilen ve kimya sanayinde kullanılan önemli bir üründür. Son on yılda metanol üretimi iki katına çıkarak, yıllık yaklaşık 0,3 gigaton (Gt) CO₂ emisyonu sebep olmaktadır. Çin, bu büyümede önemli bir rol oynamaktadır. Metanol üretiminin 2050 yılına kadar yılda 500 Mt seviyesine ulaşması beklenmektedir. Eğer üretimde sadece fosil yakıtlar kullanılırsa yıllık 1,5 Gt CO₂ emisyonu sebep olacağı öngörülmektedir (Saygin ve Gielen, 2021; IRENA ve Methanol Institute, 2021). Öte yandan, yenilenebilir hidrojen üretilen yenilenebilir metanol, mevcut yüksek üretim maliyetleri ve düşük hacimlere rağmen önemli bir potansiyel taşımaktadır. Uygun politikalar uygulandığı takdirde yenilenebilir metanol üretiminin 2050 yılına kadar maliyet etkin olabileceği öngörülmektedir (Saygin and Gielen, 2021; IRENA ve Methanol Institute, 2021).

¹¹ Amonyak üretiminin ana yöntemi, yüksek sıcaklık ve basınçta demir katalizörü kullanarak azot ve hidrojenin birleştirilmesidir (Bicer ve diğerleri, 2021).

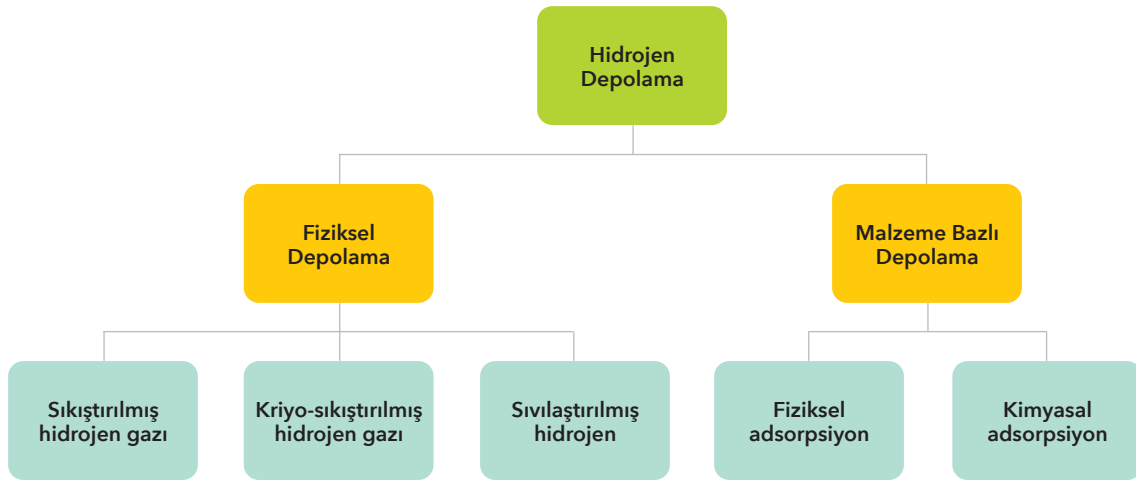
¹² Yenilenebilir elektrikli elektrolizde kullanımı yoluyla gerçekleşmektedir.

3.2 Hidrojen Depolama Teknolojileri

Hidrojen, diğer yakıtlara göre daha yüksek enerji/kütle oranına sahiptir. Ancak, ortam sıcaklıklarında düşük yoğunluğu, birim hacim başına enerji içeriğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, artırılmış enerji yoğunluklarına ulaşmak için şebeke ölçeğinde yenilikçi enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi önemlidir.

Hidrojen depolama ile ilgili teknolojiler, fiziksel veya malzeme bazlı teknikleri dikkate almaktadır (Şekil 9).

Şekil 9. Hidrojen depolama yöntemleri – Fiziksel ve malzeme bazlı depolama teknikleri



Kaynak: Nagar ve diğerleri (2023)

3.2.1 Fiziksel Teknikler

Hidrojen, gaz veya sıvı haldeyken fiziksel olarak depolanma potansiyeline sahiptir. Hidrojenin gaz halinde depolanması için genellikle 350 ila 700 bar (yaklaşık 5.000 ila 10.000 psi) basınca sahip silindirik ve hafif tankların kullanımını gerektirmektedir. Yüksek basınçta gaz halde bulunan hidrojen, saflık avantajı ile birlikte hızlı dolum ve boşaltım özelliğine sahiptir. Ayrıca, tanktan hidrojenin boşaltılması için enerji gerekmemektedir. Hidrojenin gerçek bir gaz olması nedeniyle, böyle bir depolama sisteminin hacimsel yoğunluğu basınçtan bağımsız olarak sabit kalmaktadır (Bosu ve Rajamohan, 2023).

Öte yandan sıvı hidrojen, gaz formundaki veya kriyojenik hidrojen formundaki hidrojene kıyasla 1,5-2 kat daha fazla hacimsel yoğunluğa sahiptir. Dolayısıyla, sıvı hidrojen için daha büyük tanklar gerektirmektedir (Tang ve diğerleri, 2023). Sıvı hidrojen elde edebilmek için 1 atmosferik basınçta (atm) ve sıcaklığının -253 °C (20 °Kelvin (K)) seviyesinde olması gerekmektedir. Ancak sıvı hidrojen, sıkıştırılmış hidrojen kadar hareketli değildir. Yani, sıvı hidrojen enerji açısından avantajlı değildir. Tanktan sıvı hidrojeni serbest bırakmak için adyabatik genişleme enerjisi

gerekmektedir ve bu da sıvılaştırma sürecinde¹³ %30 - %40 seviyesinde enerji kaybı olmaktadır (Tang ve diğerleri, 2023). Sıvı hidrojen, uzay, biyoloji ve kimya gibi uygulamalarda, yüksek enerji yoğunluğunun gerekli olduğu ve “buharlaşma kaybı”nın sorun olmadığı durumlar için uygundur.

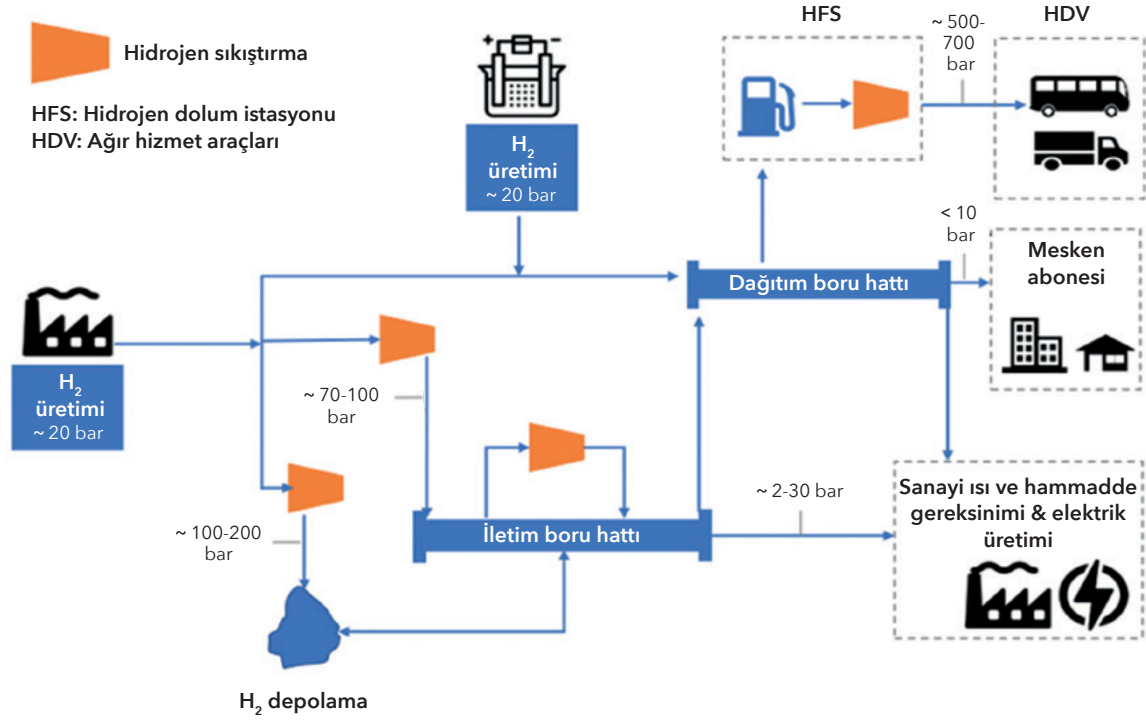
Kriyojenik sıkıştırılmış gaz hidrojen, başka bir hidrojen depolama tekniği türüdür. Bu süreç tipik olarak hidrojen gazını 20 °K’ye kadar kriyojenik hale getirip, ardından 350 ila 700 bar arasında sıkıştırmayı içerir (Argonne, 2009). Hidrojeni kriyojenik sıcaklıkta depolamak, küçük hacimlerde daha fazla enerji depolanmasına olanak tanıyan bir yoğunluk sağlamaktadır (Hyfindr, t.y.). Bu yöntem, kriyojenik depolamanın ve sıkıştırılmış gaz depolamanın avantajlarını birleştirerek, standart yüksek basınçlı gaz depolamasına kıyasla daha yüksek bir enerji yoğunluğu sunmaktadır. Hidrojen depolamak için kullanılan termal yalıtımlı kap, hem kriyojenik sıcaklıklara hem de yüksek basınçlara karşı dayanıklılık göstermektedir. Bu durum, hacimsel hidrojen depolama kapasitesini ve güvenliğini sıkıştırılmış gaz ve sıvı hidrojen depolamaya göre artırmaktadır. Bir diğer değişle, hidrojen gazını 20°K’de sıkıştırarak hacimsel hidrojen depolama kapasitesi iyileştirilebilmektedir (Langmi ve diğerleri, 2022).

3.3 Hidrojenin Taşınması

Hidrojenin üretim tesislerinden uzak mesafedeki son kullanıcılara taşınmasında boru hatları büyük bir öneme sahiptir. Mevcut doğal gaz boru hatları, hidrojen taşımacılığı için uygun hale getirilse bile hidrojenin çelik, alüminyum, titanyum gibi bazı metalleri, özellikle doğal gaz taşımacılığı için tasarlanmış çelik boru hatlarını kırılganlaştırma eğilimi bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrojenle ilgili altyapı ve operasyonel konularının detaylıca planlanması elzemdir (Hafsi ve diğerleri, 2018). Boru hattı bütünlüğünü ve güvenliğini sağlamak, hidrojen şebekesi geliştirmede kritik öneme sahiptir. Hidrojen taşımacılığı için boru hatlarının kullanılması, özellikle yüzlerce metrik ton hidrojenin (tH₂/gün) değişken mesafelere taşındığı büyük ölçekli işletmelerde maliyet etkin (< 1 CAD\$/kgH₂) bir dağıtım seçeneği olarak öne çıkmaktadır (Kahn ve diğerleri, 2021). Ancak, yeni boru hatlarının kurulumu önemli yatırımlar gerektirmektedir (Şekil 10). Hidrojene geçişteki ilk dönemlerde, hidrojen talebi büyük ölçekli boru hattı yatırımları için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, geçişi hızlandırmak için kamu destekleri sağlanması faydalı olabilir (Khan ve diğerleri, 2021). Almanya’daki mevcut doğal gaz boru hatlarının dönüştürülmesine kıyasla yeni hidrojen boru hatlarının kurulmasının, taşıma maliyetlerinde %20-%60 oranında azalma sağlayabileceği gösterilmiştir (Cerniauskas ve diğerleri, 2020).

¹³ Buharlaşma kaybı olarak da bilinir.

Şekil 10. Gelecekteki hidrojen gazı boru hattı sistemi



Kaynak: Kahn ve diğerleri (2021)

Hidrojenin taşınması için bir diğer yöntem ise özel olarak dizayn edilmiş tüp tanker (kamyon aracılığıyla) kullanımıdır. Bu tip kamyonlar ile yüksek basınçta sıkıştırılmış gaz formunda veya dondurulmuş sıvı formunda hidrojen taşınabilir. İlgili yöntem kapsamında doğan taşıma maliyetleri Tablo 1’de özetlenmektedir.

Tablo 1. Tanker aracılığıyla hidrojen taşınmasının maliyetleri¹⁴

	Kamyon maliyeti (1.000 ABD\$/araç)	Kapasite (kg/araç)	Yatırım maliyeti (ABD\$/kg)	Operasyonel maliyet (ABD\$/kg/100km)
Gaz tankeri - 20 MPa				
Reddi (2016)	250	250	1.000	
Petipas ve Aceves (2018)	200-300	200	1.000-1.500	0,76
Chang (2007)	280	298	940	0,2
Gaz tankeri - optimize				
Reddi (2016)	626	800	783	
Kompozit - 25 MPa (2018)	613-847	600-790	1.020-1.070	0,9-1,3
T4 54 MPa römork (2018)	1.300	1.200	1.080	0,3
Sıvı tankeri				
Reddi (2016)	718	4.300	167	
Hydrogenics (2017)	1.200	4.000	300	0,1
Chang (2007)	370	4.000	93	0,01-0,02

Kaynak: Burke ve diğerleri (2024)

Hem boru hattı hem de tüp tankerleri aracılığıyla hidrojen taşımının farklı ekonomik etkileri bulunmaktadır. Hidrojenin taşınması için tercih edilen yöntemle göre seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) karşılaştırması (ABD\$/kgH₂) Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Hidrojenin taşınma seçeneğine (boru hattı ve tankerler) göre maliyetleri (ABD\$/kgH₂) karşılaştırması¹⁵

Boru hattı mesafesi (km)	Yüksek basınçlı gaz tankeri	Yüksek basınçlı gaz tankeri	Tanker (dondurulmuş sıvı)	Boru hattı (12 inç)	Boru hattı (18 inç)	Boru hattı (24 inç)	Boru hattı (36 inç)
100	1,4 (160 km)	1,1	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
200	2 (320 km)	1,9	0,6	0,6	0,3	0,2	0,1
350	2,6 (480 km)	2,9	0,9	1,4	0,5	0,3	0,2
700		4,9	1,3	2,1	0,9	0,6	0,3

Kaynak: Burke ve diğerleri (2024)

¹⁴ Burke, A., Ogden, J., Fulton, L., 2024. Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs. https://escholarship.org/content/qt83p5k54m/qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf?t=s9oa2u

¹⁵ Burke, A., Ogden, J., Fulton, L., 2024. Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs. https://escholarship.org/content/qt83p5k54m/qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf?t=s9oa2u

3.4 Hidrojen Kullanım Alanları

Hidrojen, çok yönlü kullanım özellikleri ve iklim-nötr yapısı nedeniyle pek çok son kullanım sektörü için önemli bir bileşendir. Endüstriyel süreçlerde hidrojen, temiz üretim yöntemlerini mümkün kılarak karbon emisyonlarının azaltılmasında yakıt ve hammadde olarak kullanılabilir. Ulaşım sektöründe hidrojen, yakıt hücreli araçlarda kullanılarak daha uzun sürüş mesafeleri ve daha kısa yakıt ikmal süreleri sağlamaktadır. Elektrik sektöründe ise hidrojen, mevsimsel enerji depolama, elektrik şebekesi esnekliğini artırma ve yenilenebilir enerji üretim kesintilerini azaltmada görev alabilir. Son kullanım sektörlerini oluşturan alt sektörlerde hidrojen kullanımını mümkün kılan teknolojiler Ek 1’de özetlenmektedir.

3.4.1 Ulaşım Sektörü

Covid-19 salgını ile birlikte 2020 yılında küresel sera gazı (GHG) emisyonları %3,7 seviyesinde düşmüş ve son on yıllık emisyon artış eğilimi yavaşlamıştır. Fakat, küresel sera gazı emisyonları Covid-19 salgını sonrasında yine artmaya başlamış ve 2022 yılında 53,8 Gt CO₂ eşdeğeri seviyesine ulaşmıştır (European Commission, 2023).

Ulaşım sektörü kaynaklı emisyonlar bu artışta önemli bir rol oynamıştır. AB, 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonlu bir ekonomiye geçiş hedefi doğrultusunda, 2035 yılı itibarıyla yeni dizel ve benzinli araçların satışını tamamen yasaklama yönünde karar almıştır. Bu bağlamda, Avrupa’da özellikle yakıt hücreli elektrikli araçların (FCEV) ve bataryalı elektrikli araçların (BEV) hızla artması beklenmektedir (European Parliament, 2023).

Sektörde, binek ve hafif hizmet araçlarının ağırlıklı olarak batarya elektrikli araçlarla dönüşümü öngörülse de, hidrojen ve yakıt hücreleri için de önemli fırsatlar bulunmaktadır. FCEV’ler, içten yanmalı motorlu araçlar (ICE) veya BEV’ler ile karşılaştırıldığında farklı avantajlar sunmaktadır. FCEV’ler, tüm enerji üretim sürecinden tekerlekler kadar daha yüksek bir verimlilik (well-to-wheel verimliliği) gösterirler. Şarj süreleri karşılaştırıldığında, hidrojen yakıt hücreli araçların tam dolum süresi 3 ila 4 dakika arasında iken, elektrikli araçların dolum süresi 30 dakika ila 12 saat arasında değişkenlik göstermektedir (Euronews, 2020; IICEC, 2019).

3.4.2 Endüstriyel süreçler

Yüksek ısıli prosesleri içeren çoğu sanayi alt sektörü için doğrudan elektrifikasyon, süreçlerin karbonsuzlaşmasında yetersiz kalmakta ve hidrojen bu bağlamda önemli bir kolaylaştırıcı olarak değerlendirilmektedir. Hidrojen kullanımının önemi özellikle enerji yoğun demir-çelik, çimento, petrokimya, cam, seramik gibi sektörlerde belirgin hale gelmektedir. Bu sektörlerdeki teknolojik gelişmeler, hidrojen üretimi, depolanması ve taşınması yöntemlerine odaklanan araştırma ve geliştirme (AR-GE) çalışmalarıyla istikrarlı bir şekilde ilerlemektedir.

Mevcut durumda hidrojen birçok sektörde temel hammadde olarak da kullanılmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği’nde (AB) gübre sektörü için 3 Mt/yıl hidrojen tüketilirken, rafinerilerde 4,8 Mt/yıl kullanılmaktadır. Yaklaşık 7,5 Mt/yıl hidrojen hammadde amacıyla tüketilmektedir.

Hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olmasının yanı sıra endüstriyel süreçlerde hammadde olarak temel malzemelerin ve kimyasalların üretimine de önemli bir katkısı vardır (Petrochemicals Europe, 2021).

3.4.3 Doğal gaz ile hidrojeni karıştırma

Hidrojenin belirli oranlarda doğal gaz ile karıştırılarak şebekede kullanılması ile şebekenin karbon yoğunluğu azaltılabilir. Ancak, hidrojenin doğal gaz ile karışımında özellikle teknik olarak uygun oranların¹⁶ kullanılması, güvenlik standartlarının oluşturulması ve son kullanım cihazları üzerindeki etkilerinin araştırılması önemlidir (RECHARGE, 2022). Bu kullanım alanına örnek olarak, Hollanda’da mevcut doğal gaz boru hatlarına hidrojenin %20’ye kadar karıştırılmasının değerlendirilmesi gösterilebilir. Bu uygulama, hidrojen bazlı enerji sistemine geçiş stratejisinin bir parçası olarak, mevcut enerji altyapısına hidrojenin entegrasyonunu asgari kesinti ile sağlamayı amaçlamaktadır (Kiwa, 2012). Fakat, hidrojenin kütle esaslı enerji yoğunluğu yüksek olmasına rağmen boru hatlarıyla taşıma basınç altında ve gaz formunda olduğundan, doğal gazın hacimsel olarak %20 oranında hidrojenle karıştırılması toplam enerji içeriğinin %14 kadar düşmesi anlamına gelmektedir (Dedeoğlu ve diğerleri, 2023).

Almanya’da, hidrojenin doğal gaz şebekesine karışımı ile ilgili bir çalışma Ekim 2022 tarihinde başlamış ve 2023 yılının sonunda tamamlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, doğal gaz şebekesindeki hidrojenin %10 ve %20 oranında kullanımının etkilerinin incelenmesidir. Çalışmada, 100 haneye altı ay süreyle sağlanan hidrojen-doğal gaz karışımının tedarik süresince teknik bir sorun yaratmadığı gözlemlenmiştir (Hydrogen Insight, 2023).

Türkiye’de de GAZBİR-GAZMER tarafından benzer bir çalışma yapılmıştır. GAZBİR-GAZMER Konya’daki Temiz Enerji Merkezi’nde, hidrojen ile doğal gaz %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karıştırılmış ve elde edilen karışım test amaçlı olarak kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, hidrojenin doğal gaz ile dağıtım şebekelerinde maksimum %20 oranında karıştırılabileceği ve mevcut doğal gaz ev tesisatları ve tüketici cihazlarında önemli bir değişiklik gerektirmeden kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Petrotürk, t.y.). Bir başka çalışmada ise, alev geri tepmesine yönelik hesaplamalar yapılmış olup %20 oranında hidrojen entegrasyonu ile de alevin geri tepebileceği analiz edilmiştir (Gökalp ve diğerleri, 2022).

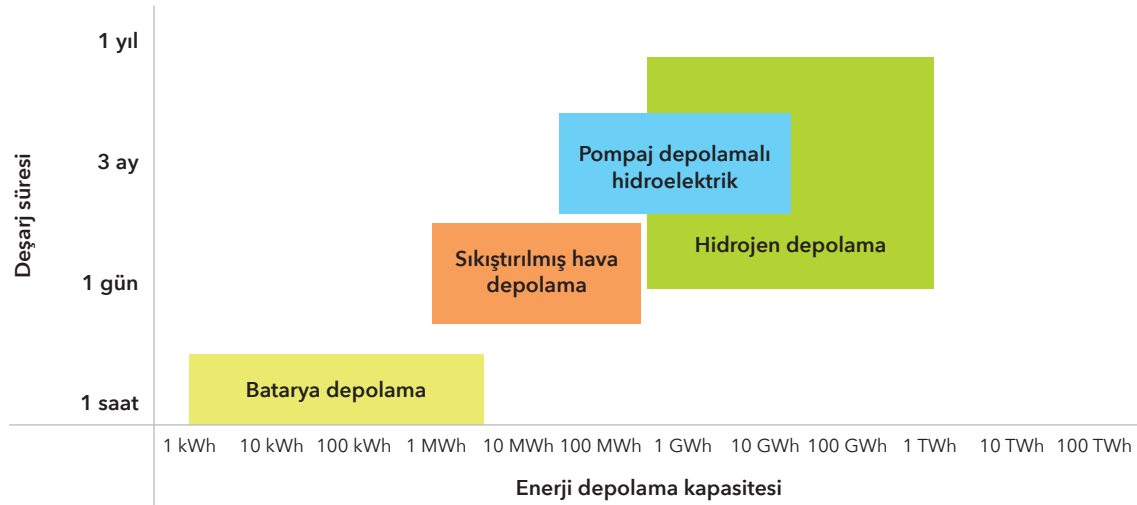
3.4.4 Elektrik Sistemi

Hidrojen uzun süreli olarak depolanabileceğinden, elektrik sistemindeki mevsimsel enerji arz-talep dalgalanmalarını dengelemekte kullanılabilir. Aynı zamanda yüksek miktarlarda depolanabilmesi ölçeklenebilir tasarımların oluşturulmasına imkan tanımaktadır. Bununla birlikte hidrojenin üretimi, depolanması ve sonrasında yine elektriğe çevrimi sırasında enerji kayıpları meydana gelmektedir. Hidrojenin elektrik sektöründe kullanımı için uygun bir altyapı ve ileri seviye depolama teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

¹⁶ Genellikle son kullanım için gazların ayrılmasındaki zorluklar nedeniyle %20 ile sınırlıdır.

Şekil 11’de hidrojen ve diğer enerji depolama yöntemlerini karşılaştıran bir grafik gösterilmektedir. Batarya enerji depolama sistemleri kısa vadeli şebeke dengesizliklerini yönetmekte saat mertebesinde destek sağlayabilmektedir. Hidrojen ile enerji, uzun süre boyunca mevsimsel olarak depolanabilir. Böylece elektrik sisteminde ihtiyaç olması durumunda hidrojen elektriğe çevrilerek kullanılabilir.

Şekil 11. Farklı enerji depolama teknolojilerinin enerji depolama kapasitesi ve boşaltma süresi oranı



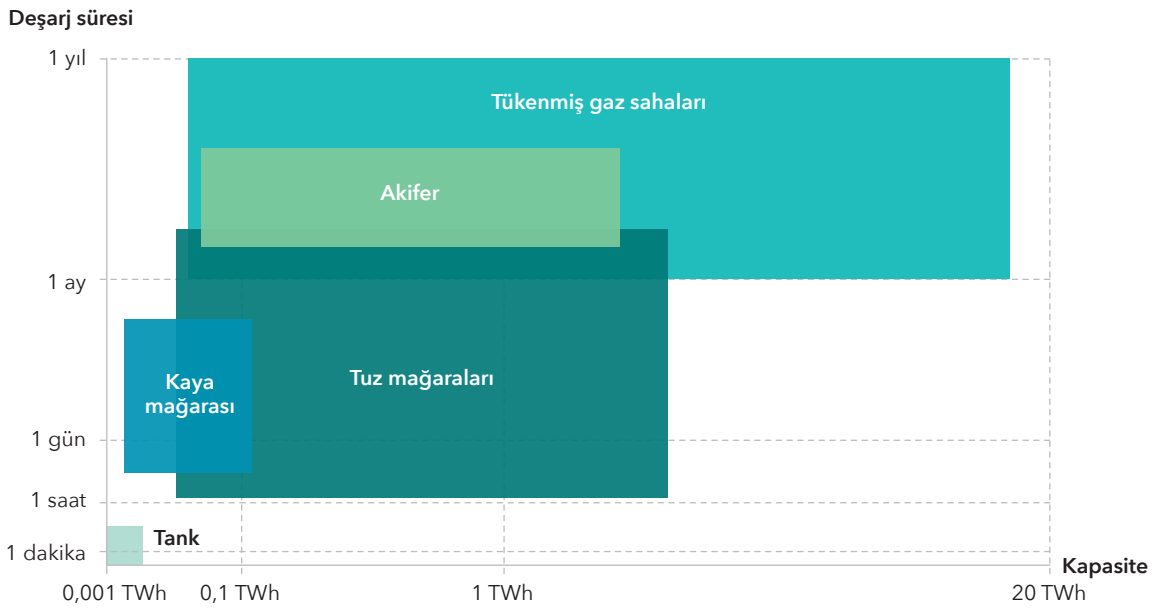
Kaynak: Thakkar ve diğerleri (2022)

Özellikle yaz aylarında güneş enerjisi üretiminin fazla olduğu zamanlarda, güneş enerjisi kesintisini (curtailment) önlemek için ihtiyaç fazlası elektrik yenilenebilir hidrojen üretimi için kullanılabilir. Kış aylarında güneş enerjisi üretimi düşeceğinden, elektrik talebinin karşılanması için depolanan hidrojen yakıt hücreleri veya gaz türbinleri kullanılarak tekrar elektriğe dönüştürülebilir. Böylece şebekenin esnekliği artırılır. Bu dönüşümün verimliliği yakıt hücreleri kullanıldığında uygulamaya bağlı olarak %50 seviyesinin altında olacaktır (SFC Energy, 2024). Bu döngüsel süreç, şebekenin esnekliğini artırmakla birlikte fosil yakıtlara bağımlılığı da azaltmaktadır.

Yeraltı Hidrojen Depolama (Underground Hydrogen Storage, UHS) sistemleri, hidrojenin esneklik opsiyonu olarak potansiyelini ve ölçeklenebilirliğini gösteren bir uygulamadır. UHS teknolojilerinin çok yönlülüğü, kullanılan spesifik teknoloji ve döngü hızlarına bağlı olarak, kısa, orta ve uzun vadeli depolama imkanı tanımaktadır (Miocic ve diğerleri, 2023). Avrupa’da enerji depolama operatörleri 2030 yılına kadar 9,1 TWh eşdeğeri, 2040 yılına kadar ise 22,1 TWh eşdeğeri saf hidrojeni yer altında depolamak için bir proje yürütmektedir. Tuz mağaraları, kullanılmayan gaz sahaları, akiferler ve kaya mağaraları gibi çeşitli alanları kullanan UHS, elektrik sektörünün karbonsuzlaştırılmasında önemli bir rol üstlenebilir (H2eart for Europe, 2024; Iglaue ve diğerleri, 2020). Tuz mağaraları, kaya tuzunun çözülmesiyle oluşan coğrafik alanlar olduğu için çeşitli kısıtları bulunmaktadır (Şekil 12). Tükenmiş gaz sahaları, AB ülkeleri ve Birleşik Krallık’ın doğal gaz depolama kapasitesinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır ve tuz

mağaralarına oranla hacimsel olarak daha büyük bir alanı kapsamaktadır (H₂earth for Europe, 2024). Akiferler, gözenekli tortul kaya yapıları ve metamorfik veya volkanik kayalara oyulmuş sert kaya mağaraları da hidrojen depolamada kullanılabilecek alanlardandır. Tüm depolama alanlarının, kurulacak bir Avrupa Hidrojen şebekesine entegrasyonu, çeşitli kapasitelerini en üst düzeye çıkarmak, bölgesel ihtiyaçları karşılamak ve topluca sağlam ve esnek bir hidrojen depolama altyapısına katkıda bulunmak için kritik öneme sahiptir.

Şekil 12. Yeraltı hidrojen depolama alanlarının kapasite ve deşarj süreleri



Kaynak: H₂earth for Europe (2024)

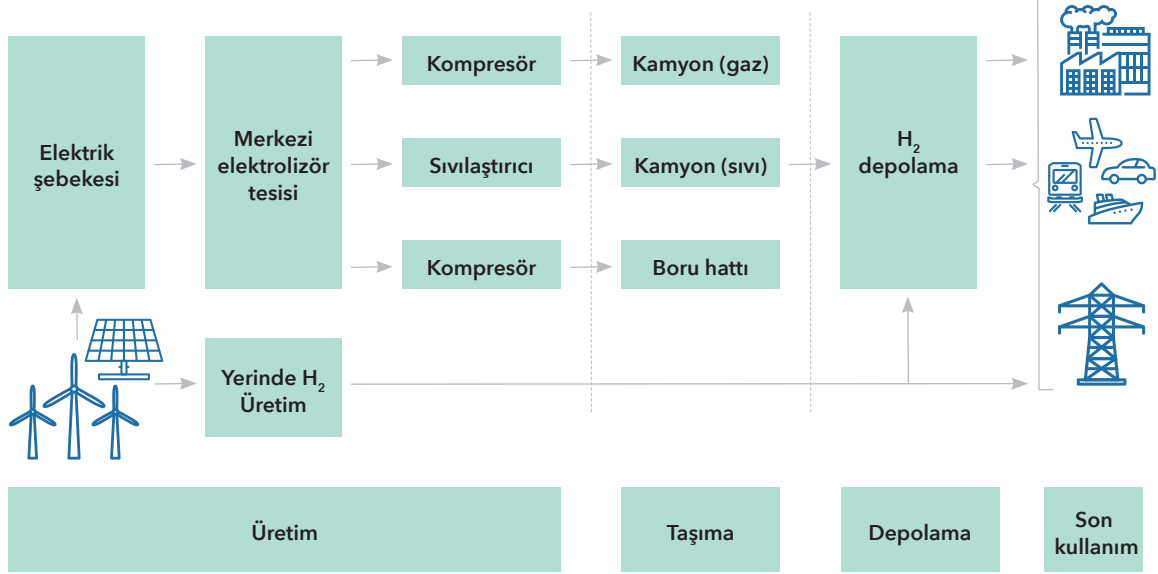
Yenilenebilir enerji kaynakları ve çeşitli sektörlerde hidrojen kullanımı için net hedefler bulunmasına rağmen, büyük ölçekli hidrojen depolamanın rolü tam olarak tanımlanmamıştır. Bu boşluğu kapatmak ve hidrojenin küresel enerji pazarına yaygın entegrasyonuna sağlam bir temel oluşturmak için kapsamlı planlama ve UHS projelerine yönelik yatırımlar öne çıkan konulardandır (Miocic ve diğerleri, 2023; Perera, 2023).

Yeraltı hidrojen depolamanın karmaşıklığı yalnızca altyapı ve proje geliştirmeye sınırlı değildir. Depolama sırasında kaya-sıvı etkileşimleri sürecin güvenliği ve verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Miocic ve diğerleri, 2023; Perera, 2023).

3.4.5 Hidrojen değer zinciri

Hidrojen değer zinciri; hidrojenin üretilmesinden son kullanımına kadar olan tüm süreci kapsamaktadır. Hidrojenin basitleştirilmiş değer zinciri Şekil 13'te gösterilmektedir.

Şekil 13. Hidrojen değer zinciri



Tüm ekonominin net sıfır karbon emisyonu ulaşmasında büyük öneme sahip olan hidrojen için gerekli değer zincirinin mevcut proseslere entegre edilmesi önemli olacaktır. Aksi takdirde, su tedariki ve benzeri sorunlar ile karşılaşılması muhtemeldir.

Yenilenebilir hidrojen üretim sürecindeki öngörülemez zorluklardan birisi su mevcudiyetidir. Öncelikli olarak, sanayi, tarım, hayvancılık ve diğer sektörlerin mevcut durumdaki su talepleri analiz edilmeli ve dikkate alınmalıdır. Yenilenebilir hidrojen üretiminde kg başına yaklaşık 9 ila 25 litre arasında su kullanımı gerekmektedir (SHURA, 2021).

Yenilenebilir hidrojen üretimi için yeni kurulmuş yenilenebilir enerji santrallerinin kullanımı uygun bir strateji olabilir. Zira, mevcut yenilenebilir enerji santrallerinden sağlanan elektrikle hidrojen üretimi, elektrik sektörü dönüşümünün ilerlemesini engelleyebilir.

Hidrojen değer zincirinde bulunan üretim sürecinde maliyeti belirleyen en önemli etmenlerden biri de elektrolizörlerin kapasite kullanım faktörüdür. Hidrojen üretimi için yüksek kapasite faktörünün sağlanması önemli bir etken olup, bu doğrultuda elektrik arz tarafındaki yatırımların artması gerekmektedir. Düşük kapasite faktörü ise, daha düşük verimliliğe ve buna bağlı olarak da hidrojen üretim maliyetinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır (SHURA, 2021). Dolayısıyla, düşük kapasite faktörü durumunda gerekli finansal teşvikler sağlanmadığı sürece hidrojenin fosil yakıtlar ile rekabet etmesi zorlaşacaktır.

Hidrojenin iletimi ve dağıtımı aşamasında eğer mevcut doğal gaz iletim ve dağıtım hatları kullanılacak ise altyapı incelemesinin yapılmasının yanı sıra ihtiyaç olursa ilgili altyapı yatırımlarının da hızlıca planlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, mevcut boru hatlarının hidrojenin taşınmasına uygunluğu ve geçirgenliği gibi teknik özellikler odağında altyapı yatırımları değerlendirilmelidir.



BÖLÜM 4

Uluslararası İyi
Uygulamalar

amaçlanmaktadır (Hanson Heidelberg Cement Group, 2021). Proje kapsamında, gri hidrojenin yerine yenilenebilir hidrojen kullanılması hedeflenmektedir. 2021 yılında yapılan açıklamaya göre çalışmanın yapılacağı tesiste yakıt olarak yenilenebilir hidrojen kullanımının, 2050 yılında tesisin çimento üretimi kaynaklı karbon emisyonlarını, ton çimento üretimi başına 35 kilogram (kg) azaltılabileceği belirtilmiştir (Global cement, 2022).

Honduras’ta bulunan Piedras Azules Çimento Fabrikası, fırınlarında hidrojen kullanımının test edildiğini duyurmuştur. Pilot çalışma kapsamında, tesis içerisinde klinker üretiminin arttığı ve petrokok tüketiminin azaldığı belirtilmiştir (Global Cement, 2022).

Küresel düzeyde bir yapı malzemesi şirketi olan Cemex, çimento üretiminde düşük veya sıfır karbonlu birincil yakıt kaynağı olarak kullanılacak hidrojen üretimine yönelik teknoloji geliştirmektedir. Bu bağlamda Cemex, Meksika’da bulunan dört çimento fabrikasında hidrojen enjeksiyonu uygulamayı hedeflemektedir (CEMEX, 2022).

4.1.3 Kimya ve petrokimya sektörü

REFHYNE Projesi, hidrojenin petrol rafineri sektörüne entegre edilmesi konusunda çalışmalar yapan önemli bir örnektir (REFHYNE, 2018). Almanya’da yürütülen bu projenin hedefi, belirlenen büyük çaptaki bir rafineride 10 megavat (MW) kapasiteli bir elektrolizörün kurulması ve işletilmesidir. Bu çalışmada, rafinasyon süreçlerinin karbon ayak izini azaltmak için hidrojen kullanımı önceliklendirilmektedir.

4.1.4 Gübre sektörü

PepsiCo ve Fertiberia firmaları, patates yetiştiriciliği kaynaklı emisyonları azaltmayı amaçlayan bir pilot program başlatmıştır. Fertiberia’nın “Impact Zero” adlı gübresi, yeşil amonyak kullanılarak üretilmektedir. Yeşil amonyak üretmek için yenilenebilir hidrojen kullanıldığından, Fertiberia daha düşük karbon ayak izine sahip bitki besleme çözümleri üretmeyi hedeflemektedir. Fertiberia tarafından Avrupa’nın endüstriyel kullanıma yönelik ilk ve en büyük yenilenebilir hidrojen tesislerinden biri olan Puertollano’daki üretim merkezinde bu amaçla yeşil amonyak üretilmektedir (World Fertilizer Magazine, 2023). Fertiberia, yeşil amonyak üretmek için Iberdola ile ortak çalışmaktadır. Proje kapsamında Iberdola’nın güneş enerjisi santrallerine entegre 20 MW kapasiteli elektrolizör kurulumu planlanmaktadır. Bu elektrolizör kapasitesi amonyak üretimi için gereken hidrojenin %5’ini sağlayabilecektir (The European Files, 2021). Projenin ilk aşaması olan 20 MW kapasiteli elektrolizör faaliyete geçmiş olup 200 MW kapasite eklemesini içeren ikinci aşama ise yapım aşamasındadır (Fertiberia, 2024).

Önde gelen deniz üstü rüzgar enerjisi proje geliştiricilerinden biri olan Ørsted ve öncü küresel gübre üreticisi Yara, yeşil gübre üretiminde kullanılacak yeşil amonyağın üretimi için birlikte çalışmaktadır. Yenilenebilir enerjinin Ørsted’e ait denizüstü rüzgar santrallerinden sağlanacağı ve bu proje için 100 MW kapasiteli bir elektrolizörün geliştirildiği açıklanmıştır. Yara, Hollanda’nın Sluiskil Zeeland kentindeki tesislerinde fosil yakıt bazlı hidrojeni yenilenebilir hidrojenle ikame ederek, yeşil amonyak üretmeyi hedeflemektedir. Çalışma kapsamında yıllık yaklaşık

75.000 ton yeşil amonyak üretileceği ve potansiyel olarak 100.000 ton karbon emisyonunun önlenebileceği öngörülmüyor (Smart Delta Resources, 2021).

4.1.5 Cam sektörü

Birleşik Krallık’ta HyNet Projesi kapsamında hidrojenin cam üretiminde kullanımına ilişkin test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlgili test çalışmalarında, rejeneratif cam fırınının bir portunu doğal gaz ve hidrojen karışımını kullanacak şekilde dönüştürmek ve çeşitli gaz karışım oranlarının yanma üzerindeki etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır (The Chemical Engineer, 2022).

Cam üretim sürecinde hidrojen kullanımına ilişkin bir başka çalışma ise Alman Cam Endüstrisi Birliği (German Glass Industry Association) ile Essen Gaz ve Isı Enstitüsü (Essen Gas and Heat Institute) tarafından yürütülen HyGlass Projesi’dir (Glass International, 2022). Bu Projenin amacı, rejeneratif cam eritme tanklarında hidrojen kullanımının etkisini araştırmaktır. Testler hem hidrojen-doğal gaz karışımları hem de sadece hidrojen kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla yürütülen testlerin kapsamı, tüm cam üretim değer zinciri boyunca doğal gazın hidrojenle ikamesinin yanma ve cam kalitesi üzerindeki olası etkilerini analiz etmektir. Çalışmanın birincil sonucu, hidrojenin cam üretim süreçlerini karbondan arındırmak için umut verici bir alternatif olduğunu göstermektedir. Ancak hidrojen cam üretim aşamasında doğal gazdan farklı şekilde yandığından, yüksek sıcaklıktaki prosesleri beslemek için yeni malzeme ve parametrelerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmanın sonuçlarından bir diğeri de, hava/yakıt oranı ve brülördeki gaz çıkışının kontrol stratejisi ile sabit tutulabilmesi durumunda, hidrojenin yanma üzerinde önemli olumsuz bir değişikliğe neden olmadığıdır. Yani, hidrojen hem fırın odası sıcaklığının hem de ısı iletiminin yüksek oranda sabit kalmasını sağlayabilmektedir (RECHARGE, 2022). Ancak, hidrojen kullanımının cam kalitesi üzerinde farklı etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki en büyük zorluklardan biri, hidrojenin cam kalitesi üzerindeki etkisini asgari seviyeye indirmektir. Bunun nedeni, cam eriyiğinde hidrojen kullanılmasının üründe renk bozulmasına ve dolayısıyla üretim hattının kalitesinin dolaylı olarak düşmesine neden olmasıdır. Yetkililer, bu sonucun doğal gaz-hidrojen karışımındaki hidrojen içeriğinden bağımsız olduğunu belirtmektedir (Glass International, 2022). Bu durumda, cam karışımının içeriğini değiştirerek hidrojenin cam üretiminde yakıt olarak kullanımının sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmesi mümkündür. Genel bağlamda, cam sektöründe hidrojen kullanmak için, hidrojen yanmasının kontrol edilmesinin yanı sıra hidrojenin cam kalitesine olan etkilerinin de detaylıca incelenmesi gerekmektedir.

4.1.6 Seramik sektörü

Iris Ceramica Group ve Edison Next, İspanya’nın Castellano kentinde yenilenebilir hidrojenle çalışan dünyanın ilk seramik fabrikasını kurmayı hedeflemektedir. Edison Next, yenilenebilir hidrojen elde etmek için 1 MW’lık elektrolizör kapasitesi kurmayı planlamaktadır. Çalışmada, su yönetiminin döngüsel ekonomi prensipleriyle yürütülmesi ve elektrolizörün yağmur suyu toplama tanklarında depolanan suyu kullanarak çalışması hedeflenmektedir. Çalışmada, üretim sürecinde kullanılan fırında öncelikle hidrojen içeriğinin %50’ye yaklaşan doğal gaz-yenilenebilir hidrojen karışımının kullanılması planlanmaktadır. Mevcut durumda, hidrojenin

%100 oranında fırın yakıtı olarak kullanılması da araştırılmaktadır. Yaklaşık 132 tH₂ yenilenebilir hidrojen üretilmesi planlanmakta olup, kullanılacak doğal gaz-hidrojen karışımı ile yaklaşık 900 ton karbon azaltımı sağlanması hedeflenmektedir (Edison, 2023).

4.2 Ulaştırma

4.2.1 Karayolu taşımacılığı

2023 yılında bir Fransız şirketi olan Pininfarina, NamX Hidrojen Hizmet Aracı (Hydrogen Utility Vehicle - HUV) adında hidrojen yakıtlı içten yanmalı motora sahip bir araç modellemiştir (Carscoops, 2024). Motorun filtre değişimine veya yüksek saflıkta hidrojene gerek duymayan, daha uygun maliyetli hidrojenin kullanımına olanak tanınması planlanmaktadır. Bu hidrojen tanklarının “tak-çıkart” metodu ile kullanılması hedeflenmektedir.

2014 yılında hidrojen üzerine çalışmalara başlayan Renault, 2022 yılında elektrikli-hidrojen hibrit motora sahip ilk özel konsept otomobilini tanıtmıştır (Renault Group, 2023). Renault Scenic Vision, sıfır emisyonlu motorları, karbon içermeyen malzemelerin kullanımı ve karbon-nötr sahalarda sorumlu üretim sayesinde markanın karbonsuzlaşma planının bir parçası olarak sunulmuştur (Renault Group, 2022).

Fransız spor araba üreticisi Alpine, benzin yerine hidrojen ile çalışan içten yanmalı motora sahip bir yarış otomobili prototipi hazırladığını duyurmuştur. Bu çalışma ile birlikte firma, yarış araçlarına ek olarak Alpine markasının gelecekte üretecekleri bütün klasmanlardaki araçların da emisyonsuz olarak tasarlanmasını hedeflediklerini açıkladılar (Alpine, 2024).

4.2.2 Denizyolu taşımacılığı

Yenilenebilir hidrojenin deniz taşımacılığında kullanımı konusunda özellikle Avrupa, Çin ve Japonya’da araştırmalar sürmektedir. Kanada menşeli Ballard Power, 2016 yılında dünyanın ilk hidrojenle çalışan itme teknesi (push boat) üretmiştir. Bu proje aracılığıyla Ballard Power, yakıt hücresi teknolojisinin gelişimine yönelik çeşitli testler yürütmeye başlamıştır (H₂ energy news, 2023).

Norveçli denizcilik şirketi olan Norled AS, 2018 yılında hidrojen ve yakıt hücreleriyle çalışan sıfır emisyonlu yolcu ve araba feribotu üretim ihalesini kazanmıştır. Ballard Power tarafından üretilen 2.200 kW’lık yakıt hücresi modülleri kullanılarak dünyanın ilk hidrojenli yolcu ve araba feribotu inşa edilmiş ve Mart 2023 tarihinde faaliyete geçmiştir (H₂ energy news, 2023).

Hollandalı Future Proof Shipping şirketi, konteyner kargo gemilerinin emisyonsuz bir gemiye dönüştürmesini araştırmaktadır. Kargo gemisinin içten yanmalı motoru, Ballard Power tarafından üretilen toplam 6 adet 200 kW kapasiteli yakıt hücresi modülü ile değiştirilerek emisyonsuz bir güç sistemi kurulmuştur (H₂ energy news, 2023).

Güney Kore, denizcilikle ilgili 2023 Ulusal Eylem Planı’nı açıklamıştır. Plan’da, 2040 yılına kadar 14 hidrojen limanının inşa edileceği belirtilmektedir. Ayrıca, sektörde hidrojen kullanımına geçiş için sektöre yıllık 13 MtCO₂e hidrojen sağlanması da hedeflenmektedir (Ministry of Oceans and Fisheries, 2023).

Amogy, dünyanın ilk yeşil amonyak ile çalışan “NH₃ Kraken” isimli teknesini deneme sürüşüne çıkarmıştır. Teknenin başarılı yolculuğu, gelecekte denizcilik endüstrisini dönüştürmek için amonyağın sahip olduğu potansiyeli de göstermektedir (Amogy, 2024).

Powercell, İtalyan menşeli ekipman üreticisi ile yakıt hücresi sistemleri için 165 milyon İsveç Kronu tutarında bir anlaşmaya imza atmıştır. Bu anlaşma ile denizcilik sektörünün karbondan arındırılmasına yönelik önemli bir adım olmak ile beraber küresel çapta gemiye kurulumu yapılacak en büyük hidrojen yakıt hücresi sistemlerinden birini konu almaktadır (PowerCell Group, 2024).

4.2.3 Havayolu taşımacılığı

Airbus, sıvı hidrojen kullanması planlanan “Zeroe” uçak modelinin tanıtımını yapmıştır. Firma, üç Zeroe tasarımlarından ilkinin 2035 yılına kadar hizmete girebileceğini duyurmuştur (Airbus, 2024).

Universal Hydrogen firması hidrojeni, yenilenebilir hidrojen üretim tesislerinden dünyanın dört bir yanındaki havalimanlarına modüler kapsüllerle taşıyarak, esnek ve ölçeklenebilir bir yaklaşım oluşturmayı hedeflemektedir. Çalışmalarında ilgili modüllerin, mevcut taşıma ekipmanları kullanılarak doğrudan uçaklara yükleneceği ve dolayısıyla herhangi bir ek altyapıya ihtiyaç duyulmayacağı belirtilmektedir (Universal Hydrogen, t.y.).

ZeroAvia hidrojeni havacılıkta yakıt olarak kullanmayı hedeflemekte ve bu bağlamda, 2025 yılına kadar 300 mil menzilli ticari uçuşlarda¹⁷ yenilenebilir hidrojen kullanmayı planlamaktadır. Şirket, ayrıca 2027 yılına kadar faaliyete geçirmeyi planladığı 40 - 80 koltuklu (700 mil menzile kadar) ticari uçaklarda hidrojen kullanmak için yeni tasarım uçakları üretmeyi planlamaktadır (Zeroavia, 2024).

Topsoe, hammadde esnekliği elde etmek ve daha sürdürülebilir seyahat sağlamak için yeni yöntemler belirlemiştir. Belirlenen yöntemlerden biri de havacılıkta kullanmak üzere “G2L eFuels” adlı bir yenilenebilir hidrojen türev yakıtıdır (Topsoe, 2024).

Havacılık sektöründe sentetik kerosen kullanılarak yapılan ilk ticari uçuş 2021 yılında gerçekleştirildi. KLM’nin Boeing 737-800’ünde jet yakıtı ve Royal Dutch Shell tarafından üretilen 500 litre sentetik kerosen karışımı kullanıldığı belirtilmiştir (Reuters, 2021).

¹⁷ Toplam kapasitesi 9 - 19 koltuk olan uçuşlar için.

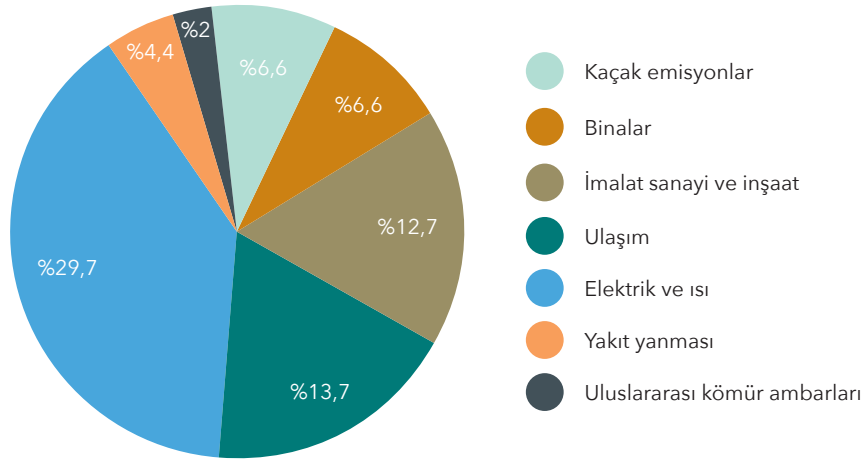


BÖLÜM 5

Türkiye’de
Hidrojenin Sektörel
Kullanımı

Küresel ölçekte, enerji kaynaklı emisyonlar toplam sera gazı emisyonlarının (GHG) büyük bir kısmını oluşturmaktadır. 2021 yılı sonu itibarıyla, küresel ölçekte enerji kaynaklı emisyonlar toplam sera gazı emisyonların %75,7’sini oluşturmuştur (World Resources Institute, 2024). Enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarının alt kırılımı incelendiğinde ise elektrik sektörü (%29,7) toplam sera gazı emisyonlarına en fazla neden olan sektördür. Enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarının sektörel kırılımı Şekil 15’te verilmektedir.

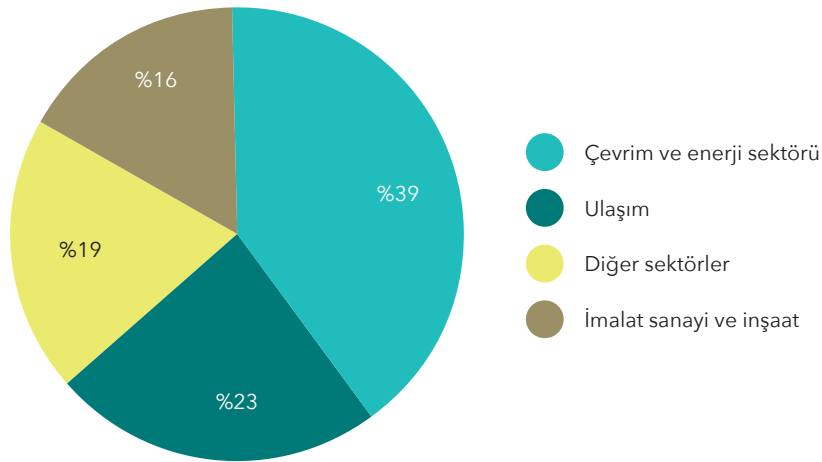
Şekil 15. Küresel ölçekte enerji sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının payları



Kaynak: World Resources Institute (2024)

Türkiye’deki sera gazı kaynaklı emisyonları incelendiğinde ise, 2022 yılında karbondioksit (CO₂) emisyonları enerji sektörü kaynaklı toplam emisyonların %95,5’ini oluşturmaktadır. Enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının sektörel alt kırılımı incelendiğinde, çevrim ve enerji sektörü (elektrik ve ısı üretimi) 155,9 Mt CO₂ emisyonu (%39) ile öne çıkmaktadır.

Şekil 16. Enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının sektörel alt kırılımı



Kaynak: TÜİK (2024)

5.1 Sanayi

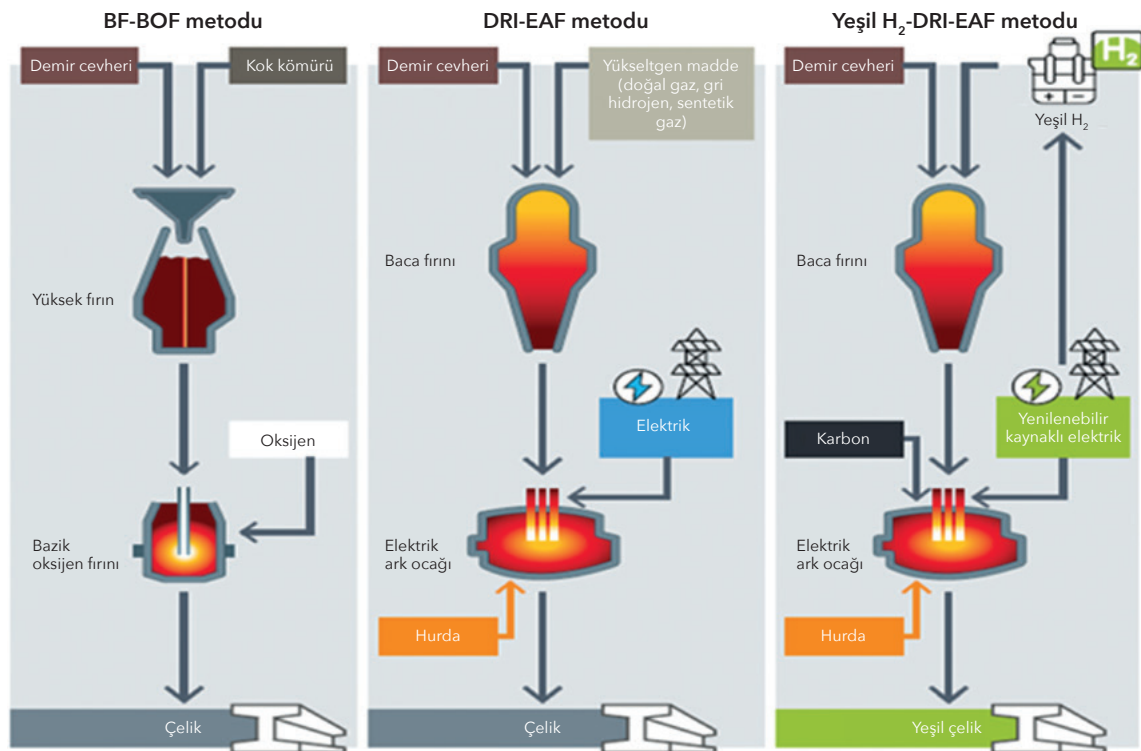
5.1.1 Demir-çelik

Demir-çelik sektörü, yüksek karbon yoğunluklu üretim prosedürleri ve yüksek enerji gereksinimleri nedeniyle, karbondan arındırılması zor olan sektörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda hem ekonomideki hem de nüfustaki büyümeye bağlı olarak küresel çelik talebinde artış yaşanmıştır. Buna paralel olarak, bu sektördeki yükselen talep nedeniyle toplam emisyonlar küresel bazda da artış göstermiştir (IEA, 2022). Mevcut durumda, küresel çelik üretiminin yaklaşık %65'i bazik oksijen fırınlarında (BOF) cevher kullanılarak, geri kalanı ise elektrik ark ocaklarında (EAF) hurda kullanılarak üretilmektedir (SHURA, 2023). Kömür, sektörün toplam enerji talebinin yaklaşık %75'ini karşılamaktadır. Demir-çelik sanayisindeki kömür tüketimi, küresel GHG emisyonlarının %7'sine ve CO₂ emisyonlarının %11'ine karşılık gelmektedir (IEA, 2022; Global Efficiency Intelligence, 2022). Bu bağlamda, sektör kaynaklı GHG emisyonlarının küresel olarak azaltılması için, üretim süreçlerinin mümkün olduğunca yenilenebilir elektrik kullanılarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Çelik sektöründe üretimin üç temel yöntemi vardır (Şekil 17):

- Yüksek fırın - Bazik oksijen fırını (BF-BOF)
- Elektrik Ark Ocağı (EAF)
- Elektrik Ark Ocağı ile entegre doğrudan indirgenmiş demir teknolojisi (DRI-EAF)

Şekil 17. Teknoloji bazında çelik üretim metodları



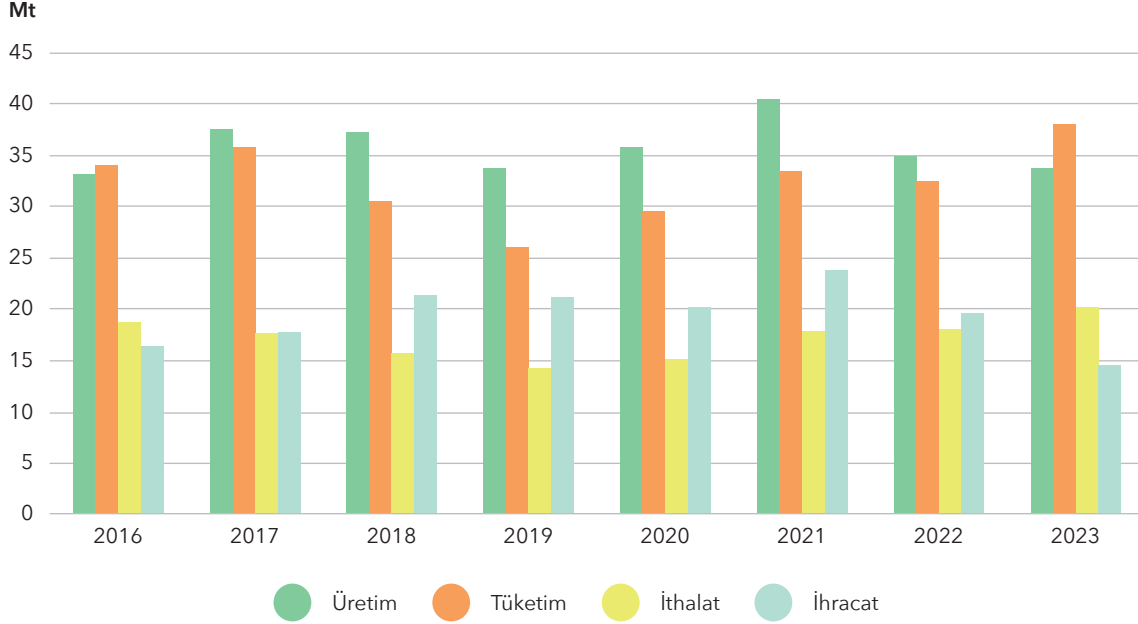
Mevcut durumda, çelik üretmek için entegre tesislerde BF-BOF ve geri kalanında EAF teknolojileri kullanılmaktadır. BF-BOF yönteminin hammaddeleri ise kömür ve demir cevheridir. Hammaddeler yüksek fırına gitmeden önce ön işleme tabi tutularak, kömür kok kömürüne; demir ise cevherden sinter ve peletlere dönüştürülmektedir. Daha sonra kok ve sinter/peletler, oksijenin uzaklaştırılmasıyla demir cevherinin demire indirgendığı BF’ye gönderilmektedir. Sonuç olarak pik demiri, BOF tarafından ham çeliğe dönüştürülür ve üretilen ham çelik rulo ve levha halinde işlenir (European Parliamentary Research Service, 2021). Bu sektörde kömür sadece ısı için değil, aynı zamanda indirgeyici olarak da kullanılmaktadır. Bu nedenle de, kömüre ikame alternatif bir enerji taşıyıcısının kullanılması sektörün karbonsuzlaştırılmasında yeterli olmamaktadır (SHURA, 2023).

EAF yönteminde ise hurda metaller doğrudan elektrik kullanımı ile eritilerek çelik üretilmektedir. İşlem sonucunda EAF ocağında ham çelik üretimi tamamlanır. Hurdadan çelik üretiminde, demir cevherinden çelik üretmek için gereken enerjinin yaklaşık %12’si yeterli olmaktadır (IEA, 2020).

Yenilenebilir (yeşil) hidrojenin kullanıldığı DRI-EAF yöntemi ise çelik üretmek için daha temiz bir seçenektir. DRI-EAF yönteminde, erime sıcaklığının hemen altı olan 950 santigrat derecede (°C) demir cevheri peletlerinden oksijen uzaklaştırılmaktadır. Demir cevheri, hidrojen (H₂) veya karbonmonoksit (CO) ile karıştırılarak demire indirgenir. Yenilenebilir hidrojen, DRI-EAF yönteminde demir cevherini dökme demire indirgemek için birincil indirgeyici madde olarak kullanılır. Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik, yenilenebilir hidrojen üretimi ve aynı zamanda EAF için enerji kaynağıdır. Başka bir deyişle, yenilenebilir enerji kaynaklı üretilen elektriğin üretim sürecinde kullanılması sonucu ile yeşil çelik elde edilmektedir (IRENA, 2022).

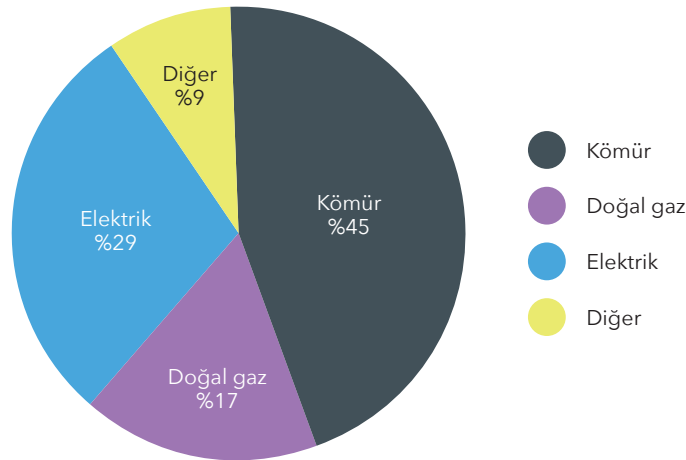
Çelik üretimi için kullanılan bir diğer teknoloji olan indüksiyon fırını (IF), temel olarak EAF ile aynı işlem adımlarını içermektedir. Ancak, fırının çalışma prensibi ve fırına beslenen hurda miktarı açısından farklılık göstermektedir. IF’lerde bobin elektromanyetik alan oluşturmak için fırının içine ve çevresine yerleştirilmektedir. Isı, bu elektromanyetik alan tarafından oluşturulan indüksiyon akımı tarafından üretilmektedir. Öte yandan grafit elektrot, EAF’lerde hurdanın eritilmesinde kullanılan arkı oluşturmaktadır.

Demir-çelik üretimi açısından bakıldığında Türkiye, 2023 yılında toplam 33,7 milyon ton (Mt) ham çelik üretimiyle Avrupa’nın ikinci, dünyanın ise sekizinci büyük üreticisi konumundadır. İhracat miktarları dikkate alındığında Türkiye, demir-çelik üretiminin %56’sını toplamda 200 ülkeye ihraç etmektedir. Türkiye, çelik ihracatında küresel düzeyde dokuzuncu sıradadır (Turkish Steel Exporters Association, 2023).

Şekil 18. Türkiye çelik sektörüne genel bakış

Kaynak: Türkiye Çelik İhracatçıları Birliği (2023)

Türkiye’deki demir-çelik sektörü kaynaklı enerji tüketiminin payı, sanayi sektörü toplam enerji tüketiminde içinde yadsınamaz düzeydedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) verilerine göre “Demir çelik ürünleri imalatı”, sanayideki toplam enerji tüketiminin %22,3’ünden sorumludur. Bu tüketim, 2022 yılı nihai enerji tüketiminin yaklaşık %7’sine eşdeğerdir. Yakıt türleri dikkate alındığında, bu sektördeki enerji tüketiminin %67,7’si fosil yakıt ve %29’u ise elektrik kaynaklıdır (ETKB, 2023) (Şekil 19).

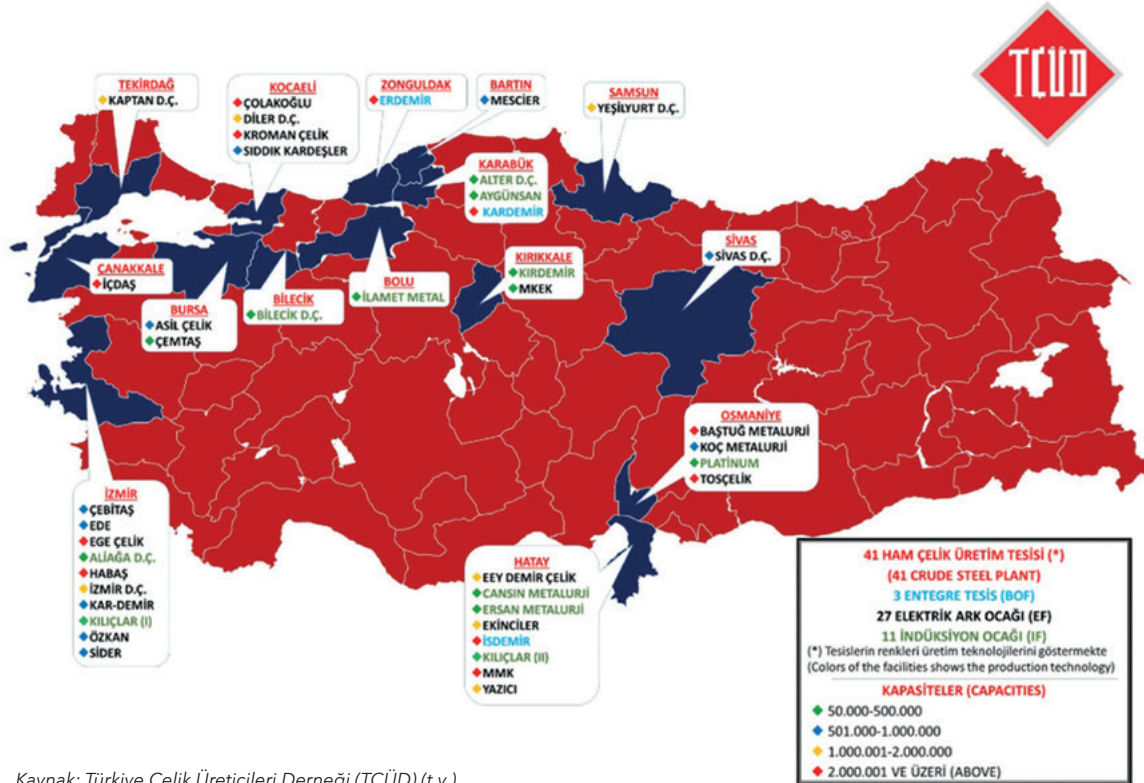
Şekil 19. Türkiye demir-çelik sektörünün toplam enerji tüketimi (2022)

Kaynak: ETKB (2023)

Türkiye’de 2021 yılında toplam 40,4 Mt ham çelik üretilmiştir. Toplam üretimin 11,5 Mt’u (%28) BF/BOF ve 28,9 Mt’u (%72) EAF/İndüksiyon Ocağı (IF) tesislerinde üretilmiştir (IPM, 2023). Ham çelik üretimi kaynaklı yaklaşık 39 Mt karbon salımı gerçekleşmiştir. Gerçekleşen toplam karbon emisyonlarının %63’ü BOF’lardan, kalan %37’lik kısım ise EAF/IF’lerden kaynaklanmaktadır (IPM, 2023; Erdemir t.y.).¹⁸

Türkiye, demir-çelik sektörünün karbonsuzlaşması konusunda diğer ülkelere kıyasla daha öncü bir rol oynamaktadır. Mevcut durumda, Türkiye’de 41 adet demir çelik üretim tesisi bulunmaktadır. Bunlardan 27 tanesi EAF tesisi, olmakla birlikte, sadece üç tanesi BF-BOF tipi tesislerdir (IPM, 2023) (Şekil 20). Dünya çelik üretiminin aksine, Türkiye’deki toplam üretim kapasitesinin yıllık ortalama %65’i EAF tesislerinde hurda çelik kullanılarak üretilmektedir. Bu nedenle, Türkiye çelik üretiminde halihazırda yüksek bir elektrifikasyon oranına sahiptir. Dolayısıyla, dünya geneline göre daha düşük karbon yoğunluğu gerçekleşmektedir (SHURA, 2023). Bunlarla birlikte, Türkiye’de henüz DRI-EAF tesisi bulunmamaktadır. Hidrojenin sektöre entegre edilmesi (H₂-DRI-EAF) ile de karbonsuzlaşması hızlanacaktır.

Şekil 20. Türkiye’de bulunan çelik üretim tesislerinin konumları



Kaynak: Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD) (t.y.)

¹⁸ BOF teknolojisinde ton ham çelik başına 2,2 tCO₂, EAF teknolojisinde ton ham çelik başına 0,5 tCO₂ (Erdemir, t.y.)

Demir çelik sektöründe fosil yakıt kullanılmayan bir değer zinciri oluşturmak için üretimde BF teknolojisinin, EAF ile değiştirilmesi gerekmektedir. Türkiye’de bu dönüşüm hali hazırda gerçekleşmektedir. Türkiye’deki demir çelik tesislerinin çoğunluğu EAF teknolojisine sahip olmasına rağmen indirgeyici olarak doğal gaz veya kömür tercih edilmesi nedeniyle karbon emisyonları açığa çıkmaktadır. DRI-EAF yönteminde, EAF'lere güç sağlamak için gazlaştırılmış kömür veya doğal gazdan üretilen sentez gaz¹⁹ ve elektrik kullanılmaktadır. DRI-EAF teknoloji süreci ortalama olarak 1 tCO₂ doğrudan²⁰ ve 1,4 tCO₂ dolaylı²¹ emisyonu neden olmaktadır (IEEFA, 2022). Bu bağlamda, net sıfır karbon emisyonu hedefine ulaşmak için en umut verici yöntemlerden biri hidrojeni indirgeyici ve ana ısı kaynağı olarak kullanmaktır (SHURA, 2023). Yenilenebilir hidrojenin ve yenilenebilir enerjinin üretim süreçlerine dahil edilmesiyle, EAF teknolojisinde enerji kaynaklı karbon emisyonları minimize edilebilir. Demir-çelik sektörünün karbondan arındırılması için izlenebilecek bir diğer yöntem ise, EAF teknolojisinde temiz elektriğin kullanılması ve BF teknolojisinde kömür tüketiminin azaltılması/kaldırılması olabilir.

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Ekim 2023 tarihinde demir-çelik sektörü için “Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası” çalışmasını yayımlamıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023). Çalışmada yer alan Düşük Karbonlu Senaryo’da (LCP), EAF üretim kapasitesinin bir kısmının öncelikle EAF-DRI teknolojisine dönüşeceği ve sonrasında bu teknolojinin de yerini hidrojen bazlı DRI kullanan BOF teknolojilerine bırakacağı belirtilmiştir. 2053 yılında EAF üretim kapasitesinin %13’ünün DRI ve hidrojen bazlı teknolojilere dönüşmesi hedeflenmektedir. Yürütülen analizlere göre 2053 yılına kadar yenilenebilir hidrojen, toplam üretim kapasitesinin %25’i (21,8 Mt) için kullanılacaktır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

5.1.2 Çimento

Dünya genelinde inşaat sektörünün büyümesi, çimentoya olan talebin büyük oranda artmasına neden olmaktadır. Çimento üretim süreçleri yüksek seviyede GHG emisyonu oluşturmaktadır. Çimento sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarının çoğunluğu CO₂ emisyonları olup, yaklaşık %65’i çimento üretimi²² sırasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlardan açığa çıkmakta ve geri kalan kısım yakıt yanması kaynaklı gerçekleşmektedir (SHURA, 2023; Izumi ve diğerleri, 2021). 2018 yılı itibarıyla, doğrudan karbon emisyonlarının yoğunluğu üretilen ton çimento başına 0,58 tCO₂ seviyesindedir (IEA, 2023). 2022 yılında küresel ölçekli toplam çimento üretimi 4,2 milyar ton seviyesinde gerçekleşmiş ve bu üretimde açığa çıkan karbon emisyonları, küresel karbon emisyonlarının %8’ini oluşturmuştur (Carbon Clean, 2023; IEA, 2023).

¹⁹ H₂ ve CO karışımı.

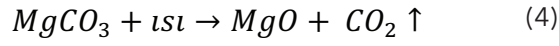
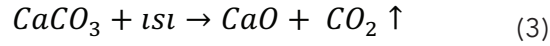
²⁰ Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil yakıt kaynaklı emisyonlar.

²¹ Doğrudan ilgili olmayan ancak insan faaliyetleriyle bağlantılı olan emisyonlar.

²² Sera gazı emisyonu kireç taşının kalsiyum okside dönüşümünde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşmaktadır.

Çimento sektöründe, mevcut üretim süreçlerinde proses kaynaklı karbon emisyonları kaçınılmazdır. Klinker oluşturmak için kireçtaşı ve diğer hammaddeler yüksek sıcaklıkta ısıtılarak çimento fırınında kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle saf kireç elde edilir. Çimento üretiminden kaynaklanan toplam karbon emisyonlarının yaklaşık üçte ikisi kalsinasyon işlemi sırasında kireçtaşının ayrıştığı reaksiyonlardan, geri kalan kısmı ise yakıtın yanmasından kaynaklanmaktadır (Izumi ve diğerleri, 2021).

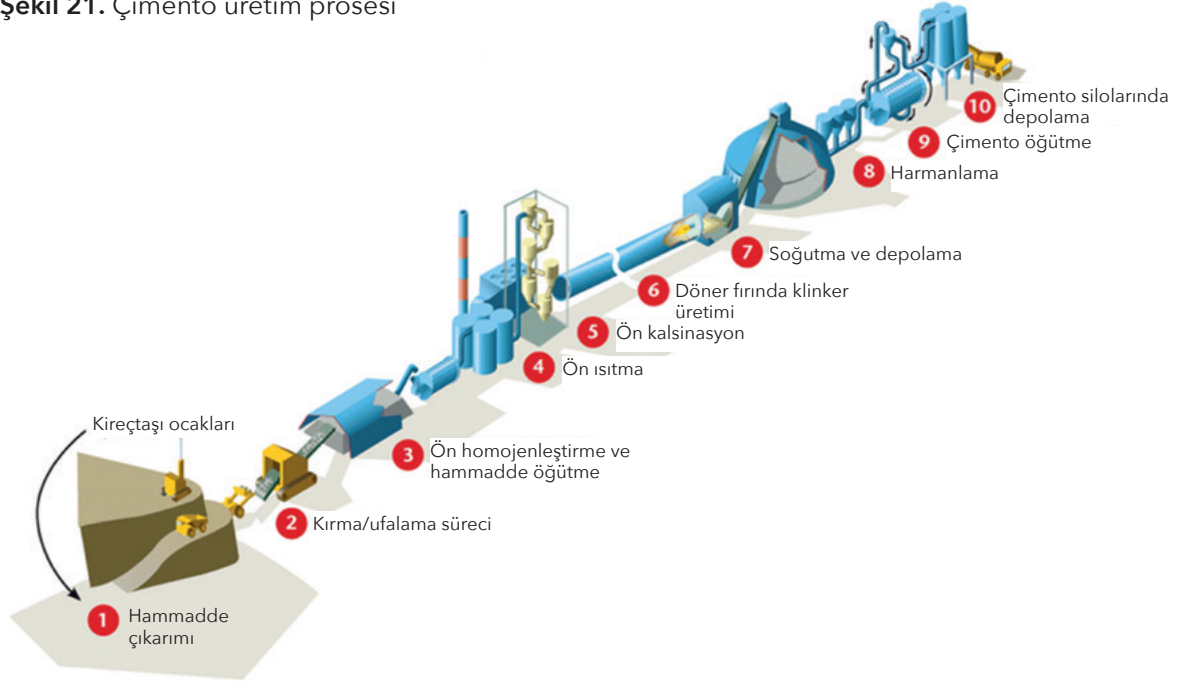
Tipik bir kalsinasyon prosesi Denklem 3’te gösterilmektedir :



Kireçtaşı, %65 oranında kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) ve %1,5 oranında magnezyum karbonat ($MgCO_3$) içermekte ve içeriğindeki karbon nedeniyle kimyasal prosesler, emisyonların büyük bir kısmına neden olmaktadır. Kimyasal reaksiyon sırasında ortaya çıkan emisyonlar kolaylıkla önlenemese de enerji kaynağının yenilenebilir hidrojenle değiştirilmesi yakıt kaynaklı emisyonları önemli ölçüde azaltacaktır.

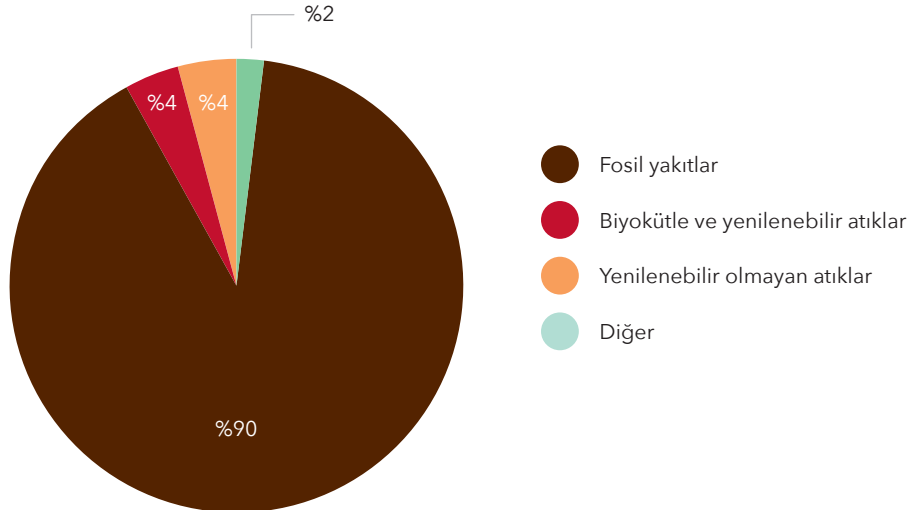
Çimentonun ana hammaddeleri kireçtaşı ve kildir. Çimento üretimi için bu malzemeler öncelikle 10 santimetre (cm) boyutuna kadar kırılır ve ardından çimento fabrikasına taşınır. Daha sonra kırılan malzemeler öğütülerek gerekli oranlarda hammadde elde edilir. Kalsinasyon işlemi için ürünler ilk önce 900 °C üzerine ısıtılır. Klinker üretimi için kalsinasyon işlemine uğramış ürünler tekrar fırında 1.450 °C’ye kadar ısıtılır. Isıtma işlemi ardından klinker kısa sürede 1.000 °C’den 100 °C’ye soğutulur. Klinker; alçı, kireçtaşı, kül gibi mineral bileşenlerle birleşerek çimentoyu oluşturur. Son olarak, soğutulmuş klinker ve alçı karışımı, harmanlanmış çimento yapmak için öğütülerek toz haline getirilir veya diğer minerallerle birlikte öğütülür. Fosil yakıtların ana yanma süreçleri, yüksek sıcaklık gerektiren kalsinasyon ve klinker üretiminde meydana gelmektedir (IEA, 2018). Çimento üretim prosesleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 21):

Şekil 21. Çimento üretim prosesi



Çimento sektöründe ana enerji kaynağı fosil yakıtlardır (IEA, 2023). Sektörün toplam enerji talebinin %90'ını fosil yakıtlar karşılamaktadır (Şekil 22). Bu bağlamda, net sıfır karbon emisyonu hedefine paralel olarak çimento sektöründe toplam emisyonların azaltılması, çimento sektörü enerji yoğunluğunun azaltılmasını da gerektirmektedir. Bunun için, sektörde elektrifikasyon düzeyinin artırması ve biyokütlenin yakıt olarak kullanılması önemlidir. Yakıt emisyonlarını azaltmak için diğer önemli bir eylem ise yenilenebilir hidrojen gibi türevlerinin de kullanımının üretim süreçlerine dahil edilmesidir.

Şekil 22. Çimento sektörünün küresel ölçekte enerji kaynak dağılımı (2022)



Kaynak: IEA (2023)

Kimyasal reaksiyon kaynaklı emisyonlar göz önüne alındığında, karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) sistemleri çimento sektörü için bir çözüm olabilir. CCUS teknolojisi ile yakalanan CO₂ hammadde üretiminde kullanılabilir. Böylelikle, üreticiler çimento içeriğini %7 oranında azaltarak maliyet tasarrufu da sağlayabilecektir (Carbon clean, 2023).

2022 yılında Türkiye’de toplam çimento üretimi 73,7 Mt, toplam klinker üretimi ise 72,1 Mt olarak gerçekleşmiştir. 2023 yılında ise çimento üretim miktarı bir önceki yıla göre 7,8 Mt artış göstererek 81,5 Mt’ye yükselmiştir (Türkçimento, 2023). 2022 yılında çimento ve klinkerin ihracat payları sırasıyla %25 ve %12 şeklindedir.

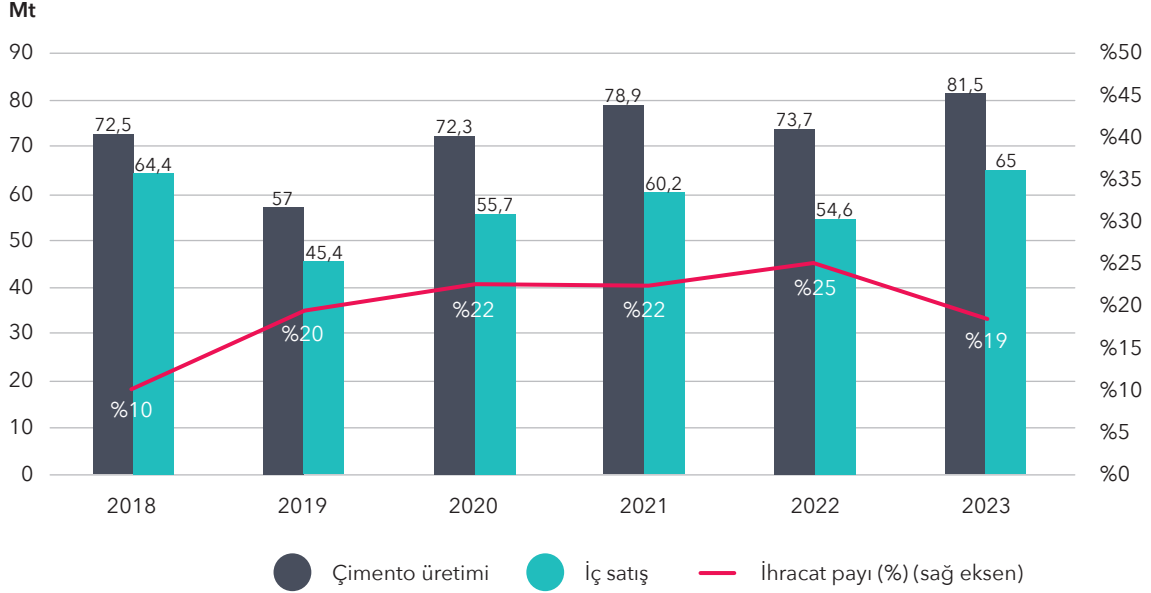
Şekil 23. Türkiye’de bulunan çimento fabrikalarının illere göre dağılımı



Kaynak: TÜRKCİMENTO (t.y.)

SHURA'nın (2023) "Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası" çalışmasında, çimento üretimindeki büyümenin hem nüfus hem de konut talebi artışına paralel olarak gelişeceği öngörülmüştür. Son birkaç yılda yurt içi inşaat pazarındaki düşüşe bağlı olarak çimento ihracatının payı %30 artış göstermiştir. Ancak iç pazarın toparlanmasıyla birlikte çimento ihracatının payının %10 civarına düşmesi beklenmektedir. Ayrıca, 2023 yılında gerçekleşen Kahramanmaraş merkezli deprem sonrası yapılanma, inşaat malzemelerinde artış ve fiyat baskıları da oluşturmıştır.

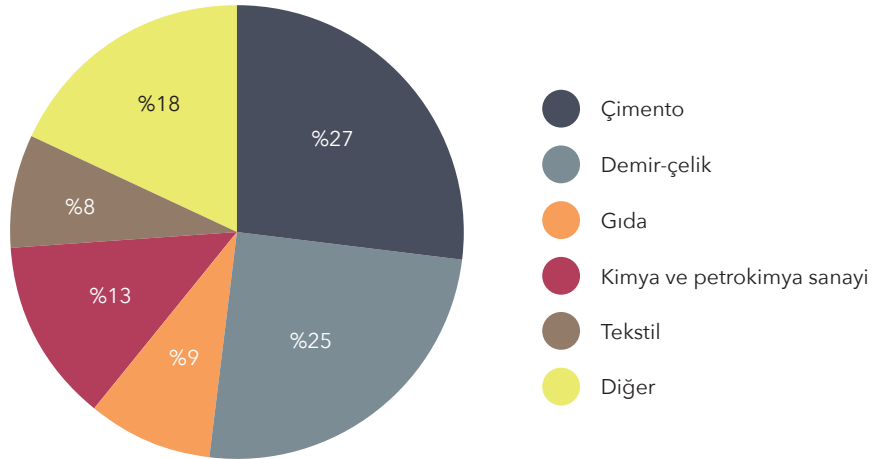
Şekil 24. Türkiye’nin çimento üretim ve tüketim seviyeleri (2018-2023)



Kaynak: TÜRKÇİMENTO (2023)

Çimento sektörü de demir çelik sektörü gibi enerji ve karbon yoğunluğu yüksek sektörlerden biridir. Çimento sektörü, 2022 yılında sanayideki toplam fosil yakıt kullanımının %27’sinden tek başına sorumludur (Şekil 25).

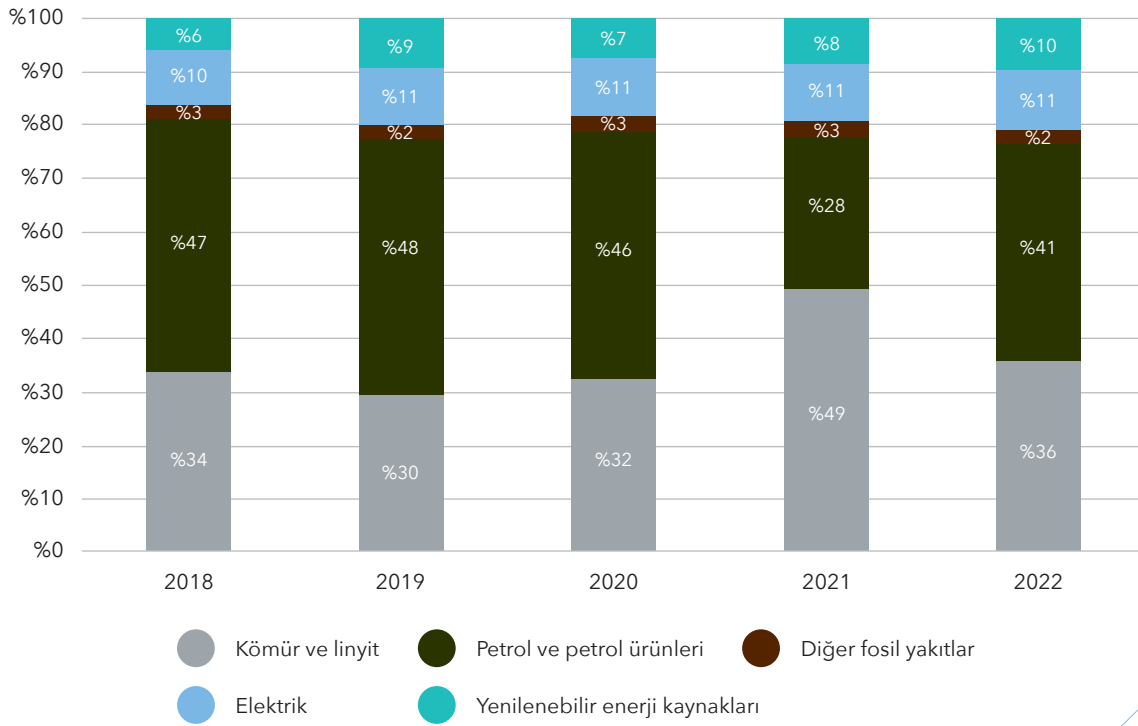
Şekil 25. Sanayi alt sektörlerin fosil yakıt tüketimindeki payları (2022)



Kaynak: ETKB (2023)

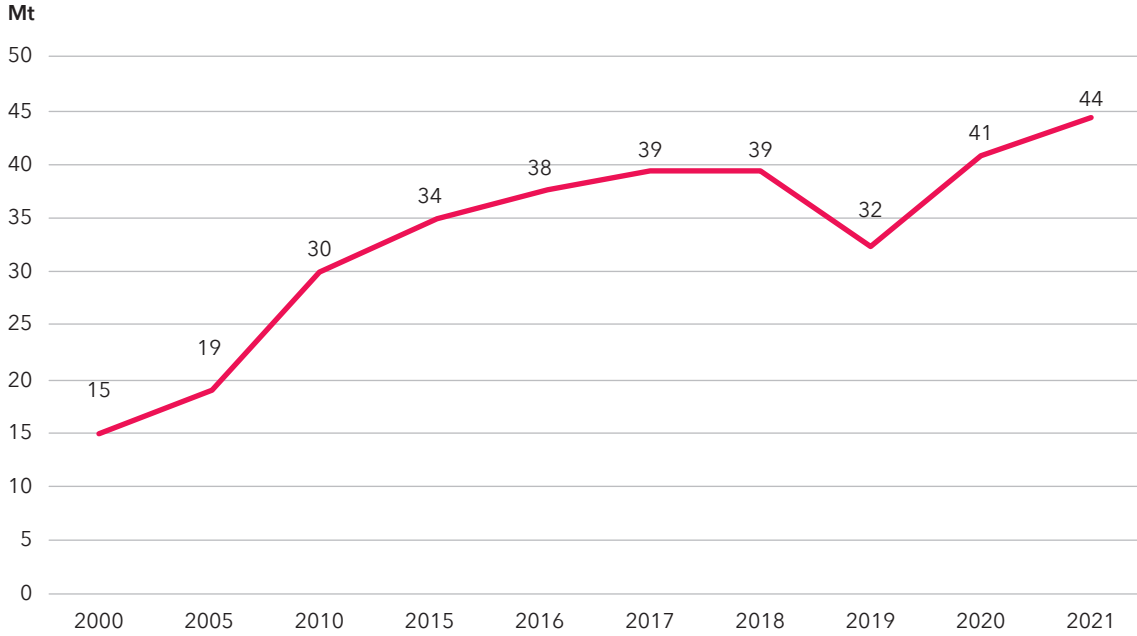
Çimento sektörü kaynaklı toplam enerji talebinin %79’u fosil yakıtlardan oluşmaktadır (Şekil 26). Sektör, 2022 yılında Türkiye sanayisinde tüketilen kömürün %28’inden, petrol ürünlerinin %87,6’sından ve doğal gaz kullanımının %2’sinden sorumludur (ETKB, 2023). Türk çimento sektöründe karbon emisyonları 2019 yılından itibaren yeniden artış göstererek 2020 ve 2021 yıllarında üst üste son 20 yılın en yüksek seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 27). Bu değerler, net sıfır hedeflerine ulaşmak için çimento sektöründe enerji dönüşümüne acil ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Şekil 26. Yakıt bazında Türkiye çimento sektörünün enerji tüketimi (2018-2022)²³



Kaynak: ETKB (2023)

²³ Diğer fosil yakıtlar: Doğal gaz, türetilmiş gazlar ve kok kömürü.

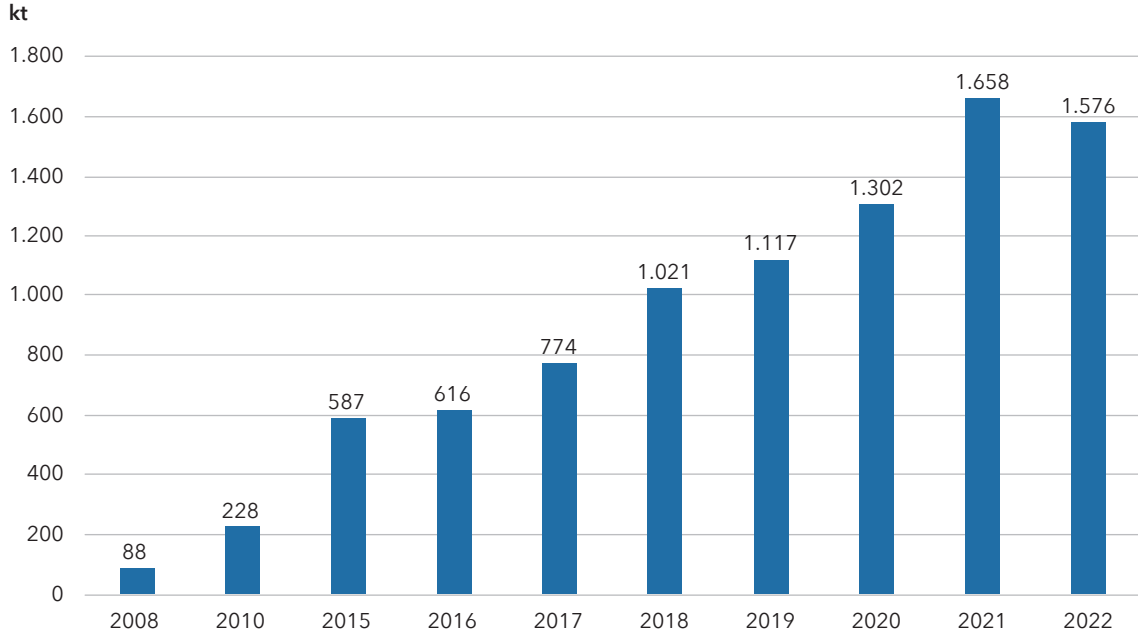
Şekil 27. Türkiye çimento sektörü kaynaklı karbon emisyonları (2000-2021)

Kaynak: TÜİK (2023)

Türk çimento sektörüne ilişkin çeşitli karbonsuzlaşma projeksiyonlarına göre, finansman mekanizmalarının ve karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojisinin geliştirilmesi, sektörün 2053 net sıfır hedefine ulaşmasında büyük önem arz etmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024).

Biyokütlenin, çimento üretimi sürecinde salınan karbon emisyonlarını azaltmak için sınırlı ama ihtiyaç duyulan bir etkisi vardır. Biyokütle, atıklardan üretildiğinden dolayı karbon-nötr olarak kabul edilir ve dolayısıyla biyokütle yakıt olarak kullanıldığında karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Çimento endüstrisinde kullanılan biyokütle içeren atıklar arasında kurutulmuş evsel kanalizasyon çamuru, tarım ve ormancılıktan kaynaklanan atıklar, ömrünü tamamlamış lastikler, tekstil atıkları ve evsel katı atıklardan üretilen yakıtlar bulunmaktadır (TÜRKÇİMENTO, 2023). Türkiye çimento sektöründe biyokütle enerjisi kullanımı 2008 yılında 88 kiloton (kt) iken, 2022 yılında yaklaşık 1,5 Mt'a yükselmiştir. Türkçimento'ya (2023) göre çimento üretiminde biyokütle kullanım miktarı Türkiye'de %10'luk termal enerji ikame oranına karşılık gelirken, bu oran Avrupa ülkelerinde %50 seviyesindedir.

Atık ısı geri kazanımı, çimento fabrikalarında enerji tüketiminin azaltılması için önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak, enerji faturalarının ve ikincil sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi çeşitli faydaları bulunmaktadır. Bu doğrultuda, atık ısı geri kazanım sistemlerinin kurulmasına yönelik teşviklerin geliştirilmesi konusu T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın PwC ile Ocak 2024'te ortak yayımladığı "Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası"nda da bahsedilmiştir. Bu çalışmalar için öngörülen ilk faz 2023-2025 yılları arası olarak değerlendirilmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024).

Şekil 28. Türkiye çimento sektöründe biyokütle tüketimi (2008-2022)

Kaynak: TÜRKÇİMENTO (2023)

Yenilenebilir hidrojen de çimento üretim sürecinin orta-yüksek dereceli ısı (yaklaşık 1.000 °C) gerektirmesi nedeniyle kömür ve doğal gaz kullanımının yerini alacak alternatif bir yakıt olabilir. Hidrojeni yakıt olarak kullanarak çimento fırını için gerekli miktarda ısıyı oluşturmak mümkündür. Ancak karbon emisyonlarının %65’i kimyasal reaksiyonlardan kaynaklandığından, hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda toplam emisyonların yalnızca %35’i azaltılabilmektedir (SHURA, 2023; Izumi ve diğerleri, 2021). Isıl işlemlerde hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra, klinker/çimento oranlarının azaltılması da değerlendirilebilir. Çimento sektöründe önemli bir bileşen olan klinker karbon emisyonlarının belirli bir kısmından sorumludur. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan klinker miktarını azaltmak için hidrojen, hammadde karışımında indirgeyici bir madde olarak kullanılabilir. Böylece, süreçte oluşan karbon emisyonlarının %50 oranında azaltılmasına yardımcı olabilir (NBM&CW, 2023).

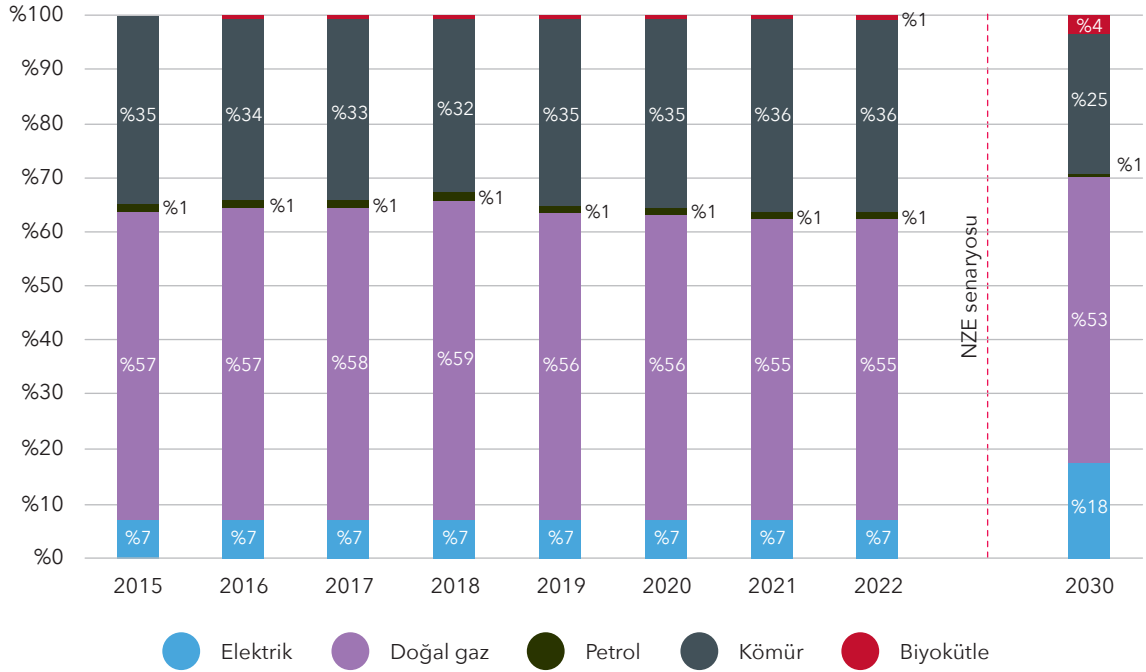
T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Ocak 2024 tarihinde, çimento sektörü kaynaklı emisyon azaltımını hedefleyen “Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası” çalışmasını yayımlamıştır. Çalışmada enerji verimliliği uygulamalarının yanı sıra hidrojen ve alternatif yakıtların kullanımına geçişin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, düşük karbonlu çimento üretimi amacına yönelik olarak hidrojen ve CCUS teknolojisinin emisyonları sıfıra ulaştırabilecek anahtar teknolojiler olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, mevcut termal ihtiyaçlar için biyokütle kullanımının bir noktada yetersiz kalacağı ve fırın yakıtı olarak yenilenebilir hidrojenin kullanılması karbonsuzlaşmaya yönelik en kritik adımlardan biri olacağı analiz sonuçlarında belirtilmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024).

5.1.3 Kimya ve petrokimya

Kimya sektörü, tarım, gıda, hijyen, ulaşım gibi hemen hemen tüm sektörlerin vazgeçilmez bir bileşeni olması nedeniyle, dünyanın en büyük endüstrilerinden birisidir. Kimya sektörü en büyük endüstriyel enerji tüketicilerinden olup, doğrudan karbon emisyonu salımı açısından üçüncü büyük sanayidir (IEA, 2023). Kimya sektörünün alt sektörlerinin neredeyse yarısında fosil yakıtlar hem hammadde hem de enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

2022 yılında, kömür ve doğal gazın hammadde olarak kullanılması nedeniyle kimya sektörünün küresel ölçekteki toplam doğrudan karbon emisyonu yaklaşık 935 MtCO₂ olmuştur. Doğal gaz ve kömür, içeriğinde yüksek miktarda karbon ve hidrojen bulunması nedeniyle temel kimyasalların (örneğin amonyak, etilen, propilen) üretiminde kullanılmaktadır (IEA, 2023). 2022 yılında üretime yönelik toplam enerji tüketiminin yaklaşık %91'ini kömür ve doğal gaz oluşturmuştur (Şekil 29).

Şekil 29. Kimya sanayisinin küresel toplam enerji tüketimi (2015-2022 gerçekleşen; 2030 tahmini)



Kaynak: IEA (2023)

Kimya sektörünün karbondan arındırılmasında öne çıkan 3 temel strateji bulunmaktadır (Agora Energiewende, 2023):

- 1) Isı pompaları ve elektrikli kazanlar kullanılarak doğrudan elektrifikasyon uygulamalarının kullanımı,
- 2) Fosil yakıt kaynaklı hammadde talebi ve kimyasal ürünlerin kullanım ömrü sonu emisyonlarını azaltmaya yönelik döngüsel ekonomi uygulamalarının adaptasyonu ve,
- 3) Fosil yakıtların yenilenebilir hammaddelerle (yenilenebilir hidrojen, yeşil amonyak vb.) ikame edilmesi.

Mevcut durumda, kimya sektörü ve rafineriler küresel hidrojen üretim ve talebinin %80’inden fazlasını oluşturmaktadır (Foreks, 2023). Avrupa’da yaklaşık 10 Mt hidrojen, amonyak üretiminde ve rafinerilerde hammadde olarak kullanılmaktadır. Hidrojen, petrol ürünlerinin rafinasyonunda sadece sera gazı emisyonunu azaltmak için değil, nihai ürünlerin kalitesini artırmak için de kullanılmaktadır (Markets & Markets, 2023).

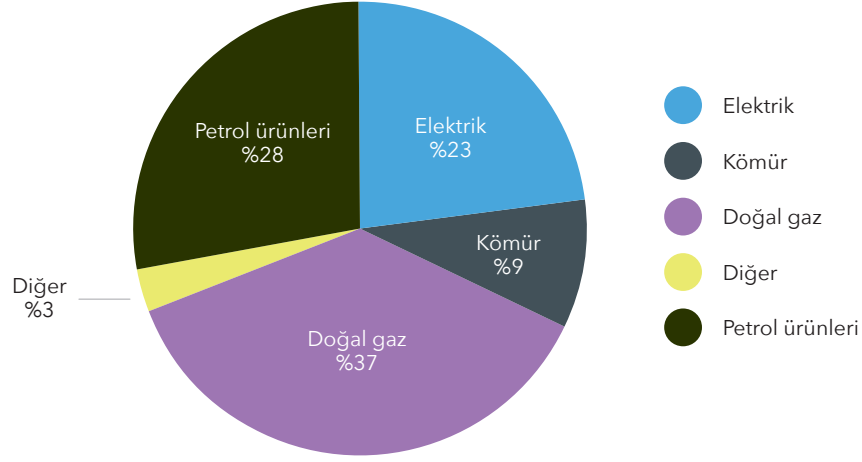
Kimya sektöründe hammadde olarak gri hidrojen yerine yenilenebilir hidrojen kullanılabilir (IRENA, 2022). Bu ikame ile yüksek ısılı işlemlerden kaynaklanan karbon emisyonları azaltılabilir ve fosil yakıtlar yerine amonyak/metanol üretiminde yenilenebilir hidrojen kullanılabilir.

Fosil yakıtlar, kimyasal ürün üretiminde çoğunlukla hammadde olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtların üretim süreçlerinde yakılması veya hammadde olarak kullanımı, sektörün toplam sera gazı emisyonlarının yarısını oluşturmaktadır (En-former, 2023).

Avrupa Birliği (AB), başta hijyen ürünleri, ilaç, boya, plastik ve gübre olmak üzere kimya sektöründe kullanılan amonyak ve metanol üretiminin karbonsuzlaşmasına yönelik hibe desteği verilecek projeler belirlemiştir (European Commission, t.y.).

Türkiye’de kimya sektörü ağırlıklı olarak petrokimya, sabun, deterjan, gübre, ilaç, boya-vernük, sentetik elyaf ve soda alt sektörlerinden oluşmaktadır. Bu sektörler arasında petrokimya, kimya sektöründeki toplam üretimin %25’ini oluşturmaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2023). Türkiye’de kimya sektörü, Türkiye sanayisinin toplam fosil yakıt tüketiminin %12,9’unu oluşturmaktadır (ETKB 2022). ETKB verilerine göre kimya sektörünün enerji tüketimi 2022 yılında 4,5 Mtep olarak gerçekleşmiştir. Kimya sektöründeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %64’ü yani 2,9 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep) ile fosil yakıt kaynaklı tüketim oluşmuştur (Şekil 30). Ayrıca, petrokimya dahil olmak üzere kimya sanayi, Türkiye’deki diğer sanayi sektörleri arasında organize sanayi bölgelerinden sonraki en büyük gaz tüketicisidir (EPDK, 2023).

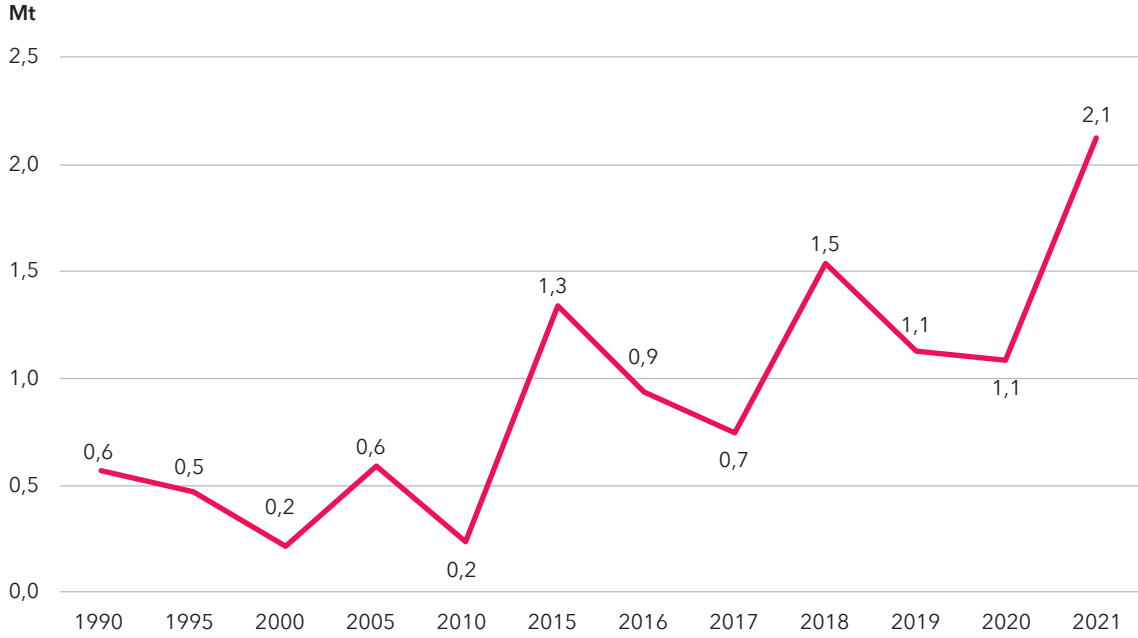
Şekil 30. Türkiye kimya sektöründe enerji tüketimi (2022)²⁴



Kaynak: ETKB (2023)

2021 yılında kimya sektöründeki toplam karbon emisyon miktarı yaklaşık 2,1 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (TÜİK, 2023). Bu durum, fosil yakıtların hem hammadde hem de enerji kaynağı olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 31).

Şekil 31. Türkiye kimya sektörünün toplam karbon emisyonları (1990 - 2021)



Kaynak: TÜİK (2023)

²⁴ Diğer: Biyokütle & atıklar, atık ısı, petrol ürünleri.

Türkiye’de petrokimya tesislerinde halihazırda yakıt olarak gri hidrojen kullanılmaktadır (SHURA, 2021). Dolayısıyla, bu sektörün karbon ağırlıklı hidrojen kullanımından, yenilenebilir hidrojene geçişte öncülük etmesi mümkündür (SHURA, 2021). Yenilenebilir hidrojen petrokimya üretiminde iki farklı şekilde kullanılabilir. Yenilenebilir hidrojen, buharla parçalama işlemleri sırasında yanma için yakıt olarak kullanılabilir. Bu süreç için elektrifikasyon bir başka uygun seçenektir. İkinci olarak da yenilenebilir hidrojen, amonyak ve metanol üretmek için hammadde olarak kullanılabilir.

ETKB, “Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” strateji dökümanında, 2035 yılına kadar hem kimya hem de petrokimya sektöründe yenilenebilir hidrojen kullanım oranının hızla artacağı öngörülmektedir. Ayrıca, kimya sektöründe yenilenebilir hidrojenin kullanımının yaygınlaştırılmasını teşvik edecek bir mekanizma hayata geçirilecektir (ETKB, 2023). Bu nedenle, Türkiye’de için hidrojen piyasasına ilişkin detaylı analizlere ihtiyaç vardır.

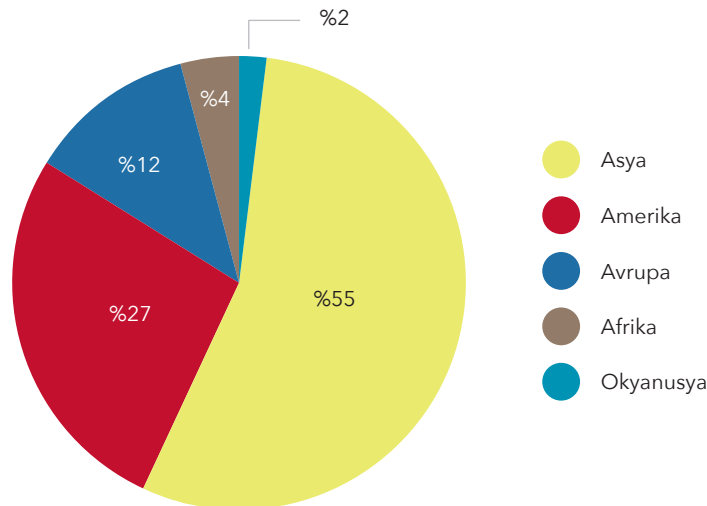
Yenilenebilir enerji kapasitesi gelişiminin hızlandırılması ve ekonomik teşvikler, karbondan arındırılması zor sektörlerde düşük maliyetli hidrojen kullanımını destekleyerek, Türkiye’nin 2053 yılı net sıfır hedefine ulaşmasında fayda sağlayabilir. 2030-2050 yılları arasında rafineriler ve petrokimya sektörü için yenilenebilir hidrojen üretim ve tüketimi en ekonomik seçeneklerden biri olarak değerlendirilmektedir (SHURA, 2021).

5.1.3.1 Gübre

Günümüzde tarım ürünlerinin neredeyse yarısı gübreyle üretildiğinden, gübre sektörü küresel gıda talebinin karşılanmasında kilit bir öneme sahiptir (Prasad, 2009).

2020 yılında gübre kullanımı %55 ile Asya’da gerçekleştirilmiş olup, Asya’yı %27 ile Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve %12 ile Avrupa takip etmiştir (Şekil 32). Kullanılan gübre türü bölgeden bölgeye farklılık gösterse de azot içeren gübreler en çok tercih edilen (toplam gübre tüketiminin %56’sı) ve dünya pazarında hakim olan gübre çeşitidir (Türkiye Bankalar Birliği, 2023).

Şekil 32. Bölgeler bazında küresel gübre kullanımı (2020)

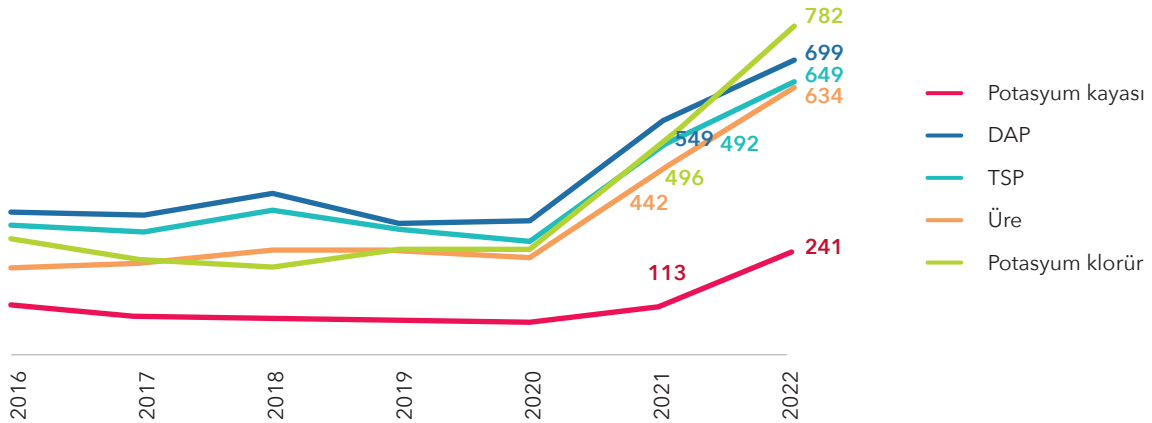


Kaynak: Türkiye Bankalar Birliği (2023)

Amonyak, gübre üretimi için gerekli temel hammadDEDİR ve her yıl üretilen amonyağın yaklaşık %80'i gübre üretiminde kullanılmaktadır (Fertilizers Europe, t.y.). Gübre üretimi için gerekli amonyağın üretiminde kullanılan fosil yakıt bazlı hammaddeler ve buhar metan reformasyon (SMR) süreçleri nedeniyle sektör, küresel karbon emisyonlarının %1,1'inden sorumludur (The European Fertiliser Manufacturers Association, 2021). Günümüzde, küresel amonyak üretiminin neredeyse %96'sı doğal gazın (%50), petrolün (%31) ve kömürün (%19) kullanıldığı Haber-Bosch yöntemi ile üretilmektedir (AWOE, 2023). Mevcut durumda amonyak üretim sürecinde gri hidrojen kullanılmaktadır. İlgili proseste, yıllık küresel fosil yakıt tüketiminin %1'i kullanılmaktadır (Berkeley News, 2023). Dahası, SMR prosesinin kendisi de karbon yoğun hidrojen üretirken, ilave karbon emisyonlarına neden olmaktadır.

Küresel gübre üretiminde kullanılan amonyağın büyük bir kısmı doğal gaz kaynaklıdır. Dolayısıyla, gübre sektörü Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle artan doğal gaz fiyatlarından da etkilenmiştir (Şekil 33). Doğal gazın jeopolitik gelişmelere olan bağımlılığı nedeniyle gübre fiyatı 2023 yılında da artmaya devam etmiştir (Türkiye Bankalar Birliği, 2023).

Şekil 33. Gübre fiyatları (ABD\$/Mt) (2016-2022)²⁵



Kaynak: Türkiye Bankalar Birliği (2023)

Yeşil amonyağın döngüsel ekonomi ilkelerine uygun olarak üretilmesi mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynaklı hidrojen, depolanabilen yeşil amonyak üretiminde de kullanılabilir. Böylece sürdürülebilir enerji ve ürün döngüsü oluşturulabilir (PIN, 2023). Ayrıca, yakın gelecekte yenilenebilir hidrojenin daha istikrarlı ve öngörülebilir fiyatları olacağı değerlendirildiğinden, gübre fiyatları ve tedariki daha sürdürülebilir olacaktır (PIN, 2023).

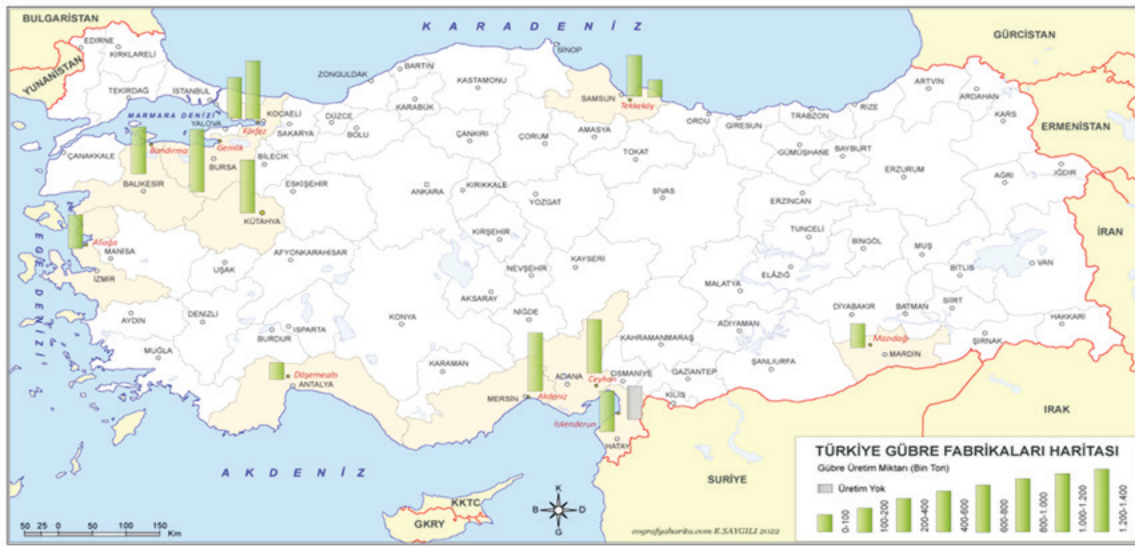
Türkiye'de yılda yaklaşık 7 Mt gübre tüketilmektedir ve kurulu gübre fabrikaları Türkiye'nin 11 iline dağılmış durumdadır (Şekil 34). Küresel gübre tüketimi incelendiğinde, Türkiye dünyada sekizinci büyük tüketici konumundadır. Türkiye'de kullanılan gübrelerin neredeyse yarısı toprak yapısından dolayı azottan oluşmaktadır (Türkiye Bankalar Birliği, 2023).

²⁵ DAP: Diamonyum Fosfat, TSP: Triple Süper Fosfat.

Azotlu gübre üretiminde hem enerji kaynağı hem de hammadde olarak doğal gaz kullanılırken, bu gübrelerin toplam üretim maliyetinin neredeyse %85’ini doğal gaz maliyetleri oluşturmaktadır (TRT Haber, 2023). Türkiye gübre sektörünün 2022 yılı toplam enerji tüketiminin %91’ini doğal gaz oluşturmuştur (ETKB, 2023).

Amonyak kullanılarak üretilen üre kaynaklı net CO₂ emisyonları bir önceki yıla göre (1.489 kt CO₂) yaklaşık yarı yarıya azalarak 2022 yılında 701 kt CO₂ olarak gerçekleşmiştir (TÜİK, 2024). Bu miktar, endüstriyel süreçler ve ürün kullanımı (IPPU - Industrial Processes and Product Use) vasıtasıyla açığa çıkan CO₂ emisyonu miktarı olduğu belirtilmiştir.

Şekil 34. Türkiye’deki gübre fabrikalarının konumları



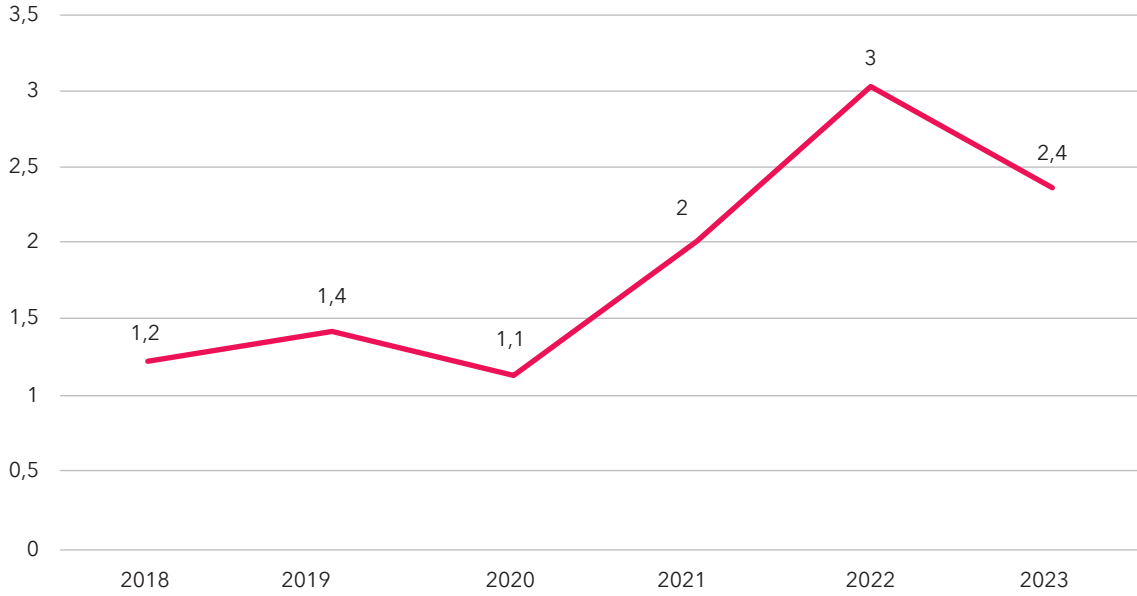
Kaynak: CoğrafyaHarita (2022)

Türkiye’de tüketilen toplam gübre miktarının yarısından fazlası yurt içinde üretilmektedir. Ancak Türkiye, gübre üretiminde kullanılan hammaddenin %95’ini ithal ettiğinden, hammaddede dışa bağımlı bir ülkedir (TRT Haber, 2023). Bu nedenle, Türkiye’nin amonyak ithalatı 2020 yılında 1,4 Mt’a yükselmiştir (Ekonomim, 2023).

Covid-19 salgınının etkisiyle son yıllarda tedarik zincirinde sorunlar yaşanmış ve bu durum üretim maliyetlerine de yansımıştır. Daha önce de belirtildiği üzere, 2022 yılında başlayan Rusya-Ukrayna savaşı da doğal gaz fiyatlarını hızla artırmıştır (The Bank Association of Türkiye, 2023). Küresel düzeyde yaşanan bu gelişmeler gübre fiyatlarını da etkilemiştir. Türkiye, 2023 yılında 2,3 milyar ABD\$ tutarında gübre ithalatı yapmıştır (TÜİK, 2024). Sektörde yeşil amonyak kullanılması durumunda, gübre ithalatının ve dolayısıyla ithalat faturasının ciddi oranda azalacağı öngörülmektedir. Ancak, yeşil amonyak üretimi için gerekli altyapı oluşturulmazsa, Türkiye’nin gübre ithalatının yakın gelecekte de benzer seviyelerde olacağı değerlendirilmektedir (Şekil 35).

Şekil 35. Türkiye’nin yıllara sari gübre ithalatı harcaması (2018-2023)

Milyar ABD\$



Kaynak: TÜİK (2024)

Doğal gaz fiyatlarında yaşanan artıştan dolayı, gübre üretiminde yenilenebilir hidrojene geçiş oldukça önemlidir. Böylelikle, gübre sektörünün hammadde bağımlılığı azalacak ve dış ticaret açığının kapanmasında ekonomiye destek sağlanacaktır. ETKB’nin yayınladığı “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” strateji dökümanında, yenilenebilir hidrojenin öncelikli olarak kullanılacağı sektörlerden birinin gübre sektörü olacağı belirtilmiştir (ETKB, 2023).

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, gübre sektörüne yönelik olarak enerji dönüşümü ihtiyacını incelemiş ve 2053 yılına kadar olan dönem için çeşitli senaryolar kapsamında bu dönüşümü modellemiştir. Bakanlık, Şubat 2024 tarihinde “Türkiye Gübre Sektörü için Düşük Karbonlu ve İklim Dirençli Yol Haritası” çalışmasını açıklamış ve bu çalışma kapsamında yürütülen analizlerde, boru hattında hidrojen kullanımı da incelenmiştir. Çalışmadaki düşük karbonlu senaryolar olan LCP ve FTS senaryolarında, 2053 yılı itibarıyla doğal gaz dağıtım sistemine hacimsel olarak %12 oranında hidrojen entegre edileceği değerlendirilmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024).

5.1.4 Cam

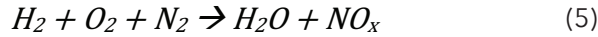
Cam, evlerden iş yerlerine, sağıktan ulaşımaya kadar günlük yaşamın hemen her alanında kullanılmaktadır. Dünya genelinde cam sektörü özelinde 2.160 tesis işletilmekte olup, toplam 1.200 şirket bulunmaktadır. Yıllık küresel üretim kapasitesi ise 209 Mt seviyesine ulaşmıştır (ICG, 2022). Küresel cam imalatının pazar büyüklüğü 178,8 milyar ABD\$ seviyesindedir ve 2023 yılından 2032 yılına kadar yıllık ortalama %5,8 Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (CAGR) ile toplam büyüklüğün %75 artacağı öngörülmektedir (Precedence Research, 2022).

Genel olarak, üretim sürecinde cam fırınlarından kaynaklanan emisyonların seviyesi;

- Kullanılan yakıt türü,
- Kullanılan hammaddenin içeriği ve,
- Geri dönüştürülmüş cam oranına (ÇŞİDB, 2020)

bağlı olarak değişmektedir. Üretim aşamasında kullanılan cam fırınlardaki yüksek ısı ihtiyacı nedeniyle yakıt olarak doğrudan doğal gaz veya petrol kullanılmaktadır. Dolayısıyla, sektör genel olarak yüksek düzeyde bir karbon ayak izine sahiptir. Cam üretiminden kaynaklanan küresel karbon emisyonları 2022 yılında 95 Mt’a yükselmiştir (Statista, 2023). Cam üretiminde yenilenebilir hidrojenle yararlanmak için, fırın teknolojisinin yenilenebilir hidrojene uyumlu olarak geliştirilmesi ve tüm yanma sürecinin hidrojen alevinin özelliklerine uyum sağlayacak şekilde yeniden tasarlanması gerekmektedir (Eurotherm, 2019).

Geleneksel, verimli ve rejeneratif bir fırında hidrojenin yakıt olarak kullanılması azot oksit (NO_x) emisyonuna yol açmaktadır (Formül 5):



Diğer önemli bir konu ise doğal gaz karışımında belli bir miktarın üzerinde hidrojen kullanıldığında NO_x emisyonunun muhtemelen artacağıdır. Bu bağlamda, NO_x azaltımına yönelik kanıtlanmış önlemlerin üretim süreçlerine uyarlanması gerekmektedir (Glasstec, t.y.). Aşağıda, hidrojenin cam imalat sektöründeki çeşitli uygulamaları yer almaktadır (Şekil 36):

Şekil 36. Cam sektöründe hidrojenin temel uygulamaları

Eritme fırınları

Hidrojen, cam üretiminde kullanılan ham maddeleri (kum, soda külü ve kireçtaşı) eritme sürecinde eritme fırınlarında yakıt olarak kullanılabilir. Yakıt olarak hidrojen kullanılması, eritme işleminde enerji tüketimini daha verimli hale getirilebilir, bu da emisyonların azalmasını ve ürün kalitesinin artmasını sağlamaktadır.

Ön ısıtma

Hidrojen aynı zamanda harman edilen malzemelerin eritme fırınına girmeden önce ön ısıtmaya tabi tutulması için de kullanılabilir. Bu, malzemeleri eritmek için gereken enerjinin ve sonrasındaki emisyonların azalmasına ve enerji verimliliğinin artmasına yol açabilir.

Cam şekillendirme

Hidrojen, cam şekillendirme işlemi sırasında cam yüzeyinin oksidasyonunu önlemek için koruyucu bir gaz olarak kullanılabilir. Bu durum, camın kalitesini artırmaya ve kusurları azaltmaya yardımcı olabilir.

Tavlama

Hidrojen, camın belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını ve ardından iç gerilimi azaltmak ve ürün kalitesini artırmak için yavaşça soğutulmasını içeren tavlama işleminde de kullanılabilir. Tavlama işleminde hidrojen kullanılarak, camı ısıtmak ve soğutmak için gereken enerji azaltılabilir, bu da enerji verimliliğinin artmasına ve emisyonların azalmasına katkı sağlar.

Türkiye’de cam sektörü üretim kapasitesi, yüksek teknolojisi, ihracat potansiyeli ve yurt içi talebi karşılama yeterli bir üretim seviyesindedir ve sanayinin en önemli alanlarından biridir. Cam üretiminde kullanılan kum, soda, kuvars gibi malzemeler Türkiye’de halihazırda bol miktarda bulunduğundan, sektörde %98 oranında yerli hammadde kullanımı sağlanmaktadır. Bu bağlamda Türkiye, cam üretiminde²⁶ dünyada ilk beş ülke arasında yer almaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022).

Cam sektörünün nihai enerji tüketimi incelendiğinde, sektörün toplam enerji tüketiminin %78’ini (708 bin tep) doğal gaz²⁷ ve %19’unu ise elektrik (175 bin tep) oluşturmaktadır (ETKB, 2023).

2022 yılında Türkiye cam sektörü kaynaklı toplam karbon salımı 7,7 Mt’dır. Sektördeki karbon emisyonlarının 6,6 Mt’lık kısmını Kapsam 1 emisyonları²⁸, geri kalan kısmını ise Kapsam 2 emisyonları²⁹ oluşturmaktadır. (Şişecam, 2022).

HYSouth Marmara Hidrojen Vadisi Projesi’nin kapsadığı sektörlerden biri de cam sektörüdür. Türkiye’de HYSouth Marmara Projesi ortaklarından biri olan Şişecam, düz camda kullanılan kalay banyolarındaki oksidasyonu önlemek amacıyla yerli olarak üretilecek yenilenebilir hidrojeni, gri hidrojenin yerine kullanmayı hedeflemektedir (Anadolu Ajansı, 2023; Şişecam, 2022).

5.1.5 Seramik

Seramik sektörü Avrupa çapında yaklaşık 600 binin üzerinde istihdam sağlamaktadır (Cerame-unie, 2021). Seramik, doğal malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Seramiğin şekillendirilmesinde doğal gaz genellikle yakıt olarak yüksek sıcaklık fırınlarında (700 °C - 2.000 °C) kullanıldığından, emisyonların büyük kısmı yanma işlemi sonrasında oluşmaktadır (Kei, t.y.). 2020 yılında Avrupa’da seramik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon miktarı 19 MtCO₂ olmakla birlikte, toplam karbon emisyonunun yaklaşık üçte ikisi yakıt yanmasından kaynaklıdır (Şekil 37).

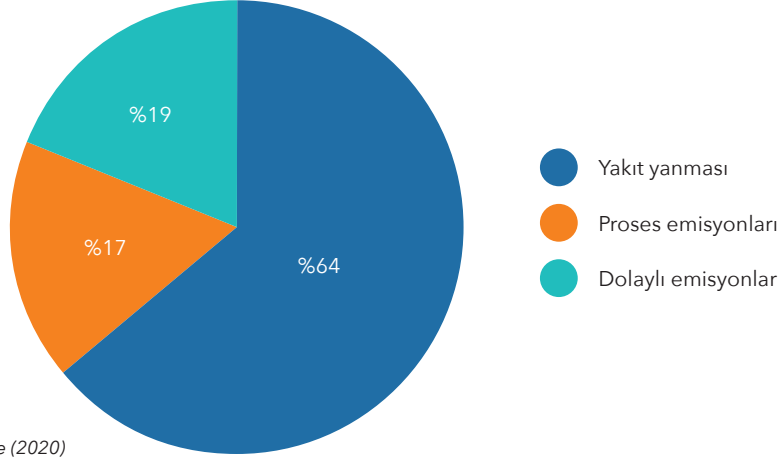
²⁶ Düz cam, cam ev eşyası, cam kap.

²⁷ Doğal gaz cam fırınlarında yakıt olarak kullanılmaktadır.

²⁸ Doğrudan emisyonlar.

²⁹ Dolaylı emisyonlar.

Şekil 37. Avrupa seramik sektörünün emisyon kaynakları (2020)



Kaynak: Cerame-unie (2020)

Yüksek ısı ihtiyacı nedeniyle sektörün enerji dönüşümünde elektrifikasyon tek başına yeterli olmamaktadır. Yenilenebilir hidrojen bu nedenle seramik sektörünün karbonsuzlaşması için önemli bir araç olmakla birlikte, üretim sürecinde hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için detaylı teknik fizibilite çalışmaları yürütülmelidir. Halihazırda kullanılan tünel fırınlarda, doğal gaz-hidrojen karışımı kullanılmaktadır. Doğal gaz ve hidrojenin yakıt olarak farklı kalorifik değerlere ve yoğunluklara sahip olmalarından ötürü, mevcut tesislerde kurulu olan brülörler yenilenebilir hidrojen kullanımı için yeterli olmayabilir (Kamps ve diğerleri, 2021). İlk aşamada, hidrojen ve doğal gazdan oluşan bir karışım kullanılabilir, ancak mevcut brülörlerde bu karışım kullanılmadan önce hidrojen oranının analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca doğal gazdan, doğal gaz-hidrojen karışımına geçiş sürecinde yeni boru hattı sistemi ve bağlantı parçaları gerekebilir (Kamps ve diğerleri, 2021).

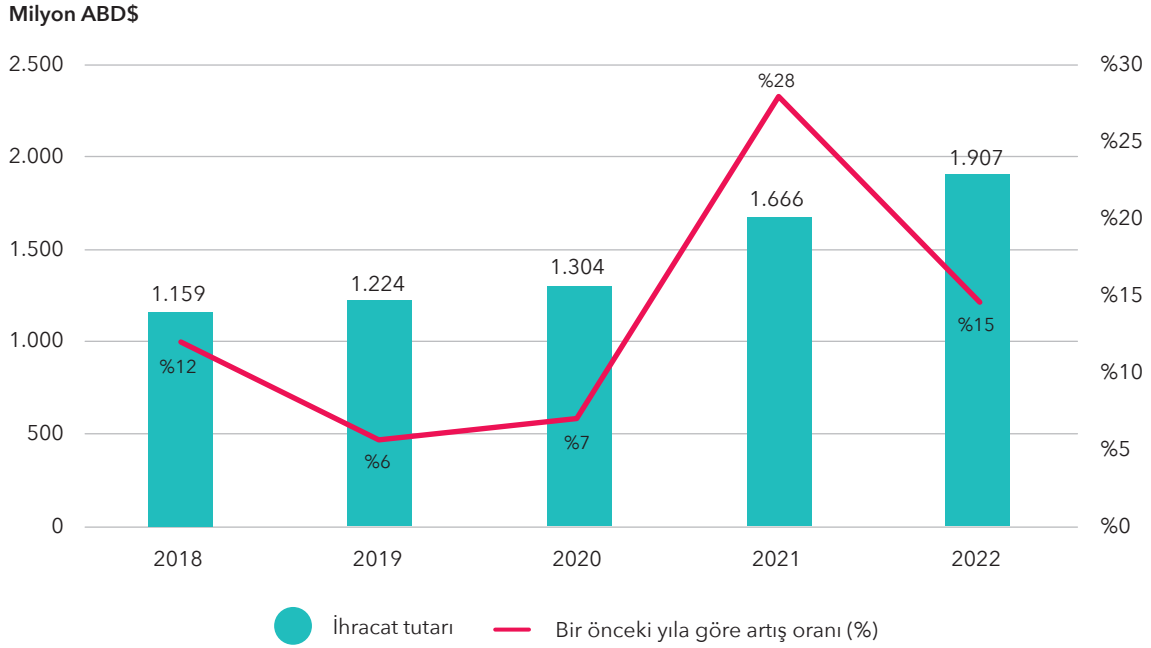
Öngörülemeyen doğal gaz kesintisi, sürekli çalışan fırınlarda ciddi hasara yol açabilmektedir (Cerame-unie, 2021). Bu nedenle, yenilenebilir hidrojen sürekli tedarik ve kesintisiz üretim sürecini sağlayarak, seramik üretimi için doğal gaz yerine bir alternatif sunabilir.

Bir diğer konu ise, doğal gazın üretim süreçlerinde kullanılmasından dolayı oluşan NO_x emisyonlarıdır. Çeşitli çalışmalarda alternatif bir yanma prosesi kullanılarak elde edilen düşük sıcaklıklı alevin, NO_x emisyonlarının azaltılmada etkili olduğu görülmüştür (Kamps ve diğerleri, 2021). Ancak, NO_x emisyonunun miktarının hidrojen kullanıldığında da artabileceği ve bu durumun karışımda kullanılan hidrojenin yüzdesi ile ilişkili olmadığı belirtilmiştir. Asıl neden, seramik üretim süreçlerinin ve süreçte kullanılan brülör tipinin hidrojen kullanımına uyumlu olmamasıyla ilgilidir. Dolayısıyla, seramik üretiminde yenilenebilir hidrojenin yakıt olarak kullanımı için brülör tipinin ve üretim sürecinin hidrojen kullanımına uygun olarak modifiye edilmesi gerekmektedir.

³⁰ %20 hidrojen, %80 doğal gaz olacak şekilde.

Seramik sektörü Türkiye’nin önde gelen sektörlerinden biridir. 2020 yılında, 6,2 Mt seramik karo, 0,3 Mt seramik tıbbi ekipman olmak üzere toplam 6,5 Mt seramik ürün üretilmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022). Türk seramik sektörünün ihracat miktarı son 5 yılda %65 artış göstermiştir (Şekil 38).

Şekil 38. Türkiye seramik sektörünün ihracat performansı (2018-2022)

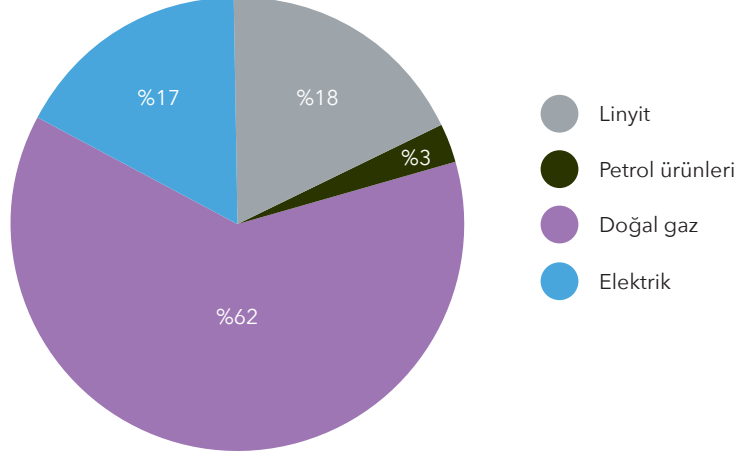


Kaynak: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2022); Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği (2022)

ETKB’nin yayımladığı Ulusal Enerji Denge Tabloları’na göre (2022), sektörün toplam tüketiminin %62’sini (1.367 bin tep) doğal gaz oluşturmakta olup sektörün enerji tüketiminde ilk sıradadır. Doğal gazın ardından kömür (taş kömürü ve linyit) %18³¹ ile ikinci sıradadır (Şekil 39).

³¹ 243 bin tep.

Şekil 39. Türk seramik sektörünün enerji tüketiminin yakıt cinsine göre dağılımı (2022)



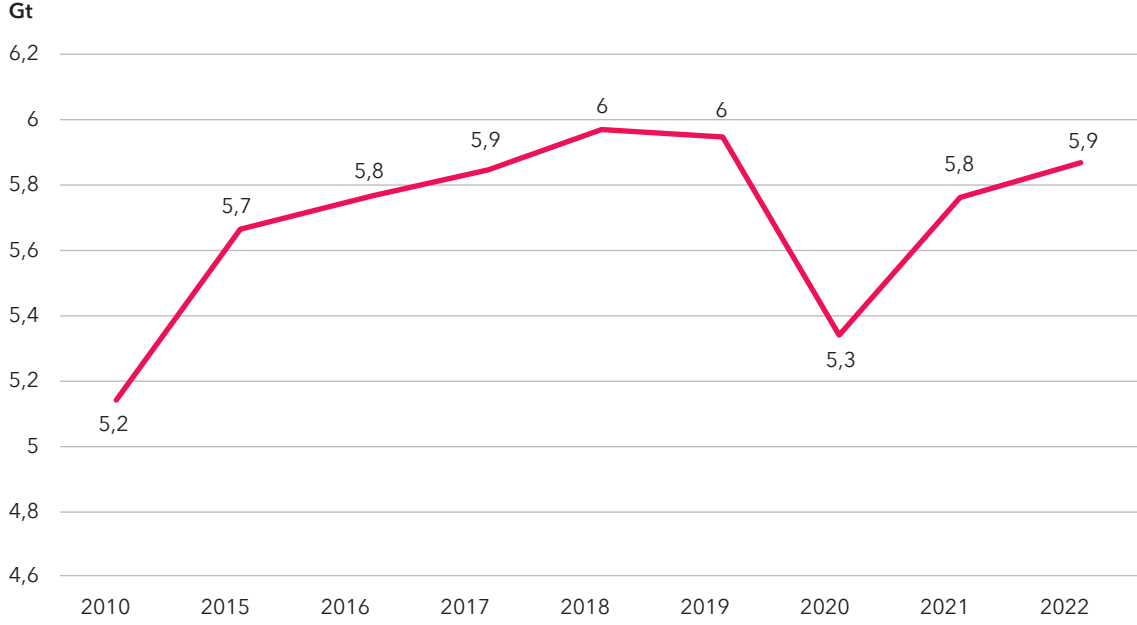
Kaynak: ETKB (2023)

KALE Seramik, HYSouth Marmara Projesi’nin ortaklarından biridir. Proje kapsamında KALE Seramik, mevcut yakma sistemlerinde yenilenebilir hidrojeni belli bir oranda doğal gaz yerine kullanmayı hedeflemektedir.

5.2 Ulaştırma

5.2.1 Karayolu taşımacılığı

2022 yılında ulaşım sektörü kaynaklı küresel karbon emisyonlarının %58,5’ini (5,87 Gt) karayolu taşımacılığı oluşturmuştur (IEA, 2023). Karayolu taşımacılığı kaynaklı emisyonların %99’unu ise binek araçlar, kamyonlar ve otobüsler oluşturmaktadır.

Şekil 40. Küresel düzeyde karayolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonları (2010-2022)

Kaynak: IEA (2023)

Enerji tüketiminde ise karayolu taşımacılığı 2022 yılında %90 oranında petrol ve doğal gaz kullanmıştır. Düşük emisyonlu yakıtların³² tüketimdeki payı 2022 yılında %5 iken, 2050 yılında bu oranın %93'e ulaşacağı öngörülmektedir (IEA, 2023). Bu doğrultuda, şarj ve yakıt altyapılarının da paralel olarak gelişmeye devam edeceği öngörülmektedir. Bu bağlamda IEA (2023), 2050 yılında küresel ölçekte, elektrikli araçlar için 31 milyon halka açık şarj noktası ve 46 bin hidrojen yakıt istasyonu kurulacağını değerlendirmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Karayolu taşımacılığı kaynaklı yakıt ve altyapı projeksiyonları

		2022	2030	2035	2050
Düşük emisyonlu yakıtların payı	Biyoyakıt	%5	%11	%12	%3
	Elektrik	%0	%8	%22	%74
	Hidrojen	%0	%1	%2	%16
Altyapı gelişimi	Elektrikli araç - halka açık şarj noktası (milyon)	3	17	18	31
	Hidrojen dolum istasyonu (bin)	1	12	15	46

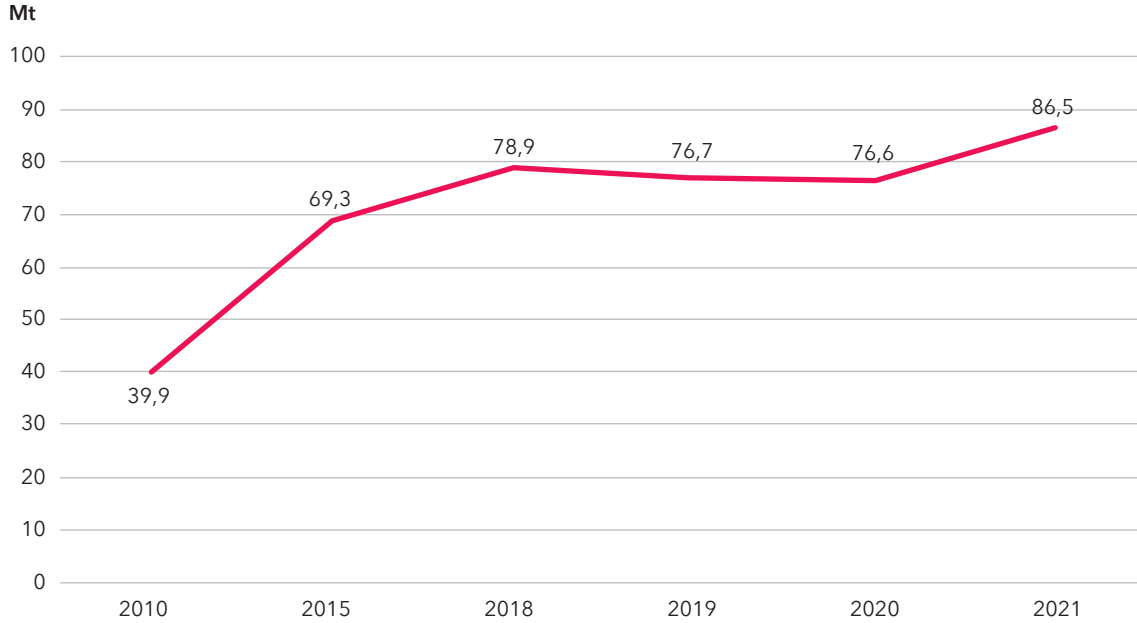
Kaynak: IEA (2023)

³² Biyoyakıt, elektrik ve hidrojen.

Aynı çalışmada IEA, 2045 yılına kadar ağır hizmet araçlarında fosil yakıtlı içten yanmalı motorlu kamyonların satışının yasaklanacağını varsaymakta ve ağır hizmet araçlarında (HDV) hidrojenin yakıt olarak kullanımının artacağını değerlendirmektedir (IEA, 2023). IEA, 2035 yılına kadar binek araçlar (otomobiller) için de benzer yasakların getirileceğini öngörmekte ve benzer bir eğilimin bu araç tiplerinde de görülebileceğini belirtmektedir. Bu varsayımlar doğrultusunda IEA, 2050 yılına kadar karayolu taşımacılığında hidrojenin yakıt tüketimindeki payının %16 olacağını öngörmektedir (Tablo 3).

Türkiye’de ulaşım sektörü kaynaklı toplam karbon emisyonlarının %95’ini (86,5 Mt CO₂) karayolu taşımacılığı oluşturmaktadır (ÇŞİDB, 2023). Petrol ürünleri toplam yakıt tüketiminin %99,2’sini oluştururken, doğal gaz ve biyokütle sırasıyla %0,2 ve %0,6’lık paya sahiptir (ETKB 2023).

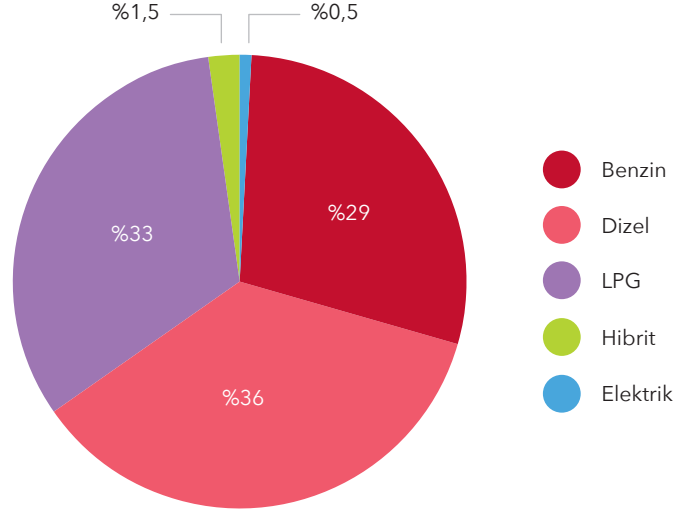
Şekil 41. Türkiye’deki karayolu taşımacılığı kaynaklı CO₂ emisyonları (2010-2021)



Kaynak: T.C. ÇŞİDB (2023)

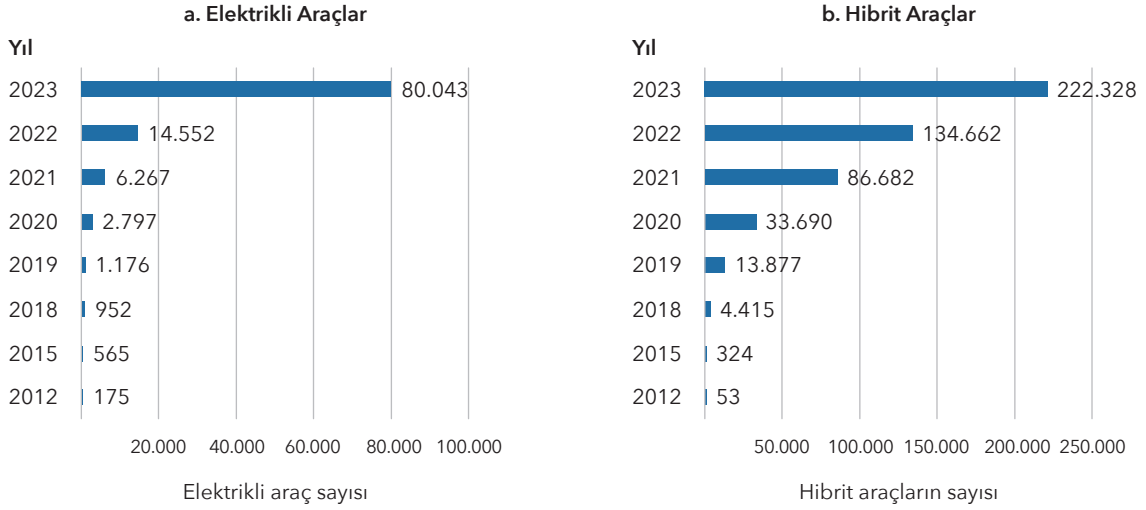
Türkiye’de hibrit ve elektrikli araçların trafiğe kaydı yapılan otomobillerin içerisindeki toplam payı 2022 yılı sonunda %1 iken, 2023 yılı sonu itibarıyla %2’ye ulaşmıştır. 2023 yılında 87.666 hibrit ve 65.491 elektrikli aracın trafiğe kaydı yapılmıştır (Şekil 42) (TÜİK, 2024). Türkiye’de, 2030 yılına kadar en az 1,6 milyon elektrikli araç olacağı ve 160.000 halka açık şarj soketine ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022). Şekil 43’te Türkiye’deki elektrikli ve hibrit araçların yıllar içerisindeki gelişimi gösterilmektedir.

Şekil 42. Trafiğe kaydı yapılan otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı (2023)



Kaynak: TÜİK (2024)

Şekil 43. Türkiye’de son 11 yıl içerisindeki trafiğe kaydı yapılan a) elektrikli ve b) hibrit araçların sayısı



Kaynak: TÜİK (2024)

Türkiye’de hidrojenin karayolu taşımacılığındaki rolünün artması için yürütülen projelerden bazıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

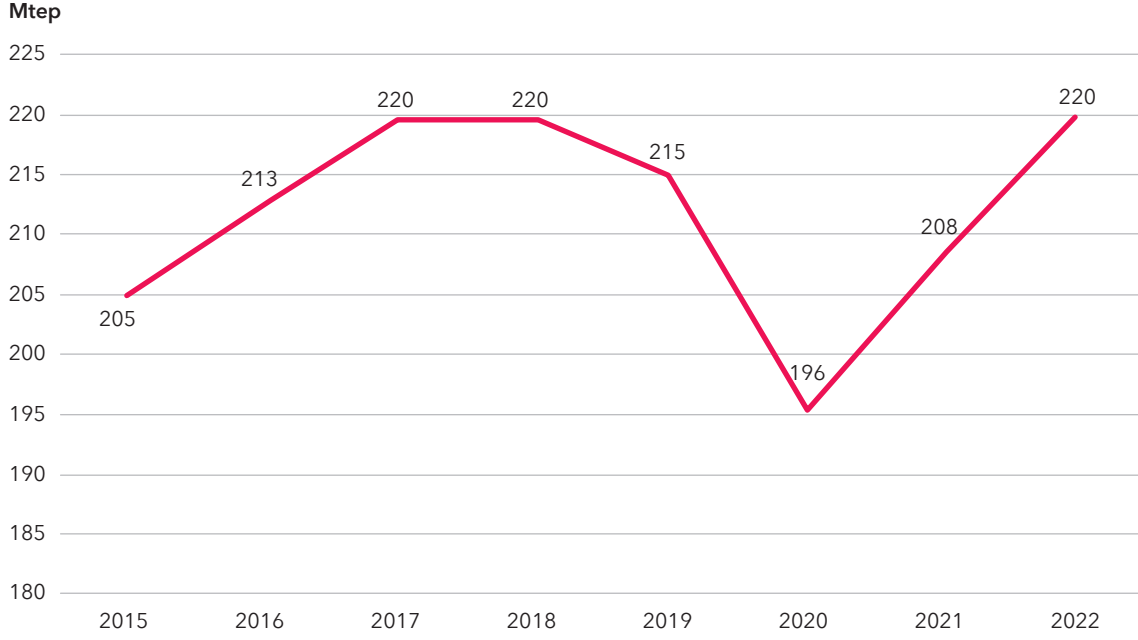
- **TEMSA:** Avrupa’nın önde gelen hidrojenli araç üreticilerinden Caetano Bus ile TEMSA arasında ortak bir araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) projesi başlatılmıştır. Proje kapsamında hidrojenle çalışan otobüsün 1.000 kilometreye (km) kadar menzile çıkarılması planlanmaktadır. Projenin temel hedefi, üretilecek ilk hidrojen yakıtlı şehirlerarası otobüs prototipinin 2024 yılına kadar tamamlanması ve 2025 yılında seri üretime geçilmesidir (TEMSA, 2023).
- **Ford Trucks:** Şirket, yakıt hücresi tedariki ve geliştirilmesi konusunda Ballard ile iş birliği yapacaktır. Bu doğrultuda geliştirilecek olan F-MAX modeli, Ford Trucks’ın yakıt hücresi ile çalışan ilk aracı olacaktır. Şirket, yakıt hücreli F-MAX’i 2025 yılına kadar Türkiye’de geliştirip üretmeyi planlamaktadır (BALLARD, 2023).

5.2.2 Denizyolu taşımacılığı

Denizyolu taşımacılığı, küresel ticaretin %80’ini sağlamaktadır (UNCTAD, 2022). Diğer ulaşım türleriyle taşınması mümkün olmayan, her yıl yaklaşık 2 milyar ton ham petrol, 1 milyar ton demir cevheri ve 350 milyon ton tahıl gemilerle taşınmaktadır.

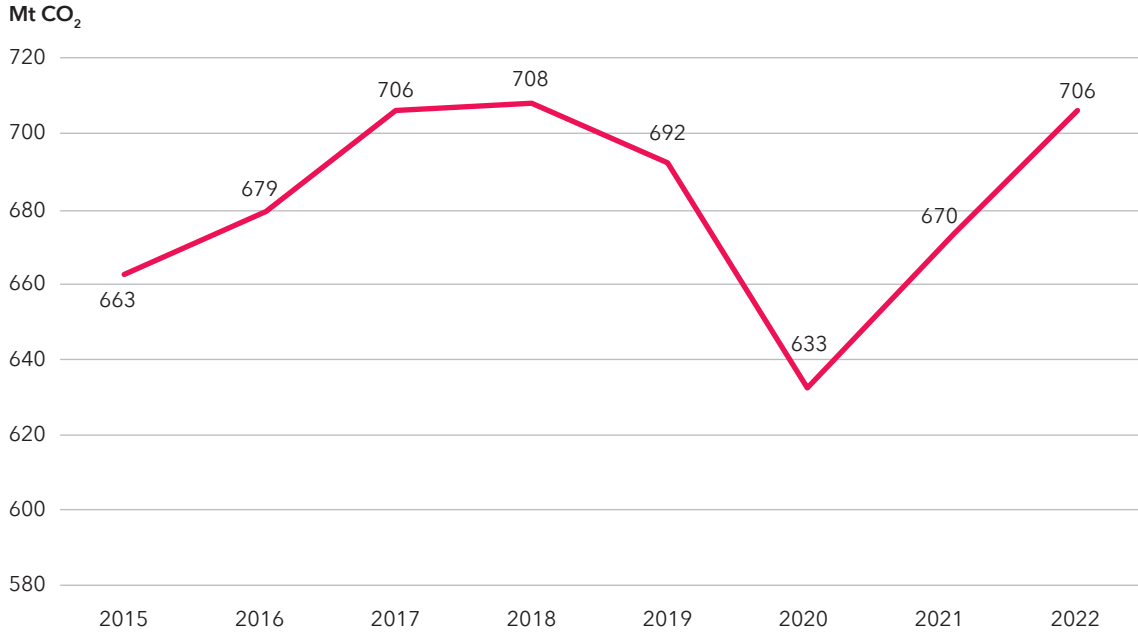
Fosil yakıtlar, uluslararası denizyolu taşımacılığının toplam enerji talebinin %99’undan fazlasını oluştururken, biyoyakıtlar yalnızca %0,5’lik bir payı karşılamaktadır. Bu bağlamda, denizyolu taşımacılığı küresel sera gazı emisyonlarının %3’ünden sorumludur (UNCTAD, 2023). 2022 yılında denizcilik sektöründen kaynaklanan emisyonlar bir önceki yıla göre %5 artarak 706 Mt CO₂e’ye ulaşmıştır. Bu artış ile denizcilik sektörü kaynaklı emisyonlar Covid-19 öncesindeki 2017-2018 seviyelerine geri dönmüştür (Şekil 45).

Şekil 44. Denizyolu taşımacılığında petrol bazlı fosil yakıt tüketimi



Kaynak: IEA (2023)

Şekil 45. Küresel bazda denizyolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonları



Kaynak: IEA (2023)

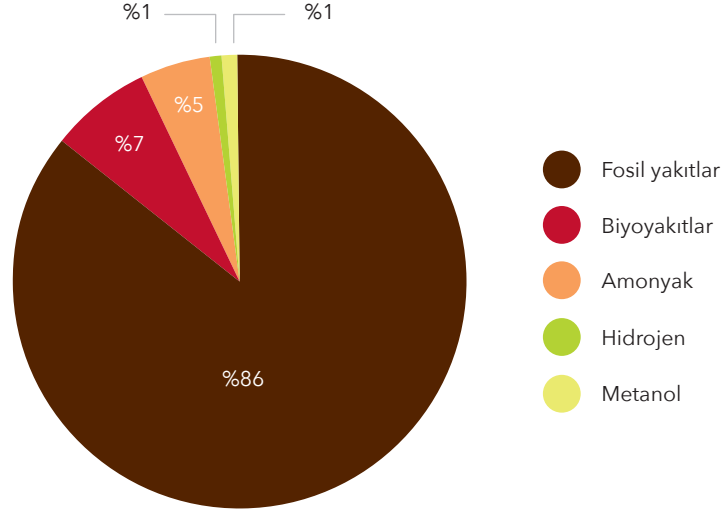
Uluslararası Denizcilik Örgütü’nün (International Maritime Organization) BaU (Business-as-Usual) senaryosunda denizcilik sektöründen kaynaklanan karbon emisyonlarının 2050 yılında 2008 yılına (794 MtCO₂) kıyasla %130 artış göstereceği öngörülmektedir (IMO, 2023). Denizcilik sektöründe, hidrojenin yakıt hücrelerinde veya içten yanmalı motorlarda kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Maliyetler dikkate alındığında, uzun mesafe deniz taşımacılığında amonyak, kısa mesafede ise hidrojenin en uygun alternatif yakıt olmaları beklenmektedir. Büyük gemilerde yakıt hücrelerinin kullanımını araştıran projeler bulunmaktadır. Ancak yakıt hücreleri, enerji depolama ve güç gereksinimlerinin fazla olması nedeniyle uzun mesafe taşımacılığında birincil strateji değildir (Hydrogen Europe, 2021).

Yakın gelecekte, yenilenebilir hidrojenin ve amonyağın gemilerin içten yanmalı motorlarında birincil yakıt olarak kullanılması beklendiğinden, filolar da bu doğrultuda yenilenecektir. Gemilerin ortalama ömürlerinin 30 yıl olduğu düşünüldüğünde, halihazırda faaliyette olan küresel gemi filolarının %50’si 15 yaşın üzerinde, üçte biri ise 25 yaşın üzerindedir (Hydrogen Europe, 2021). Dolayısıyla, yaklaşık 10-15 yıl içerisinde filo dönüşümünün küresel bazda olacağı beklenmektedir.

Hydrogen Europe (2021) çalışmasına göre 2030 yılına kadar kısa mesafe deniz taşımacılığındaki gemilerin çoğunluğu yenilenebilir hidrojen veya türevleri kullanacaktır. Uzun mesafe taşımacılığında kullanılan büyük gemilerde ise, itiş gücü için hidrojen bazlı yakıtların kullanımı test edilecektir. 2050 yılına gelindiğinde ise, gemilerin çoğunluğu hidrojen ve sentetik yakıtlarla (e-amonyak ve e-metanol) çalışacaktır. Gemilerde sentetik yakıt kullanımına yönelik teknoloji uyarlamasının yanı sıra, hidrojenin deniz taşımacılığında kullanımına yönelik liman altyapısı üzerinde de çalışmalar yapılmalıdır. Bu bağlamda limanların, hidrojenin üretilebileceği, ithal edilebileceği ve depolanabileceği merkezler haline gelmesi beklenmektedir.

Biyoyakıtlar, hidrojen ve türevlerinin yanı sıra alternatif bir düşük emisyonlu yakıt olarak kullanılabilir. IEA’nın (2023) 2030 yılı projeksiyonlarına göre hidrojen ve türevlerinin toplam enerji talebinin %15’ini oluşturacağı ve biyoyakıtların da bu payın neredeyse yarısını kapsayacağı öngörülmektedir (Şekil 46).

Şekil 46. Küresel denizyolu taşımacılığının enerji tüketimi (2030 yılı projeksiyonu)

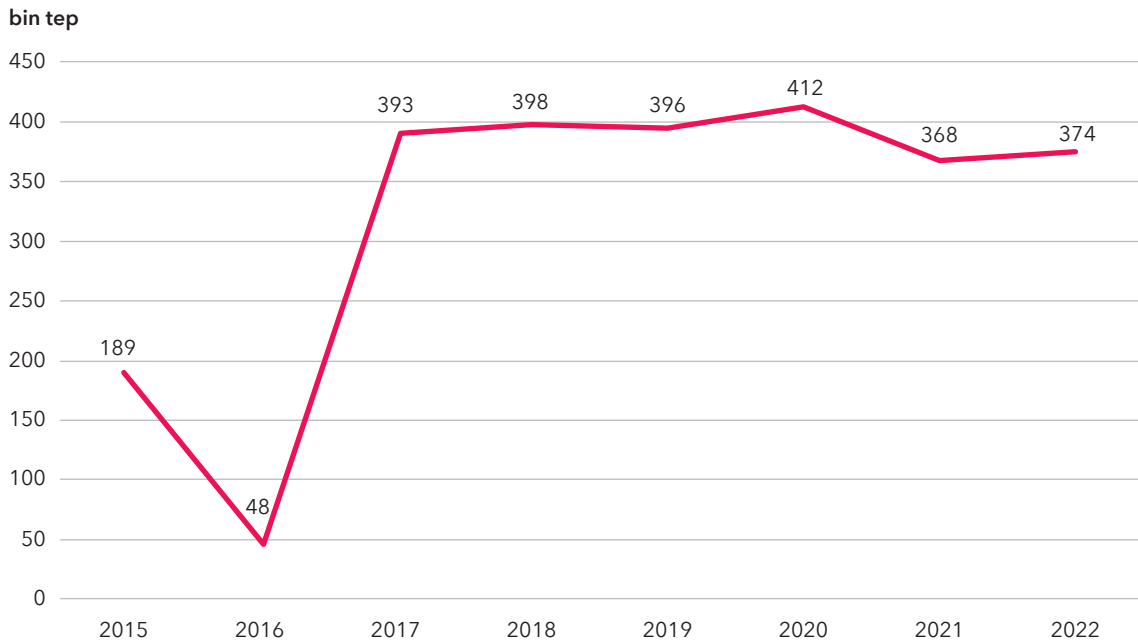


Kaynak: IEA (2023)

Türkiye'nin coğrafi konumundan ötürü denizcilik en önemli sektörlerdendir. 2023 yılında Türkiye'de ithal edilen ürünlerin %54'ü, ihraç edilen ürünlerin ise %56'sı deniz yoluyla taşınmıştır (TÜİK, 2024). Dolayısıyla denizyolu taşımacılığı; enerji, gıda ve emtia tedarikinin sağlanmasında Türkiye'nin uluslararası ticaretinin ve ekonomisinin temelini oluşturmaktadır.

Denizcilik sektöründe enerji tüketiminin neredeyse tamamı petrol kaynaklıdır. Türkiye, 2022 yılı denizyolu taşımacılığı sektöründe 374 bin ton eşdeğer petrol (ktep) miktarında petrol ürünü kullanmıştır (Şekil 47) (ETKB, 2023).

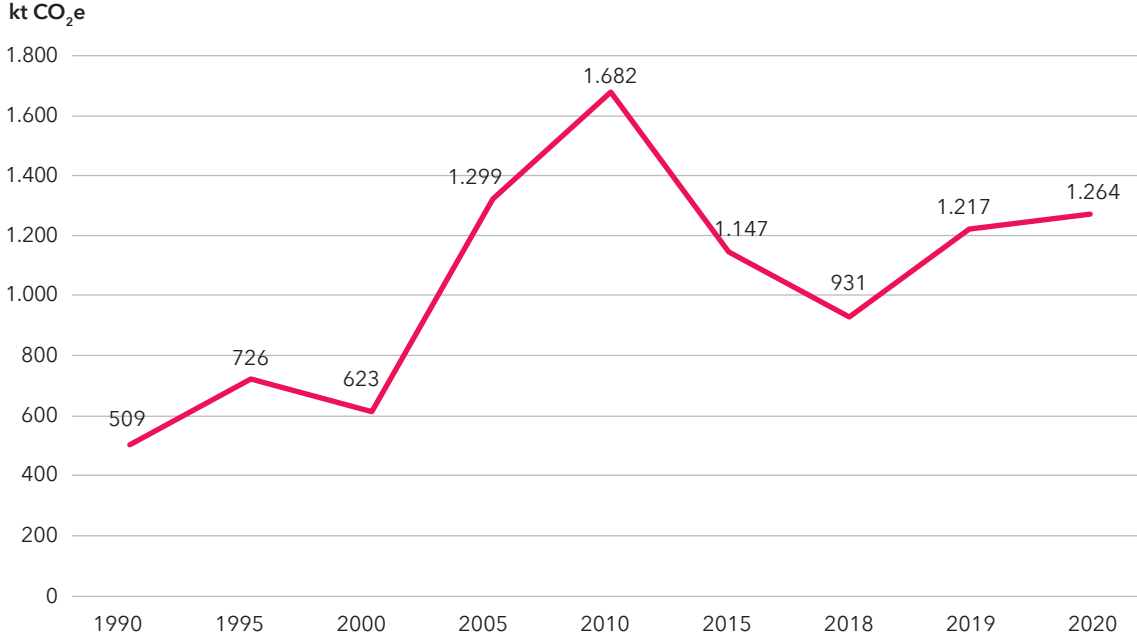
Şekil 47. Türkiye denizyolu taşımacılığının enerji tüketimi



Kaynak: ETKB (2023)

2020 yılında gerçekleşen toplam 1.264 ktCO₂e emisyon ile denizyolu taşımacılığı, karayolu ve havayolu taşımacılığından sonra Türkiye’nin en büyük üçüncü karbon emisyonlu taşımacılık modu konumundadır (Şekil 48) (ÇŞİDB, 2022).

Şekil 48. Türkiye denizyolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonları

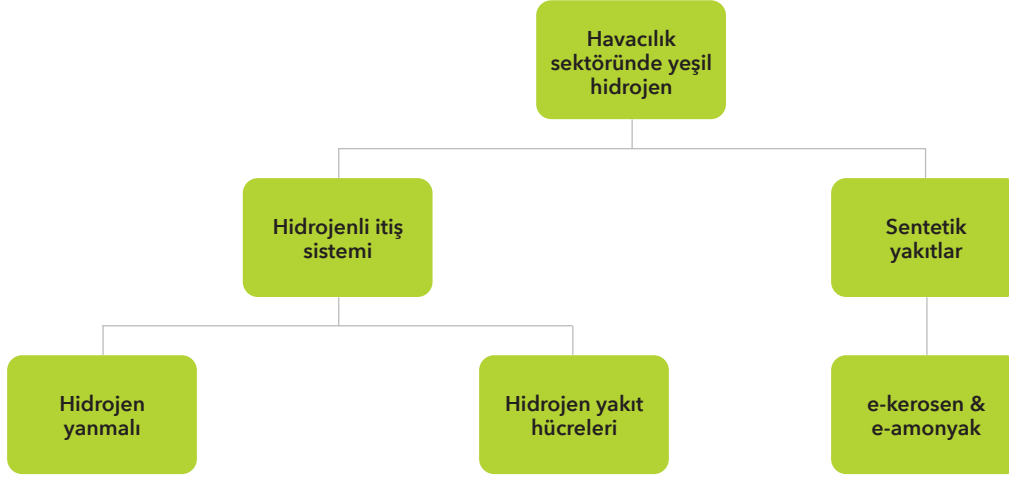


Kaynak: T.C. ÇŞİDB (2022)

5.2.3 Havayolu taşımacılığı

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization), havayolu taşımacılığını en güvenli seyahat tipi olarak tanımlamaktadır. Havayolu taşımacılığının küresel karbon emisyonlarına katkısı son yıllarda demiryolu, karayolu veya denizyolu taşımacılığına göre daha hızlı artmıştır. 2022 yılında havacılık sektörü, küresel bazda enerji kaynaklı karbon emisyonlarının %2'sini oluşturmuştur (IEA, 2023). Havacılık sektörü, küresel emisyonların küçük bir payını oluştursa da karbondan arındırılması zor olan sektörlerdendir. Buradaki en önemli nedenlerden biri ise, 2030 yılına kadar havayolu taşımacılığına olan talebin artacağı öngörüsünün yanı sıra yeni uçakların verimliliklerinin aynı hızla artmayacağı beklentisidir (IEA, 2023).

Yenilenebilir hidrojen, havacılık sektörünün karbondan arındırılması için kullanılabilecek alternatif bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Yenilenebilir hidrojenin, uzun mesafeli taşımacılıkta kullanılabileceği ve havayolu taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonlarını yarıya düşürebileceği tahmin edilmektedir (Airbus, t.y.). Bununla birlikte, hammaddesi kerosen olan jet yakıtı, havacılık sektöründeki yakıt talebinin en büyük kısmını oluştururken, sürdürülebilir havacılık yakıtları toplam yakıt talebinin %0,1'inden azını oluşturmaktadır (IEA, t.y.). Şekil 49, havacılıkta hidrojenin iki temel kullanımını göstermektedir.

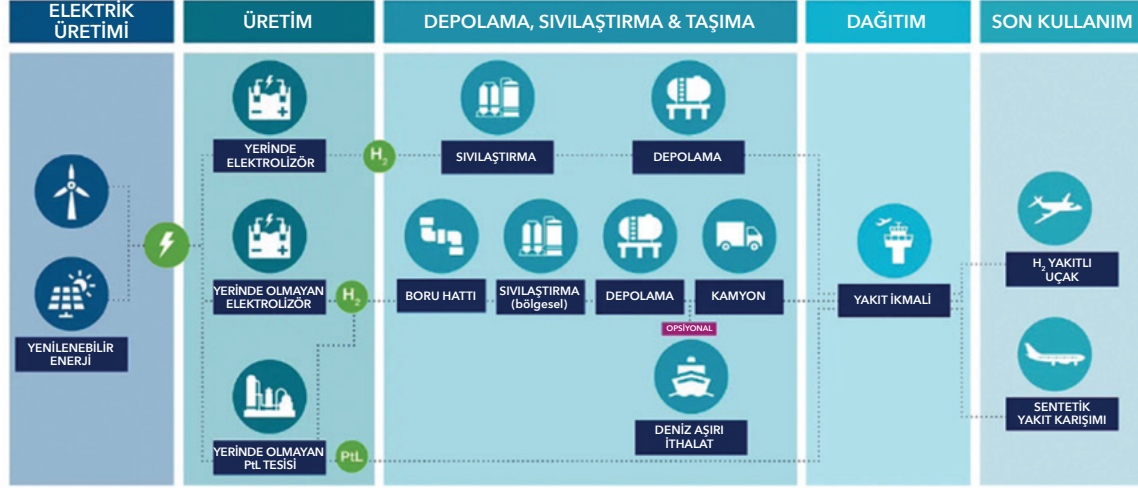
Şekil 49. Havayolu taşımacılığında yenilenebilir hidrojenin farklı kullanım alanları

Hidrojenli itiş sistemi, hidrojenin yakıt olarak kullanılabileceği iki alt yöntemi dikkate alır. İlk yöntemde, sıvı veya gaz haldeki hidrojenin, itme kuvveti oluşturmak için hidrojen kullanımına uygun gaz türbinli motorlarda yakılması söz konusudur. Aslında bu yöntem, uçakların mevcut durumda fosil yakıtlarla çalıştırılmasına benzemektedir ve bu yöntemin uzun mesafe uçuşlarda ön plana çıkması beklenmektedir (CRYOSPAIN, 2022). Bununla birlikte bu yöntemin uygulanabilir olması için depolama sorunlarının da çözülmesi gerekmektedir. Uçağın hidrojen yakılarak uçabilmesi için sıvı hidrojenin güvenli bir şekilde depolanması gerekmektedir. Isı depoya iletim yoluyla aktarılıyorsa, tankların yalıtılması gerekmektedir (AIRBUS, 2020). İkinci yöntem ise, hidrojen yakıt hücrelerinin kullanımını dikkate almaktadır. Bu yöntemde yakıt hücreleri, pervaneleri döndüren elektrik motorlarına güç sağlamak için hidrojen kullanarak elektrokimyasal bir reaksiyonla elektrik üretir. Ancak, mevcut teknoloji gelişimi göz önünde bulundurulduğunda hidrojen yakıt hücreleri uçuş mesafeleri daha kısa olan küçük tip uçaklarla sınırlı kalması beklenmektedir (AIRBUS, 2020).

Havayolu taşımacılığında yenilenebilir hidrojen kullanımının ikinci yolu ise elektroliz bazlı yenilenebilir hidrojen türevlerinin kullanımındır. Yenilenebilir hidrojenin yaygınlaştırılmasına yönelik artan çalışmalar³³ ışığında yenilenebilir hidrojen üretme ve kullanma maliyetinin zaman içinde önemli ölçüde azalması beklenmektedir. Böylece hidrojen, jet yakıtı gibi hâlihazırda mevcut olan yakıtlara göre maliyet açısından rekabetçi olacaktır. IEA (2023) analizlerine göre, sentetik kerosenin maliyeti 2030 itibarıyla 2.150 ABD\$/t seviyesine, e-amonyağın maliyeti ise 550 ABD\$/t seviyesine düşebilir. Bu bağlamda, havacılık sektöründe yenilenebilir hidrojen türevlerinin kullanımına uygun altyapının kurulması büyük önem taşımaktadır. Şekil 50’de kerosen bazlı jet yakıtından hidrojene geçişte havalimanlarında kurulması değerlendirilen hidrojen ekosistemi gösterilmektedir.

³³ Elektrolizör projeleri, yüksek kaliteli yenilenebilir kaynaklara sahip sahalar ve optimize edilmiş proje tasarımları vb.

Şekil 50. Havalimanlarına kurulması öngörülen yenilenebilir hidrojen ekosistemi



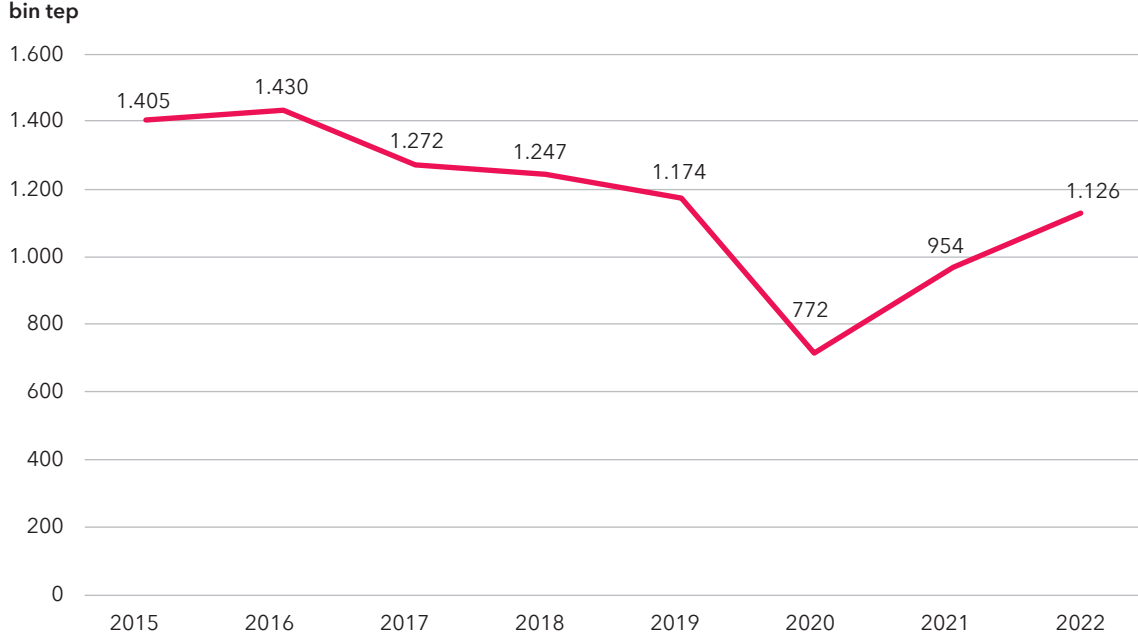
Kaynak: AIRBUS (2021)

Kurulması öngörülen hidrojen ekosistemi; elektrik üretimi, hidrojen üretimi, depolanması, sıvılaştırılması ve taşınması, dağıtımı ve son kullanımı dikkate almaktadır:

- Elektrik üretimi için öncelikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Üretilen yenilenebilir elektrik, elektrolizörler tarafından yenilenebilir hidrojen üretmek için kullanılacaktır.
- Havalimanlarında üretilen hidrojen sıvılaştırılarak sahada depolanacaktır. Hidrojen tesis dışından geliyorsa, boru hatlarıyla sıvılaştırma prosesinin gerçekleştirileceği bölüme taşınabilir. Eğer halihazırda sıvılaştırılmışsa da doğrudan kamyonla ya da kargo gemileri ile büyük miktarlarda denizaşırı bölgelere taşınması mümkün olabilir.
- Hidrojen havalimanlarına ulaştığında veya havalimanlarında uygulanacak belirli proseslerle birlikte kullanıma uygun hale getirildikten sonra, yakıt ikmali yapacak uçaklarda kullanılabilir. Yakıt ikmali yönteminin, jet yakıtı için mevcut yakıt ikmali yöntemlerine benzer olacağı öngörülmektedir.

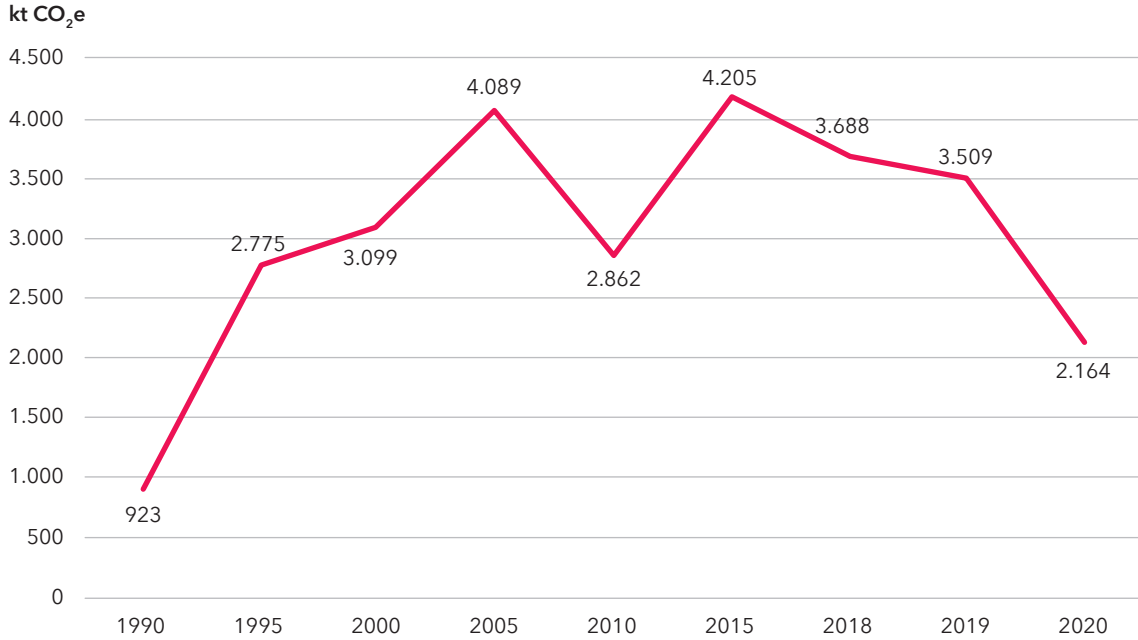
Türkiye’de 2022 yılında 181,8 milyon yolcu havayolu ile seyahat etmiş ve toplam 1,5 milyon uçak kalkışı kaydedilmiştir (DHMI, 2023). Türk havayolu taşımacılığında halihazırda jet yakıtı (gazyağı ve nafta) kullanılmakta olup, bu yakıt enerji tüketimindeki tek kaynaktır (Şekil 51).

Şekil 51. Türk havayolu taşımacılığında yıllara sari petrol ürünleri kullanımı



Kaynak: ETKB (2023)

Şekil 52. Türkiye’de havayolu taşımacılığında kaynaklanan karbon emisyonları



Kaynak: ÇŞİDB & TÜİK (2023)

AIRBUS, 2035 yılında ilk hidrojen yakıtlı ticari yolcu uçağını üretmeyi hedeflemektedir. 2022 yılı sonu itibarıyla Türk havayolu şirketlerinin filolarında toplam 280 adet Airbus tipi yolcu uçağı bulunmaktadır. Dolayısıyla, 2035 yılı itibarıyla Türk havayolu şirketlerinin de uçak filolarının hidrojen kullanımına geçiş için güncellemesi söz konudur. Filo güncellemesinin yanı sıra, havalimanı altyapılarının da hidrojenin taşınması, dağıtımı ve son kullanımı açısından önemli iyileştirmelerden geçirilmesi gerekecektir.

5.3 Elektrik üretimi için uzun vadeli hidrojen depolama

Elektrik üretiminde değişken üretimli yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr ve güneş) artan payı ve enerji depolama sistemleri ile entegre olarak kullanımları, sektörün karbondan arındırılması için önemlidir. Şebeke esnekliğinin artırılması ve değişken kaynaklardan elektrik üretiminin dengelenmesi için esnek ve sıfır emisyonlu teknolojilere ihtiyaç duyulacaktır. Bu bağlamda, gerekli olacak enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli teknolojiler geliştirilmektedir. Öncü teknolojiler arasında batarya enerji depolama, basınçlı hava depolama, termal enerji depolama ve jeotermal sistemler yer almaktadır. Hidrojenin uzun süreli olarak depolanabilmesi, hidrojenin de bu teknolojiler arasında yer almasını sağlamaktadır.

Hidrojen, doğal gazı benzer şekilde esnek ve dağıtık enerji üretim kaynağı olarak kullanılabilir. Ayrıca tuz ve kaya mağaraları gibi farklı jeolojik oluşumlarda uzun süre boyunca depolanabilir. Enerjiyi uzun süre depolayabilme yeteneği kritik öneme sahiptir. Depolama türüne göre hesaplanan maliyetler Tablo 4’de verilmektedir.

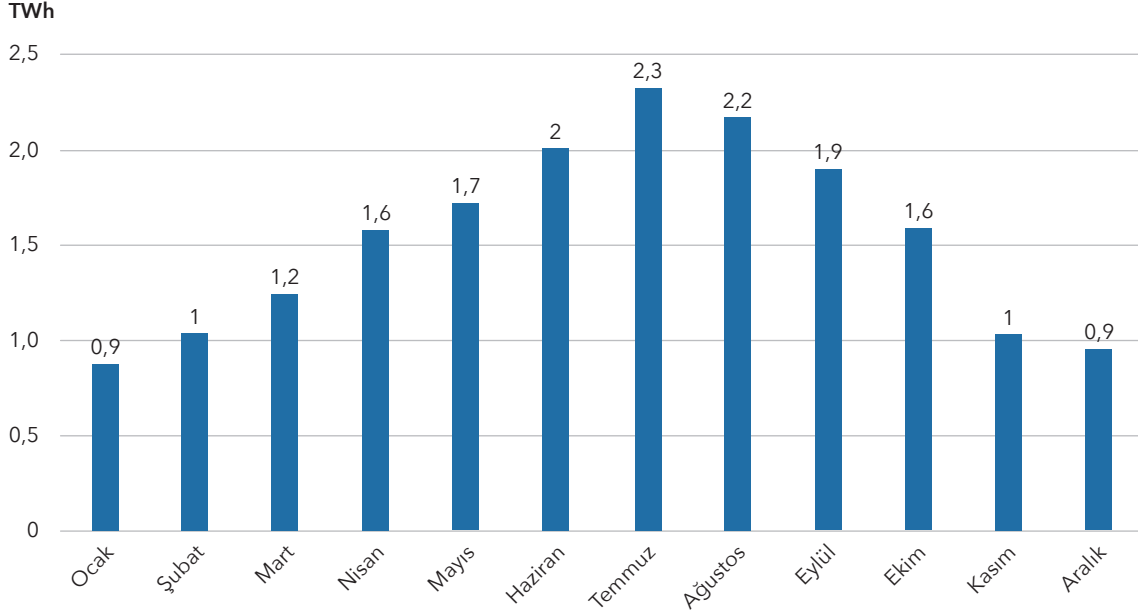
Tablo 4. Hidrojen depolama türüne göre maliyetler

Depolama teknolojisi	Depolama süresi	Depolanan H ₂ miktarı (ton)	Seviyelendirilmiş depolama maliyeti aralığı (ABD\$/kg H ₂)
Tuz mağarası	2-4 ay	500-1.000	0,6-1,2
Yer üstü basınçlı tank	1-2 gün	0,3-1	0,3-0,5
Yer üstü sıvı yakıt tankı	1-2 hafta	5-10	0,06-0,12

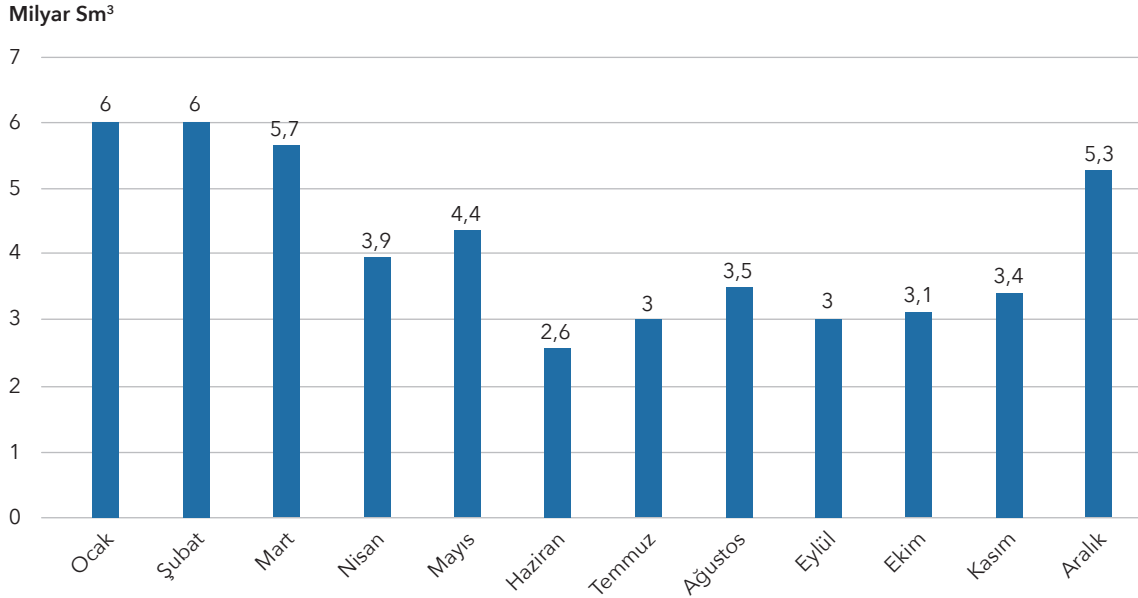
Kaynak: Burke ve diğerleri (2024)

Türkiye’ye bakıldığında enerji talebi genellikle kış aylarında zirveye ulaşırken, güneş enerjisinden elektrik üretimi yaz aylarında azami seviyelere çıkmaktadır (Şekil 53, Şekil 54). Rüzgârdan elektrik üretimi genellikle kış mevsimiyle ilişkilendirilir, ancak rüzgâr kaynaklı üretimin düşük olduğu uzun dönemler de bulunmaktadır. Temelde rüzgar oluşumunun temel nedeni sıcak ve soğuk havanın ısı farkıyla yer değiştirmesidir. Dolayısıyla, mevsim geçişleri rüzgar oluşumunun ana nedenlerindendir.

Şekil 53. Aylara sari güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretimi (2023)



Şekil 54. Aylara sari doğal gaz tüketimi (2023)



Hidrojenden elektrik üretmek için gaz türbinleri de dahil olmak üzere çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Örneğin, mevcut doğal gaz yakıtlı çevrim santrallerinde belli miktarlarda hidrojen kullanılabilir (IEA, 2023). Bu durum, doğal gaz santralinin hidrojenle çalışabilecek şekilde dönüştürülmesi potansiyelini barındırmaktadır. Bu bağlamda, Almanya’da yeni inşa edilecek doğal gaz santrallerinin hidrojen de kullanabilecek şekilde tasarlanmasına başlanmıştır (IEA,2023). Ayrıca, doğal gaz kullanan gaz motorları, elektrik üretimi için hidrojen kullanımına uygun hale getirilebilir (Roland Berger, 2021).

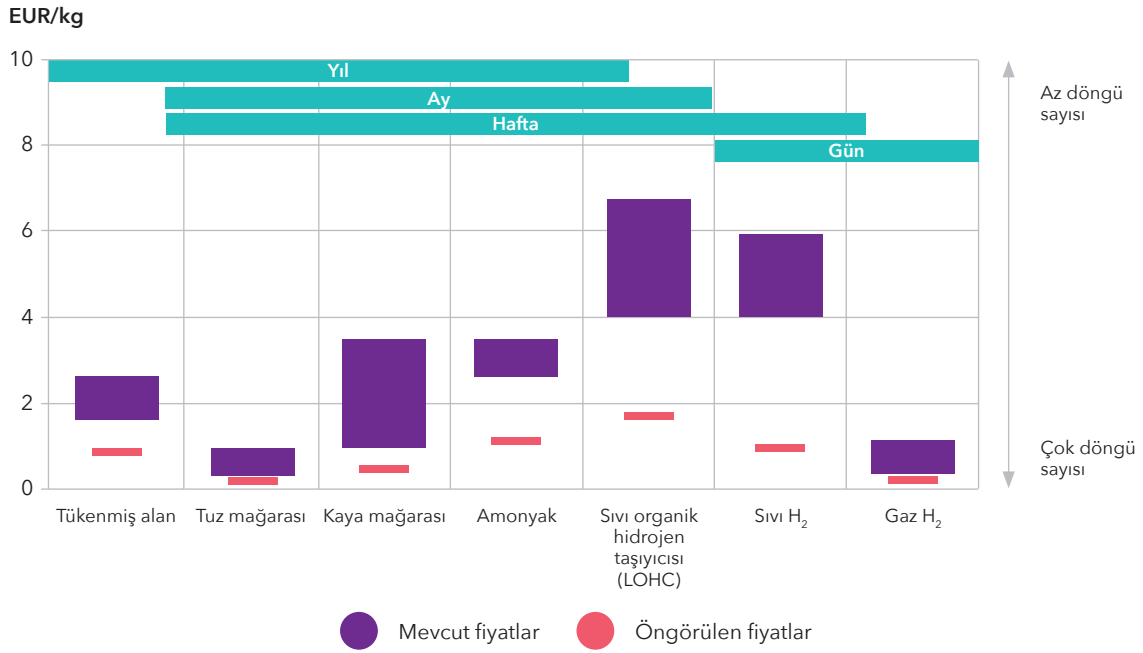
Kullanılabilecek bir diğer teknoloji ise, hidrojeni elektrik ve ısı üretmek için kullanan ve halihazırda kullanılan yakıt hücresi teknolojisidir. Hidrojenle çalışan yakıt hücrelerinin elektriksel dönüşüm verimliliği mevcut durumda %45 - %60 aralığındadır (BNEF, 2020). Doğal gaz motorlarında verim yaklaşık %40-45 iken açık çevrimli türbinlerde bu oran %33-41, ısı geri kazanımlı ve kombine çevrimli türbinlerde ise %55 seviyesine kadar çıkmaktadır (BNEF, 2020). Ancak yakıt hücreleri için kritik malzeme ihtiyaçları nedeniyle doğal gaz türbinlerinin dönüştürülerek hidrojen kullanımına uygun hale getirilmesinin, yakıt hücrelerine kıyasla daha ekonomik olacağı tartışılmaktadır. Hidrojeni elektrik üretiminde kullanmanın bir başka yöntemi ise amonyak formunda kullanmaktır. Asya kıtasında, çoğunluğu Japonya’nın öncülüğünde olmak üzere, birçok proje yürütülmektedir. Bu projeler, tesislerin kademeli olarak karbondan arındırılması için kömürün yeşil amonyakla birlikte yakılması üzerine yoğunlaşmakta ve bu bağlamda kömürle çalışan enerji santrallerinin iyileştirilmesini amaçlamaktadır (BNEF, 2020). Bu teknoloji henüz tam olarak olgunlaşmamıştır ve amonyaktan kaynaklanan olası NO_x emisyonları nedeniyle emisyon azaltım potansiyeli henüz kesinlik kazanmamıştır (BNEF,2022).

Yenilenebilir hidrojenin depolama işleminden sonra tekrar elektriğe dönüştürülmesi maliyet açısından verimli olmayabilir. Bunun temel nedeni, hidrojen depolama tesisleri inşa etmenin yatırım maliyetleri ve enerjinin form değiştirmesinden kaynaklanan enerji kayıplarıdır. Ancak hidrojen depolama ve hidrojenden elektrik üretimi, Türkiye’de yenilenebilir enerji entegrasyonunda önemli bir tamamlayıcı bileşen olabilir. SHURA(2023), Türkiye enerji sektörünü dikkate alarak 2053 yılında hidrojen ve yenilenebilir hidrojen türevlerinden 32 TWh elektrik üretilebileceğini ve bunun elektrik üretim karışımının yaklaşık %4’ünü karşılayabileceğini analiz etmiştir. Türkiye’nin ulusal hidrojen stratejisinde, alternatif bir enerji depolama aracı olarak (kesintileri önlemek için) ihtiyaç fazlası elektriğin hidrojen üretimi için kullanılmasının gerekliliği belirtilmektedir. Stratejide ayrıca hidrojenin yer altı tuz mağaralarında depolanması ihtimalinin de araştırılmasına dikkat çekilmektedir (ETKB, 2023).

Türkiye, halihazırda mevcut rezervuarları ve doğal gaz depolama tecrübesi nedeniyle jeolojik depolama sahaları geliştirme avantajına sahiptir. En büyük doğal gaz depolama sahası, ana talep merkezi olan İstanbul’un batısındaki Silivri’de bulunmaktadır. Doğal gaz için uygun olan alanlarda hidrojen de depolanabilmektedir. İkinci büyük yer altı doğal gaz depolama alanı ise Tuz Gölü’dür. Mevcut araştırmalar, Tuz Gölü’nün mevcut mağaralarında yaklaşık 2,5 TWh (moleküler ağırlığı nedeniyle doğal gazda 12 TWh) hidrojenin depolanabileceğini göstermektedir (Şan ve diğerleri, 2021). Türkiye’nin tuz mağaraları büyük ölçekte hidrojen depolama potansiyeline sahiptir. Ayrıca, doğal gaz depolama sahalarından elde edilen deneyimler, benzerlikleri nedeniyle gelecekteki hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkı sağlayacaktır (Dinçer ve diğerleri, 2020).

Tuz mağaralarının, daha uzun depolama süreleri dikkate alındığında diğer depolama yöntemlerine göre daha uygun maliyetli olduğu düşünülmektedir (Şekil 55). Tuz mağaraları ayrıca diğer jeolojik oluşumlarla karşılaştırıldığında daha yüksek döngü oranlarına sahiptir, bu da daha fazla sistem esnekliği anlamına gelmektedir.

Şekil 55. Farklı teknolojiler için seviyelendirilmiş hidrojen depolama maliyeti



Kaynak: Agora Energiewende (2021)

Hidrojenin elektrik üretimi için nihai maliyeti, üretim alanlarının yenilenebilir enerji koşullarına (rüzgar hızı, güneş ışınımı gibi), farklı depolama teknolojilerinin mevcudiyetine ve üretim alanından enerji santraline taşıma ortamına bağlı olacaktır.

Yenilenebilir hidrojen, yenilenebilir enerji üretiminin bol olduğu durumlarda üretilebilirken, bu üretimin bir kısmının daha sonra kullanılmak üzere (mevsimsel depolama) jeolojik formasyonlarda depolanması mümkündür. Elektrolizörler şebekeye entegre edilirse, yenilenebilir enerji arzının yüksek olduğu dönemlerde hidrojen üretimi sağlayarak şebekenin esnek bir şekilde çalışmasına katkıda bulunacaktır. Yüksek düzeyde yenilenebilir enerji üretimi olduğunda elektrik fiyatları genellikle düşük olduğundan, bu hidrojen üreticileri için uygun bir üretim zamanı olabilir. Ek olarak, özellikle kış aylarında artış gösteren LNG ithalat maliyetleri, depolanan hidrojenin ekonomik olarak bir alternatif olmasını sağlayabilir.

5.4 Doğal gaz şebekesinde hidrojen kullanımı

Son yıllarda, doğal gaz yerine yenilenebilir hidrojenin kullanılması enerji sektörü paydaşları tarafından geniş çapta tartışılmaktadır. Hidrojenin doğal gaz boru hatlarına karıştırılması, yakın vadeli bir emisyon azaltma stratejisi olarak önerilmektedir (IEA,2023). Teorik olarak, hidrojenin doğal gaz boru hatlarına karıştırılması doğal gaz arzının azalmasını, mevcut doğal gaz altyapısının büyük değişiklikler olmadan kullanılmasını ve hidrojen proje geliştiricileri için pazara erken erişimi sağlayabilir. Bu bağlamda, Hollanda, İngiltere, Türkiye ve Japonya gibi pek çok ülke hidrojenin mevcut doğal gaz altyapısına karıştırılmasının etkisini araştırmaktadır.

Türkiye’nin ulusal hidrojen stratejisinde, hidrojenin belli oranlar ile mevcut doğal gaz altyapısına karıştırılarak kademeli olarak ısı sektörünün karbondan arındırılmasında kullanılabileceği belirtilmektedir (ETKB, 2023). Ayrıca, Türkiye’de doğal gaz şebekesindeki hidrojen karışımının 2030 yılına kadar %5-20 oranında evsel ve endüstriyel kullanıma sunulmasının hedeflendiği belirtilmiştir. ETKB’nin Ocak 2020’de düzenlediği Hidrojen Arama Konferansı’nda, ısı sektörünün karbondan arındırılması konusu, Türkiye’de hidrojen kullanımının dört ana alanından biri olarak belirlenmiştir. Temiz Enerji Teknolojileri Merkezi, farklı elektrikten gaza (PtG) teknolojilerinin araştırılması amacıyla GAZBİR-GAZMER tarafından Konya’da kurulmuştur.

Hidrojenin doğal gazla karıştırılması, termodinamik özellikler, maliyet ve yenilenebilir hidrojeni için altyapı eksikliği nedeniyle pratikte çeşitli zorlukları barındırmaktadır (IRENA,2022). Öngörülen bu zorluklara ek olarak tüketicilerin bilinçlendirilmesi de göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle kısa vadede, hidrojeni doğal gaz ile karıştırmak, karbondan arındırılması zor sektörlerde hidrojenin doğrudan kullanımı yerine önceliklendirilebilir³⁴. 2030 yılına kadar sınırlı miktarda yenilenebilir hidrojenin üretilebileceği göz önüne alındığında, üretilen hidrojenin karbon ayak izinin düşürülmesinde daha etkili ve ülkeye faydasının daha yüksek olacağı diğer uygulamalarda (demir-çelik ve amonyak üretimi gibi) kullanılması önceliklendirilebilir.

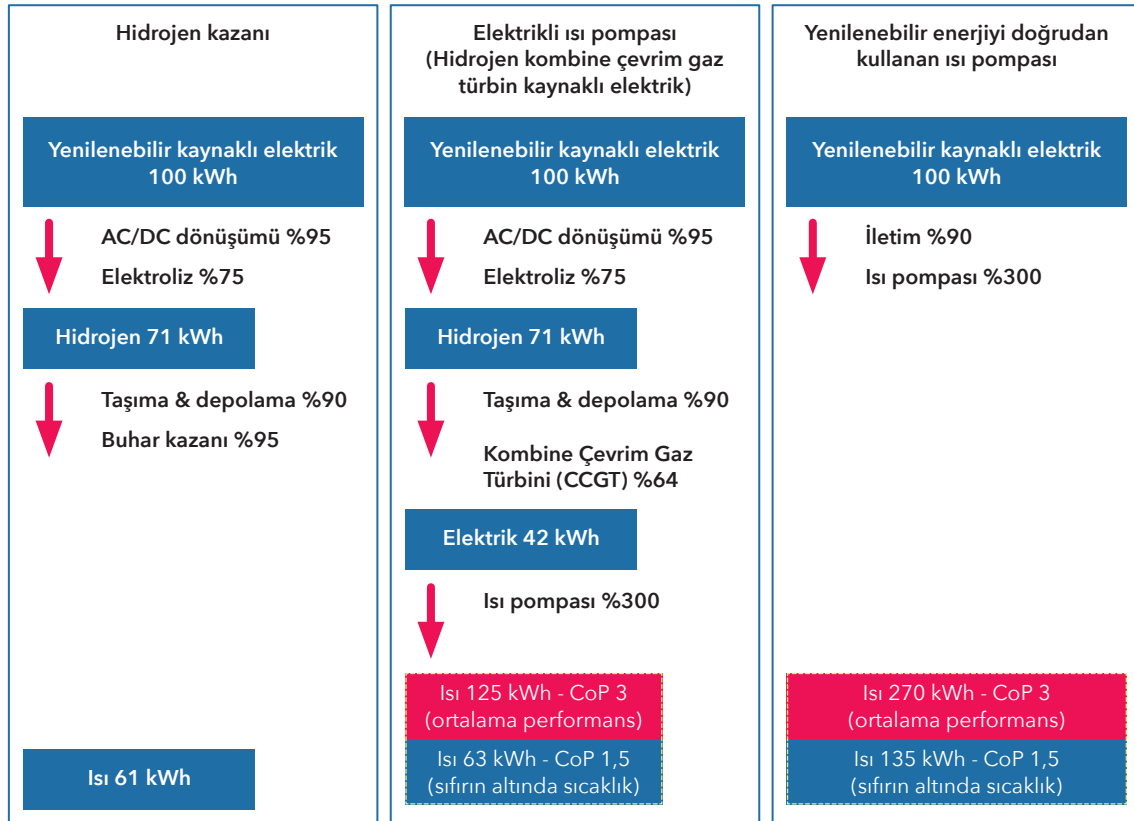
Teknik açıdan bakıldığında, hidrojenin doğal gaz şebekesine karıştırılma limiti her bir sistem bileşeninin hidrojen toleransına ve doğal gaz şebekesi tüketicilerine bağlı olacaktır. Her bir sistem bileşeninin (borular, cihazlar vb.) hidrojen duyarlılığına ilişkin hala birçok belirsizlik bulunmaktadır. Genel olarak, %20’ye kadarlık bir pay ile hidrojenin doğal gaz şebekesine karıştırılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Çevresel açıdan bakıldığında, doğal gaza %20 oranında hidrojen karıştırılması, enerji sektöründeki sera gazı emisyonlarının yalnızca %7’sini azaltacaktır (Fraunhofer, 2022). Bunun temel nedeni, doğal gaz ile hidrojen arasındaki moleküler ağırlık farkından kaynaklanmaktadır.

³⁴ Özellikle kısa vadede Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin sınırlı miktarda olacağı düşünüldüğünde, hidrojenin doğrudan katma değer yaratacağı sektörlerde kullanımı, hidrojenin doğal gaz ile karıştırılıp yakılmasına kıyasla önceliklendirilebilir. Örneğin, doğal gaz tüketiminin (eğer kömür ikamesi olarak kullanılmaz ise) 2030 yılına kadar neredeyse sabit kalacağı varsayıldığı durumda (49 mtep doğal gaz tüketimi/17,2 Mt hidrojene tekabül etmektedir), gaz şebekesine %5 ila %20 oranında hidrojen karıştırmak, yaklaşık 0,8-3,4 Mt aralığında yenilenebilir hidrojen gerektirecektir.

Ek olarak, hidrojenin gaz şebekesine karıştırılması tüketiciler için daha yüksek enerji fiyatlarının oluşmasına yol açacaktır. Türkiye için doğal gaz fiyatı ortalama 50 EUR/MWh³⁵ seviyesindeyken, yenilenebilir hidrojenin fiyatı 90-120 EUR/MWh (3-4 EUR/kg) seviyelerinde olmaktadır. Hidrojen karışımının yakın gelecekte şebekeye verilmesi halinde artacak olan doğal gaz fiyatları nedeniyle, konut ısıtmasında daha maliyet etkin bir seçenek olarak ısı pompası ön plana çıkabilir.

Şekil 56’da yenilenebilir enerji kullanılan 3 farklı ısıtma örneği ele alınmaktadır. Hidrojen, bir hidrojen kazanında doğrudan kullanıldığında, 100 kWh yenilenebilir enerjiden 61 kWh ısı (iletim ve depolama sonrasında) sağlanabilmektedir. Sadece ısı pompasının olduğu örnekte³⁶ ısı pompaları hidrojen kazanına göre 2 ile 4 kat arasında daha verimlidir. Son örnekte ise, ısı pompası ve hidrojen kazanının hibrit olarak kullanıldığı durum incelenmiştir. Bu sistemde yenilenebilir enerji üretiminin düşük olduğu bir durumlarda, ideal olarak sistem depolanan hidrojene erişecek ve evlere ileterek elektrik üretimi için hidrojen türbinleri kullanılacaktır. Dış sıcaklığın sıfırın altında olduğu varsayılan bu senaryoda, hidrojen kombine çevrim gaz türbini ile çalışan ısı pompası, tek başına hidrojen kazanına kıyasla daha verimli çalışacaktır. Burada hidrojenin ev ısıtmasında tek başına kullanılmasının, ısı pompası uygulamalarına kıyasla daha verimsiz olduğu görülmektedir.

Şekil 56. Yenilenebilir elektrik kaynaklı farklı ısıtma sistemlerinin verimlilik karşılaştırması



Kaynak: Agora Energiewende (2021)

³⁵ 2021 ve 2022 yıllarındaki ortalama fiyatlar (EPIAŞ Şeffaflık Platformu).

³⁶ Sistemde yeterli yenilenebilir enerjinin mevcut olduğu varsayımıyla.

Bina seviyesinde ısıtma için hidrojen kullanımının verimsiz olmasından dolayı, Türkiye’de ısı pompalarının kullanımı ısıtma sektörünün karbondan arındırılması için daha maliyet etkin bir strateji olabilir. Isı pompalarının verimliliğinin temel nedeni, elektriğin hidrojene dönüştürülmeden doğrudan kullanılıyor olmasıdır.

Bina seviyesinde ısıtma dışında, yüksek sıcaklık ihtiyaçları olan sanayi ve benzeri bazı sektörlerde yüksek ısı talebini karşılamak için hidrojene ihtiyaç duyulabilir. Bu durum ise, ısıtma sektöründe hidrojen talebinin artmasına neden olacaktır.





BÖLÜM 6

Fayda-Maliyet Analizi

Yenilenebilir hidrojen, Türkiye için gelecekte önemli bir enerji taşıyıcısı ve hammadde olarak karbonsuzlaşmaya ve enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlayabilir. Ancak, bu katkının boyutunun daha iyi anlaşılabilmesi için sektörel fayda-maliyet analizlerinin, ekonomik büyüme ve sektörler arası etkiler dikkate alınarak bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir.

Fayda maliyet analizleri kapsamında dikkate alınan uzun dönemli hidrojen kullanım projeksiyonları, SHURA’nın 2023 yılında yayımladığı “Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası” çalışmasının temel çıktıları kullanılarak oluşturulmuştur. Analiz kapsamında dikkate alınan son kullanım sektörleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sanayi
 - Demir-çelik (entegre tesisler ve elektrik ark ocakları)
 - Kimya (gübre ve petrokimya, ilaç ve kozmetik sanayi)
 - Çimento-Cam-Seramik
- Elektrik sektörü
- Ulaşım sektörü

Yürütülen fayda maliyet analizinde, ilgili her sektörün 2053 yılına kadar olan sektörel büyümeleri SHURA Net Sıfır 2053 (NZ2053) senaryosu varsayımları ve sonuçları dikkate alınarak modellenmiştir. Yapılan analizlerde, her sektörde ihtiyaç olan toplam yenilenebilir hidrojen ve türevleri yerine aynı enerji içeriğini karşılayacak ithal fosil enerji ihtiyacı hesaplanmış ve öngörülen yakıt türüne göre karbon emisyon maliyetleri ile ithal yakıt maliyetleri öngörülmüştür.

Bu rapor kapsamında gerçekleştirilen fayda-maliyet analizleri, fosil yakıtların önümüzdeki dönemde karbon fiyatına tabi olacağı varsayımıyla şekillendirilmiştir. Bu çerçevede, yenilenebilir hidrojenin ekonomik ve çevresel faydaları, mevcut ve gelecekteki enerji politikalarının etkinliğiyle doğrudan ilişkilidir.

Analiz kapsamında dikkate alınan, uzun dönemli fosil yakıt maliyetleri ve karbon fiyatı³⁷ projeksiyonları Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) öngörülleri kullanılarak oluşturulmuştur (IEA, 2023). Analizde dikkate alınan karbon emisyon katsayıları Ek 2’de verilmektedir. Seviyelendirilmiş hidrojen maliyeti (LCOH) değerleri, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayınlanan Türkiye Ulusal Hidrojen Stratejisi’ndeki projeksiyonların kullanılmasıyla oluşturulmuştur (ETKB, 2023). Analizlerde, yenilenebilir (yeşil) hidrojenin kullanımının 2035 itibarıyla hız kazanacağı değerlendirilmektedir.

³⁷ Analizde, IEA’nın gelişmekte olan ülkeler için öngördüğü karbon fiyatları kullanılmıştır.

³⁸ Demir-çelik sektörü özelinde tesis dönüşüm maliyetlerine yönelik Hydrogen Europe’un bir analizi bulunmaktadır. Yapılan analiz kapsamında, entegre tesislerde bulunan yüksek fırın teknolojisini H₂-DRI-EAF teknolojisine çevirmek için yılda 270 milyon Euro tutarında ek maliyet oluşturacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu tutar, yıllık 1 Mt kapasiteye sahip yeni bir H₂-DRI-EAF teknolojisine gereken yatırıma yakın bir miktardır (Hydrogen Europe, 2022).

Analiz kapsamında:

- Tesis dönüşümü maliyetleri³⁸ ve,
- Hidrojen taşıma ve depolama maliyetleri

dikkate alınmamıştır. Çalışmada dikkate alınan tüm varsayım ve dönüşüm katsayıları "Ek 2"de özetlenmektedir.

6.1 Sanayi Sektörü

Analiz kapsamında üç temel sanayi sektöründe yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin potansiyel kullanımı incelenmektedir;

- Demir-çelik
- Çimento-Cam-Seramik
- Kimya

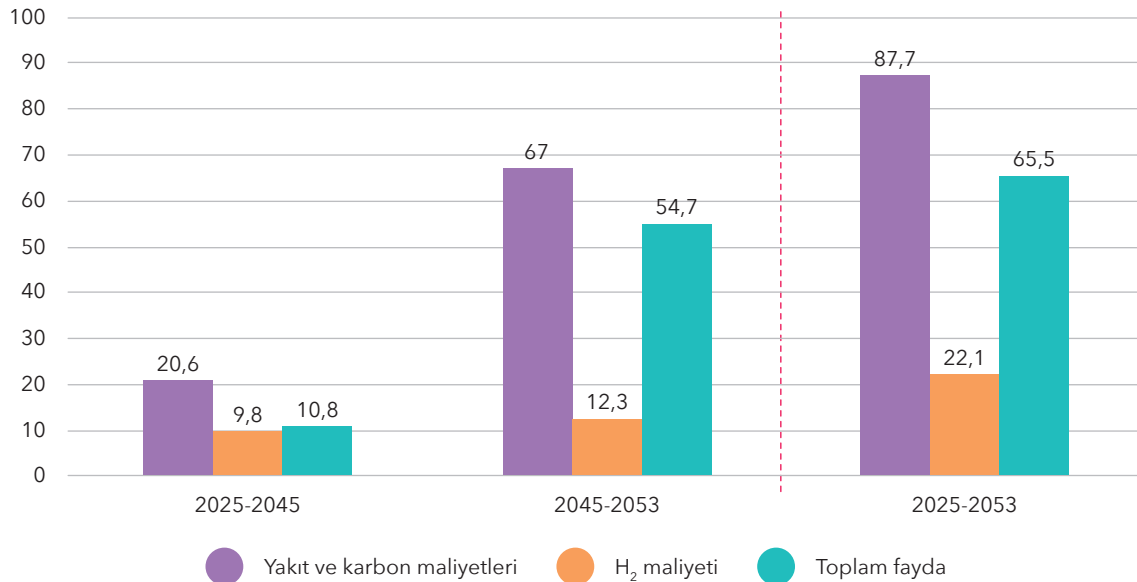
Bu sektörlerde yenilenebilir hidrojen kullanmanın başlıca faydaları arasında;

- Emisyonların net sıfır düzeyine getirilmesi ile karbon maliyetinin oluşmaması ve,
- İthal fosil yakıt kullanımının azalması ile toplam yakıt maliyetlerindeki düşüş

olarak belirtilebilir. Analizde kullanılan hidrojen maliyeti, projeksiyon dönemi boyunca oluşacağı modellenen toplam hidrojen tüketiminin seviyelendirilmiş yenilenebilir hidrojen üretim maliyeti ile çarpılması ile hesaplanmaktadır. Bu bağlamda yürütülen fayda-maliyet analizlerinde sanayide, yenilenebilir hidrojenin fosil yakıtlara ikame olarak kullanılmasıyla, 2025-2053 döneminde yaratacağı toplam faydanın 65,5 milyar Amerika Birleşik Devletleri Doları (ABD\$) seviyesine ulaşabileceği hesaplanmaktadır (Şekil 57).

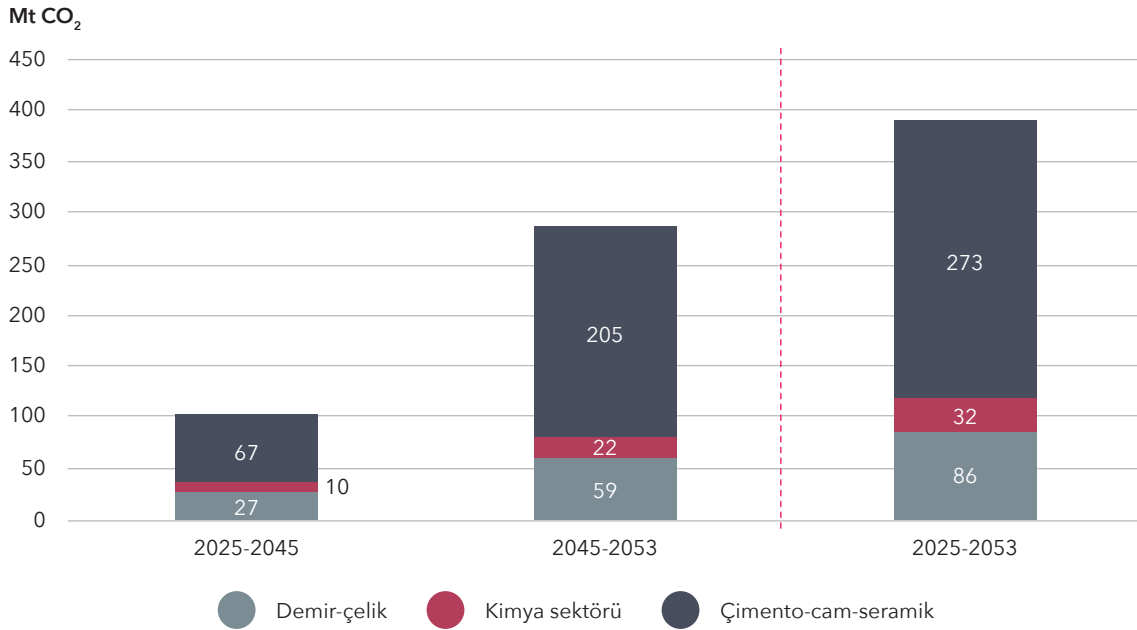
Şekil 57. Sanayide yenilenebilir hidrojen kullanımının belirlenen dönemlere göre hesaplanan kümülatif fayda ve maliyetleri

Milyar ABD\$



Analizlerde, yenilenebilir hidrojen kullanımının 2030 yılında hızlanacağı öngörüldüğünden, endüstriyel süreçlerdeki emisyonların artan hidrojen kullanımıyla 2040 yılından itibaren azalmaya başlayacağı hesaplanmaktadır. Yürütülen analizlere göre, sanayi kaynaklı toplam karbon emisyonlarının 2025 - 2053 yılları arasında 391 milyon ton (Mt) azaltılabileceği değerlendirilmektedir (Şekil 58).

Şekil 58. Sanayi alt sektörlerinde belirlenen dönemlere göre öngörülen kümülatif karbon azaltım projeksiyonları



6.1.1 Demir-çelik sektörü

Demir-çelik sektörü entegre tesislerinde bulunan yüksek fırın (BF) ve elektrik ark ocağı (EAF) teknolojileri kapsamında analizler yapılmıştır.

Demir-çelik sektöründe kullanılan teknolojilerde fosil yakıtların farklı rolleri bulunmaktadır. Entegre tesislerde kok kömürü fırınlara ısı kaynağı olarak ve demir cevherini demire dönüştürmek için indirgeyici³⁹ olarak kullanılmaktadır. Sonraki adımlarda oluşan sıcak çeliğin şekillendirilmesi işleminde doğal gaz da kok kömürü ile benzer şekilde kullanılmaktadır. Doğrudan indirgenmiş demir (DRI) ve EAF teknolojilerinin beraber kullanıldığı durumda ise, doğal gaz şaft fırınında oksitleyici madde olarak kullanılmaktadır.

Entegre çelik tesislerde yenilenebilir hidrojen, yardımcı indirgeyici madde olarak kullanılabilir. EAF’ların, DRI-EAF teknolojisine dönüşmesi ile yenilenebilir hidrojenin indirgeyici ve yakıt olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

Yürütülen fayda-maliyet analizleri kapsamında, entegre tesislerin 2030-2053 dönemi boyunca toplamda 1,9 Mt yenilenebilir hidrojen ve türevlerine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Yenilenebilir

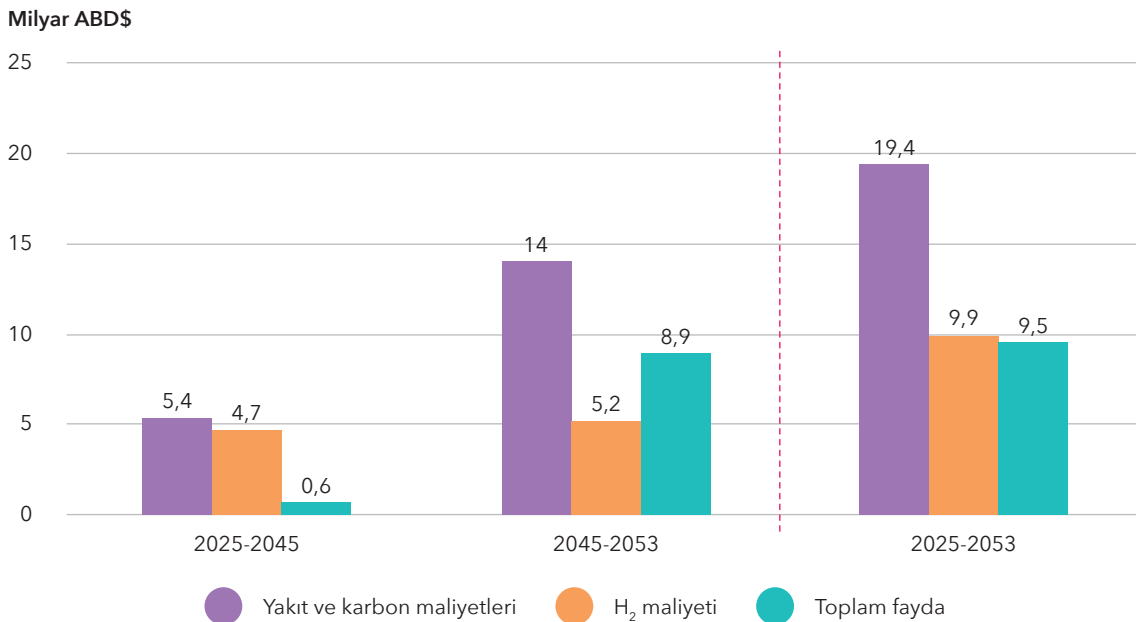
³⁹ Cevherde bulunan demir oksitteki oksijenin emilerek saf demir elde edilmesi işlemi.

hidrojen kullanımı ile 2030-2053 yılları arasında toplam 26,6 Mt CO₂ emisyonunun önüne geçilebilmektedir.

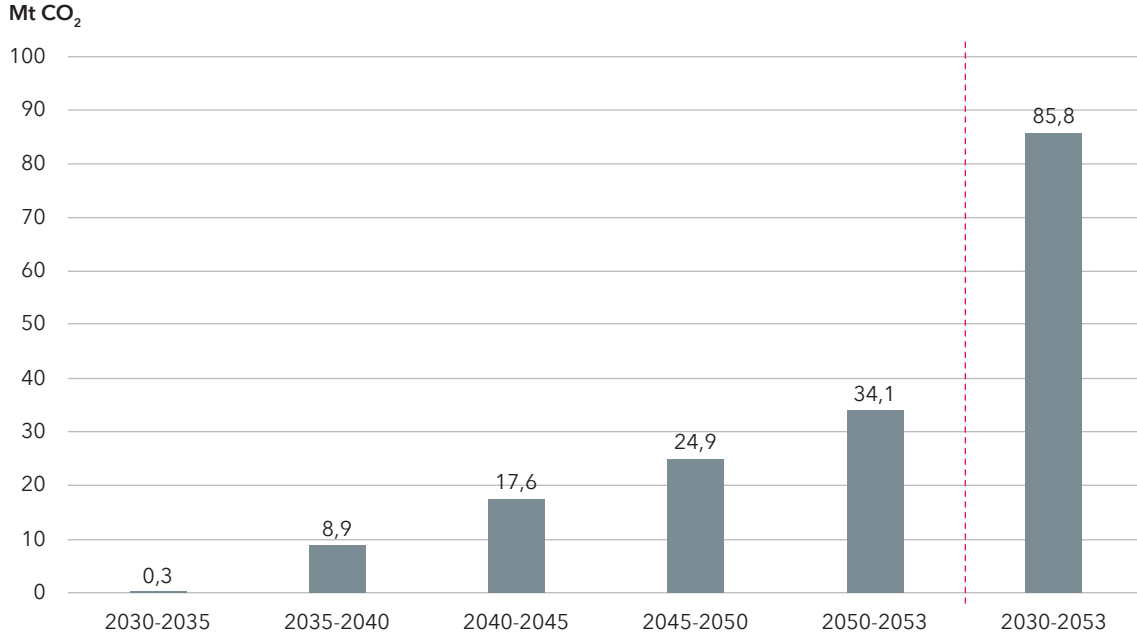
Entegre tesislerin, DRI-EAF teknolojisini içerecek şekilde modernize edilmediği durumda, 2030-2053 yılları arasında fosil yakıt ve karbon maliyeti toplam tutarı yaklaşık 6 milyar ABD\$ seviyesindedir. Yine aynı dönemde entegre tesislerde yenilenebilir hidrojen kullanım maliyeti 3,1 milyar ABD\$ olarak hesaplanmaktadır. Böylelikle, bu tesislerde yenilenebilir hidrojen kullanımının toplam faydasının 2,9 milyar ABD\$ seviyesinde olacağı öngörülmektedir. Fosil yakıt kullanım maliyetleriyle hidrojen kullanım maliyeti karşılaştırıldığında, DRI-EAF teknolojisine dönüşümünün özellikle 2040 yılından sonra kârlı hale gelebileceği değerlendirilmektedir.

EAF teknolojisi (H₂-DRI-EAF) bağlamında yürütülen fayda-maliyet analizinde, 2053 yılına kadar EAF'lerde kullanılmak üzere toplam 4,3 Mt yenilenebilir hidrojenin gerekli olacağı değerlendirilmektedir. EAF tesislerinde yenilenebilir hidrojen indirgeyici madde ve yakıt olarak kullanılacağı varsayıldığı takdirde, 2025-2053 döneminde yenilenebilir hidrojen kullanımının toplam maliyetinin yaklaşık 6,8 milyar ABD\$ seviyesinde olacağı analiz edilmektedir. Yenilenebilir hidrojenin DRI-EAF süreçlerine entegrasyonu ile 2053 yılına kadar toplamda 59,2 Mt karbon emisyonunun önüne geçilebileceği hesaplanmaktadır. Yenilenebilir hidrojen kullanımı sayesinde kaçınılan karbon ve ithal yakıt maliyetlerinin toplamının ise 2025-2053 döneminde 13,4 milyar ABD\$ olacağı değerlendirilmektedir. Analiz sonuçlarına göre demir-çelik sanayisinde fosil yakıt yerine hidrojen kullanmanın toplam faydası 2053 yılı itibarıyla 6,6 milyar ABD\$ seviyesine ulaşmaktadır. Şekil 59'da EAF ve entegre demir-çelik tesislerinde yenilenebilir hidrojen kullanmanın toplam fayda-maliyet analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 60'da ise demir-çelik sektöründe yenilenebilir hidrojen kullanıldığı takdirde kaçınılacak karbon emisyonları beş yıllık periyotlarda gösterilmektedir.

Şekil 59. Demir-çelik sektöründe (EAF ve entegre tesisler) yenilenebilir hidrojen kullanımının dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet tutarları



Şekil 60. Demir-çelik sektöründe 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltım projeksiyonları



6.1.2 Kimya sektörü

Analiz kapsamında kimya sektörü içinde üç alt sektör dikkate alınmış olup, yapılan analizlerde hesaplama kolaylığı sağlamak amacıyla gübre ve petrokimya sektörleri bir arada ele alınmıştır:

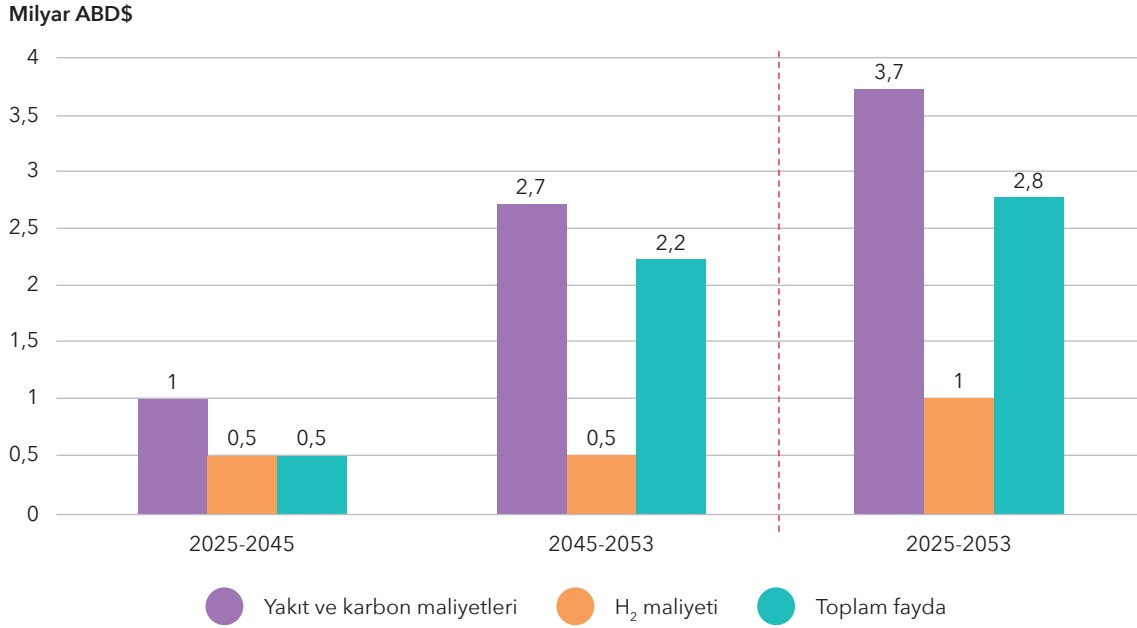
- Kimya
- Gübre ve petrokimya.

Petrokimya sanayisinde, polimerlerin ve ara kimyasalların elde edilmesine yönelik işlemlerde fosil yakıtlar, özellikle de doğal gaz, hammadde olarak kullanılmaktadır (ayrıntılar için bkz. 4.1.3). Plastik ve ilaç üretiminde yenilenebilir hidrojen emisyon azaltımı amaçlı kullanılabilir. Alternatif olarak yenilenebilir hidrojen, sentetik petrokimyasal ürünlerin (örn. e-metanol) üretiminde hammadde veya buharla parçalama prosesinde (steam cracking process) yakıt olarak kullanılabilir. Gübre sektöründe ise yenilenebilir hidrojen, amonyak üretiminde hammadde olarak kullanılan doğal gazın yerine kullanılabilir.

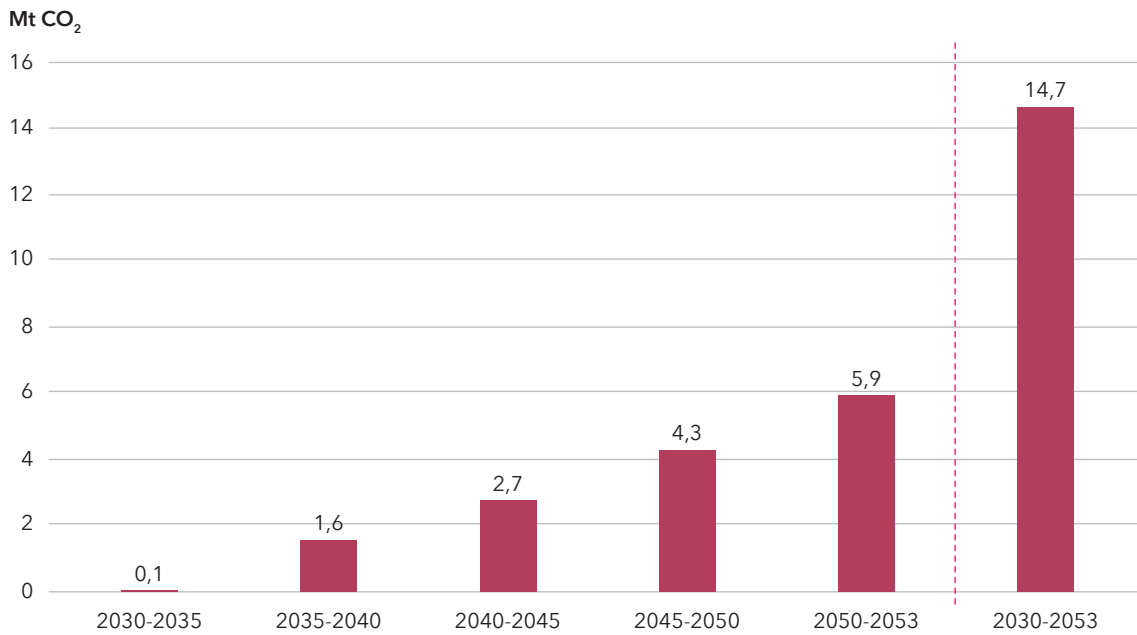
SHURA'nın "Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası" çalışmasında, kimya sektöründe kullanılan toplam yenilenebilir hidrojen 2030-2053 döneminde toplam yaklaşık 606,9 kt'dur. Bu miktardaki yenilenebilir hidrojen üretiminin toplam maliyeti yaklaşık 967 milyon ABD\$ seviyelerinde olacağı öngörülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, bu sektörde 2025-2053 döneminde toplam karbon emisyonu azaltım miktarının 14,7 Mt seviyesinde olacağı hesaplanmaktadır. Yürütülmüş analizlere göre 2025-2053 döneminde toplam 3,7 milyar ABD\$'lık ithal yakıt ve karbon maliyetinden kaçınılmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir

hidrojenin fosil yakıtların yerini alması ile beraber elde edilecek toplam fayda, 2053 yılına kadar yaklaşık 2,8 milyar ABD\$ seviyesine ulaşmaktadır (Şekil 61). Kimya (Petrokimya ve gübre hariç) sektöründe toplam öngörülen karbon emisyonu azaltım miktarları Şekil 62'de gösterilmektedir.

Şekil 61. Kimya (Petrokimya ve Gübre hariç) sektörünün dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi



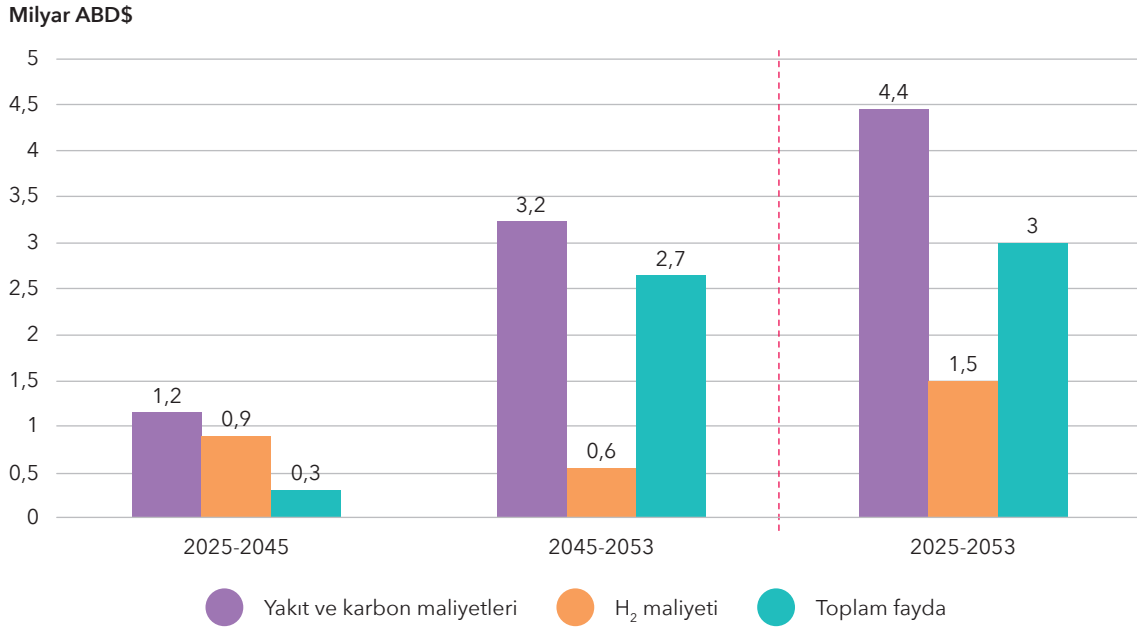
Şekil 62. Kimya (Petrokimya ve gübre hariç) sektöründe 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltımı



Gübre ve petrokimya sektörlerinde, 2053 yılına kadar toplam 852 kt yenilenebilir hidrojene ihtiyaç olacağı modellenmiştir (SHURA, 2023). 2053 yılına kadar bu sektörlerde kullanılacak hidrojenin üretim maliyetinin yaklaşık 1,5 milyar ABD\$ olacağı hesaplanmaktadır. Projeksiyon dönemi boyunca bu sektörlerden toplam 17,4 Mt karbon emisyonunun önlenmesi sağlanabilir. Böylelikle, toplamda 4,4 milyar ABD\$ karbon ve ithal yakıt maliyetinden kaçınılması mümkün olabileceği hesaplanmaktadır.

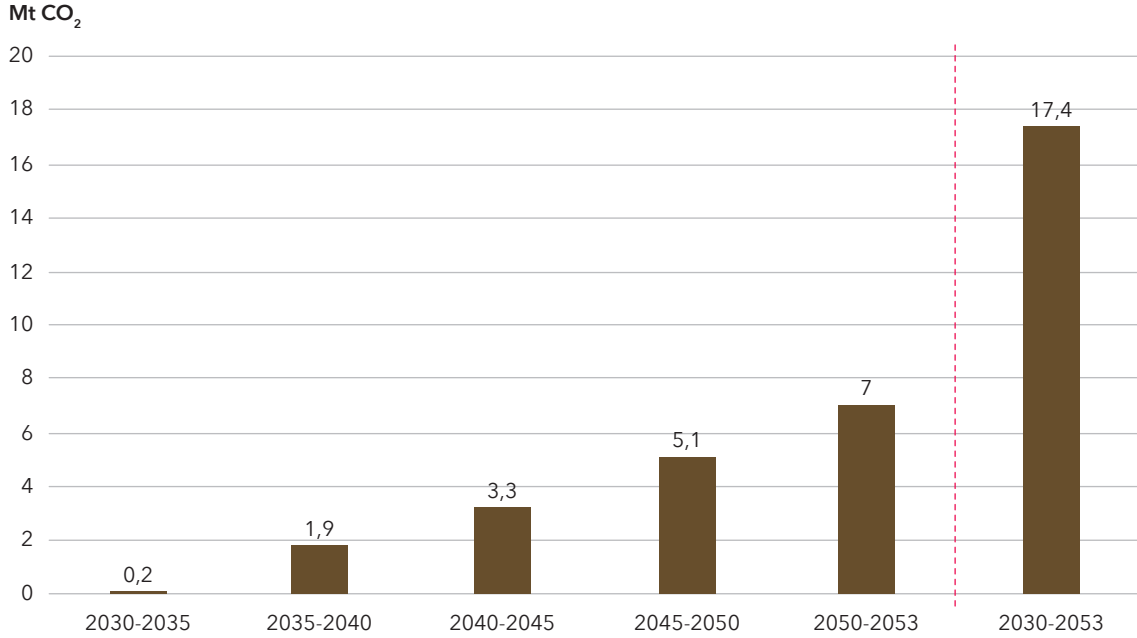
Kümülatif analizlere göre, gübre ve petrokimya sektörlerinde yenilenebilir hidrojen kullanımının toplam faydası 2053 yılında 3 milyar ABD\$ seviyesine ulaşmaktadır (Şekil 63).

Şekil 63. Gübre ve petrokimya (toplam) sektörlerinin dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi



Analiz kapsamında, gübre ve petrokimya sektörlerinde yenilenebilir hidrojen kullanımı ile sağlanması öngörülen toplam karbon emisyonu azaltımı miktarları 5 yıllık periyotlar ve 2030-2053 döneminde toplam olacak şekilde Şekil 64’de gösterilmektedir.

Şekil 64. Gübre ve petrokimya (toplam) sektörlerinde 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltımı



6.1.3 Çimento-Cam-Seramik sektörleri

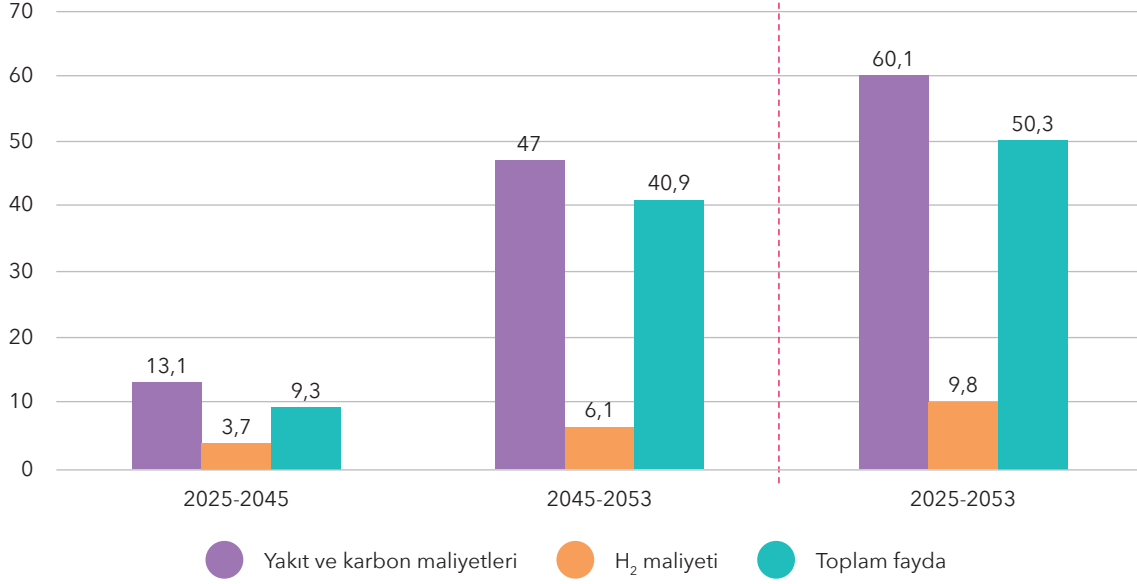
Çimento, cam ve seramik sektörlerinin fayda-maliyet analizleri birlikte değerlendirilmiştir. Önceki bölümlerde de değinildiği üzere yenilenebilir hidrojen, cam ve seramik sektöründe yakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca yenilenebilir hidrojenden elde edilen elektrik, fırınlara güç sağlamak için de kullanılabilir. Çimento sektöründe yenilenebilir hidrojen kullanımı ile yakıt kaynaklı emisyonlar %35 - %40 seviyesinde azaltılabilir.

SHURA NZ2053 Senaryosu sonuçlarına göre, 2053 yılına kadar çimento-cam-seramik sektörlerinde ihtiyaç duyulacak toplam hidrojen miktarı 6,6 Mt seviyesindedir. Bu miktardaki yenilenebilir hidrojen üretiminin toplam maliyeti ise 9,8 milyar ABD\$ olarak hesaplanmaktadır. Bu sektörlerde yenilenebilir hidrojen kullanımı gerçekleşmez ve fosil yakıt kullanımı devam ederse, 2053 yılına kadar toplam ithal yakıt maliyeti 5,1 milyar ABD\$ seviyesinde gerçekleşeceği hesaplanmaktadır. İthal fosil yakıtların yaratacağı emisyon nedeniyle karbon maliyeti de ilave bir maliyet kalemi olacaktır.

Çimento-cam-seramik sektörlerinde fırınlarda yüksek ısı ihtiyacı için yakıt olarak yenilenebilir hidrojen kullanımı ile 2025-2053 döneminde kümülatif olarak 50,3 milyar ABD\$ fayda ve 272,6 Mt CO₂ emisyonu azaltımı sağlanabileceği hesaplanmaktadır (Şekil 65, Şekil 66).

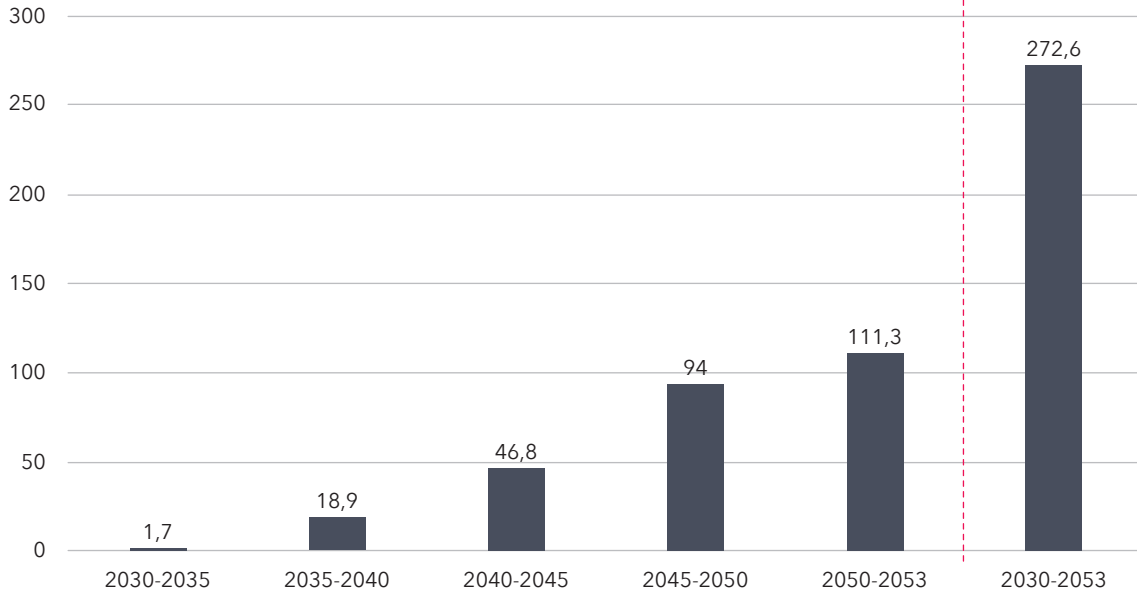
Şekil 65. Çimento-Cam-Seramik sektörlerinin dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi

Milyar ABD\$



Şekil 66. Çimento-Cam-Seramik sektörlerinde kaçınılan toplam karbon emisyonu projeksiyonları - 5 yıllık periyotlar halinde ve 2030-2053 döneminde toplam

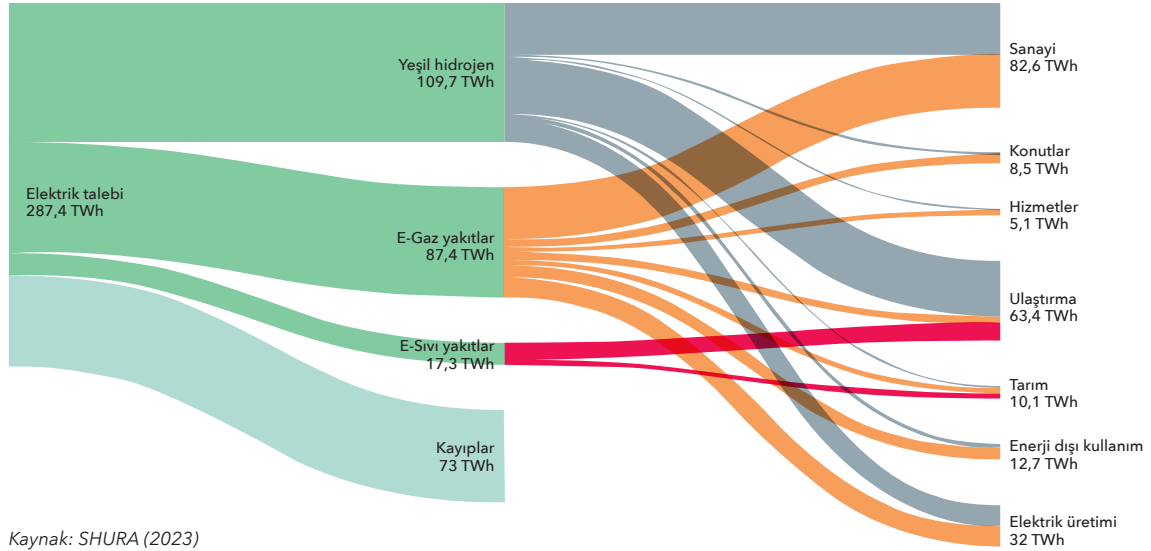
Mt CO₂



6.2 Elektrik sektörü

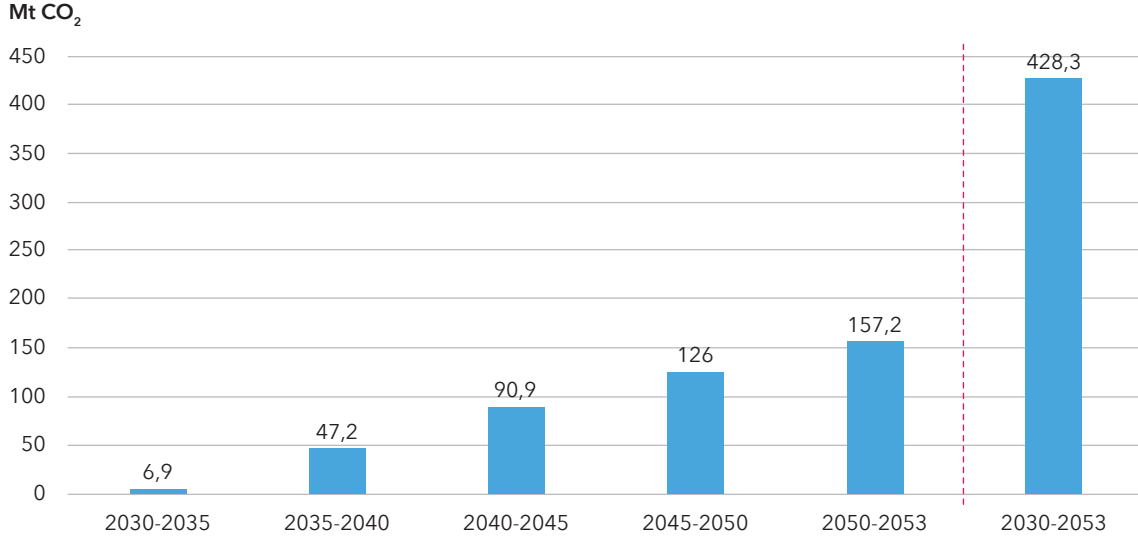
SHURA’nın net sıfır emisyon model çalışması sonuçlarına göre, Türkiye elektrik sektöründe kullanılmak üzere 2053 yılında yaklaşık 32 TWh seviyesinde yenilenebilir hidrojen talebi oluşmaktadır (Şekil 67). Özellikle mevsimsel enerji depolama ihtiyacı düşünüldüğünde, elektriğin yenilenebilir hidrojene dönüştürüldükten sonra depolanması ve gerektiğinde kullanılması büyük bir avantaj yaratmaktadır. Net sıfır model çalışması sonuçlarına göre, 2053 yılında elektrik sektörü üretilen toplam yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin yaklaşık %11’ini kullanmaktadır. Analizde, elektrik sektörünün önceki dönemlerde de benzer seviyede bir talep yaratacağı öngörülmüştür.

Şekil 67. Yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin sektörel olarak kullanımları (2053)

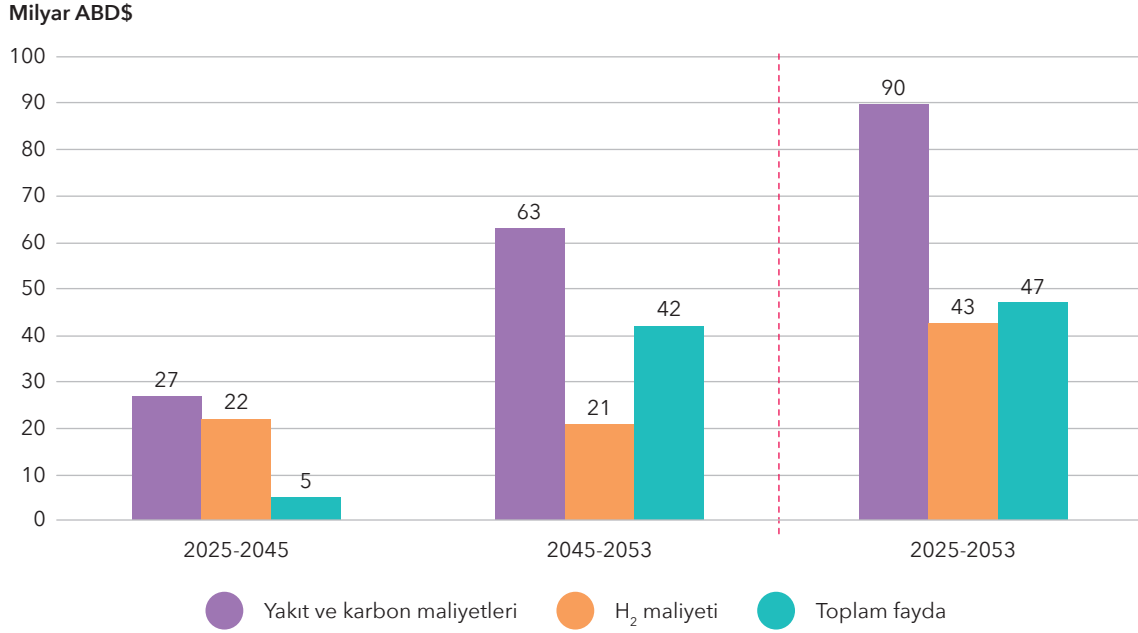


Analizde, 2025-2053 dönemi içerisinde elektrik sektörü kaynaklı toplam yenilenebilir hidrojen ihtiyacı 26,5 Mt olarak hesaplanmaktadır. Projeksiyon dönemi boyunca (2025-2053) yenilenebilir hidrojen yerine aynı enerji miktarını sağlayacak ithal kömür kullanıldığı takdirde, tüm dönem boyunca toplamda yaklaşık 90 milyar ABD\$ tutarında ithal yakıt ve karbon maliyeti oluşacağı hesaplanmaktadır. 2025- 2053 yılları arasında hidrojen üretiminin toplam maliyetinin yaklaşık 42,8 milyar ABD\$ olacağı analiz edilmektedir. Elektrik sektöründe yenilenebilir hidrojen kullanımı, projeksiyon süresi boyunca yaklaşık 429 MtCO₂ emisyonunun önlenileceği hesaplanmaktadır (Şekil 68). Bu bağlamda, yenilenebilir hidrojen kullanmanın toplam faydasının 47,1 milyar ABD\$ olacağı öngörülmektedir (Şekil 69).

Şekil 68. Elektrik sektöründe 5 yıllık dönemler bazında ve 2030-2053 dönemindeki toplam karbon emisyonu azaltımı projeksiyonu



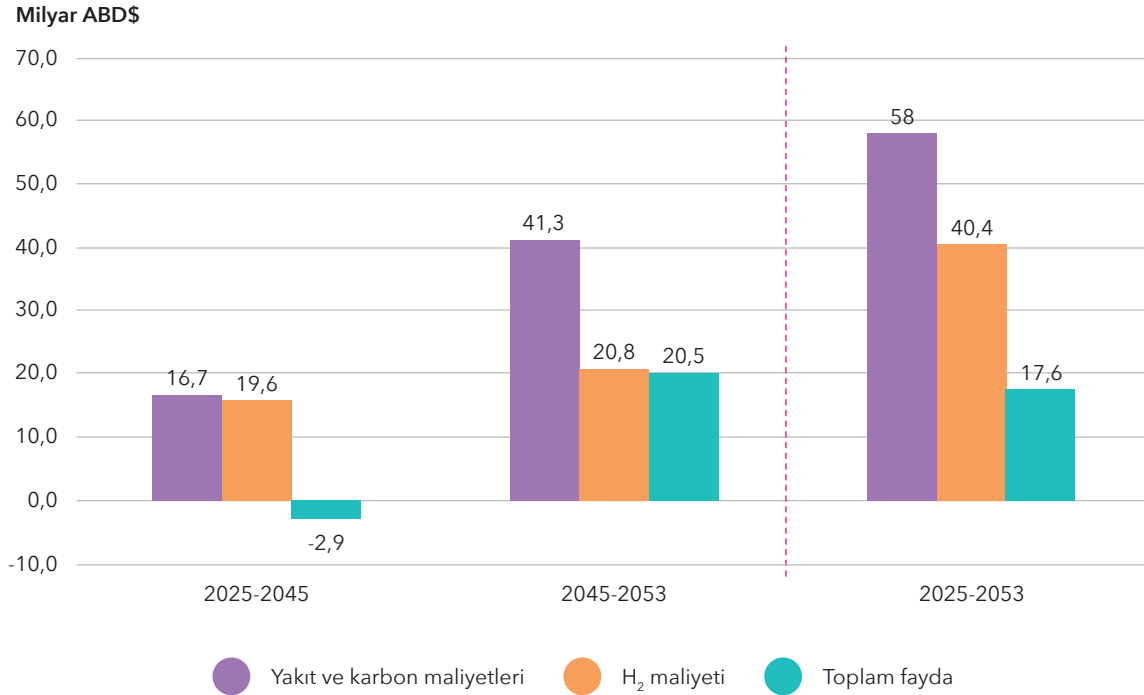
Şekil 69. Elektrik sektörünün dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi



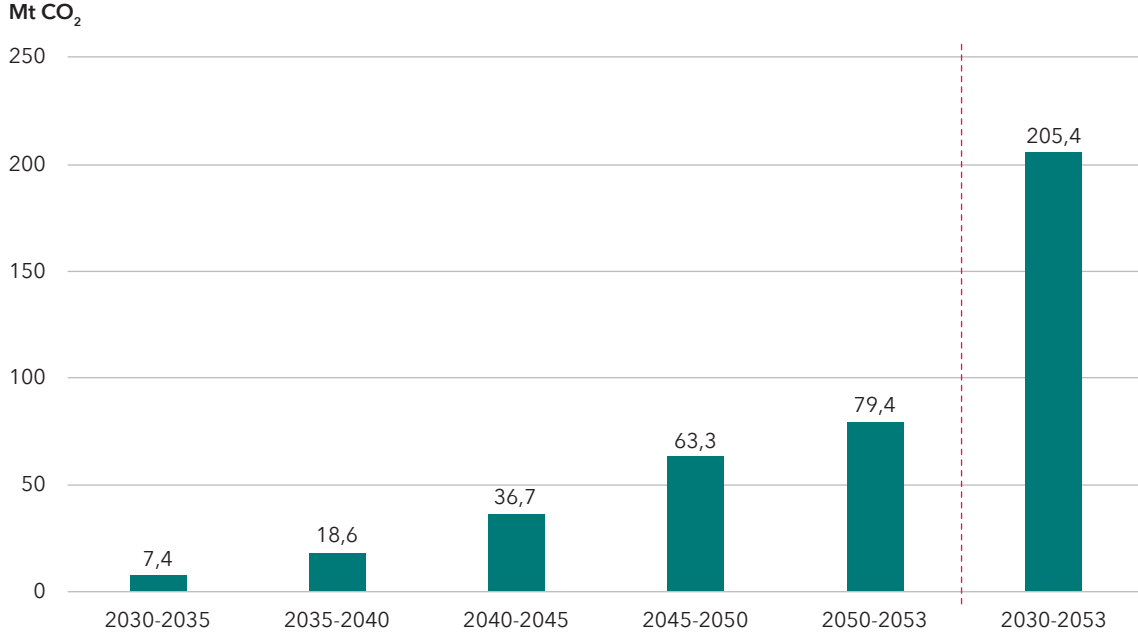
6.3 Ulaşım sektörü

Ulaşım sektörünün enerji dönüşümünde doğrudan elektrifikasyonun yetmediği alanlarda, yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin kullanımı önemli bir stratejidir. Bu bağlamda SHURA NZ2053 senaryosuna göre, 2053 yılına kadar ulaşım sektörünün toplam yenilenebilir hidrojen türevleri ihtiyacı 25,2 Mt seviyesindedir. NZ2053 senaryosunda, ulaşım sektöründe yenilenebilir hidrojen talebi 2045 yılına kadar doğrudan elektrifikasyona kıyasla daha düşük bir artış hızı göstermektedir. Ulaşım sektöründe yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin kullanımının 2025-2053 yılları arasındaki toplam maliyetinin 40,4 milyar ABD\$ seviyesine ulaşacağı hesaplanmaktadır (Şekil 70). 2022 yılı Ulusal Enerji Denge Tabloları dikkate alındığında, Türkiye ulaşım sektöründe en fazla petrol ürünleri (%98,2) tüketilmektedir. Analizde, ileriki dönemlerde ulaşım sektöründe yenilenebilir hidrojen ve türevleri kullanılmadığı takdirde, bu sektörde elektrifikasyonun artacağı fakat kalan enerji ihtiyacının yine benzin ve dizel yakıtların kullanılacağı varsayılmıştır. Böylelikle, oluşan bu ilave fosil yakıt tüketimi kaynaklı toplam yaklaşık 58 milyar ABD\$ tutarında ithal yakıt maliyeti ve karbon maliyetinin oluşacağı analiz edilmektedir. Sektörde, yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin kullanıldığı durumda ise 2025-2053 yılları arasında toplam 17,6 milyar ABD\$ fayda sağlanabileceği hesaplanmaktadır (Şekil 70).

Şekil 70. Ulaşım sektörünün dönemlere göre kümülatif fayda-maliyet analizi



Şekil 71. Ulaşım sektöründe 5 yıllık periyotlarda toplam karbon emisyonu azaltımı ve 2030-2053 yılları arasındaki kümülatif karbon azaltım projeksiyonları





BÖLÜM 7

Türkiye’de Yenilenebilir
Hidrojen Gelişimi İçin
Politika Önerileri ve
Analizin Temel Çıktıları

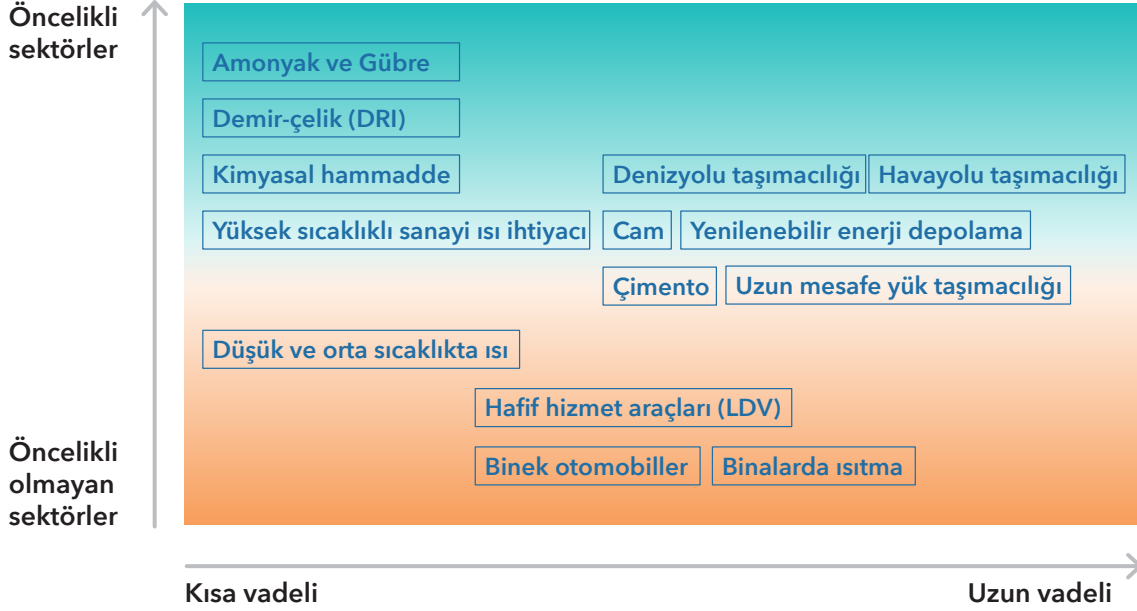
Yenilenebilir (yeşil) hidrojenin, mevcut teknolojilerle doğrudan elektrifikasyonu mümkün olmayan ve karbonsuzlaşması zor sektörlerin dönüşümünde kritik bir rol oynayacağı beklenmektedir. Bununla birlikte, birçok ülkede yenilenebilir hidrojenin üretimi ve kullanımı ile ilgili strateji gelişimi ve uygulamaları henüz gelişim aşamasındadır. İlk aşamada belirlenecek politikalarla hidrojen üretim ve kullanımının doğrudan desteklenmesi, bazı sektörlerde fosil yakıtlardan yenilenebilir hidrojene geçişi hızlandırmada önemli bir etken olabilir. Bu doğrultuda, düşük emisyonlu hidrojen üretiminin hız kazanması ve ilgili projelerin vaktinde faaliyete geçmesi için hidrojen piyasasının oluşturulması gerekmektedir. Bu bağlamda atılabilecek çeşitli adımlar arasında:

- Hidrojen piyasasının oluşturulması için sektörel bazda orta ve uzun vadeli hidrojen stratejilerini içeren eylem planının hazırlanması ve uygulanması
- Hidrojen piyasasının oluşumu, ölçeklendirilmesi, uluslararası ticareti ve yatırımların hızlanması için gerekli yasal düzenlemelerin hazırlanması
- Belirlenecek standartlar, kota ve kamu alım kuralları ile birlikte düşük emisyonlu hidrojen için talep güvenliğinin sağlanarak projeler için bir stok oluşturulması
- Özellikle yenilenebilir hidrojenin maliyet bakımından rekabet gücünün iyileştirilmesine yönelik uygulama ve teşviklerin belirlenmesi
- Düşük emisyonlu hidrojenin ölçeklendirilmesi için talep oluşturma dahil tüm değer zincirini (Ar-Ge, üretim, taşıma, depolama vb.) içeren etkili destek mekanizmalarının ve sübvansiyonların oluşturulması
- Hidrojenin etkin bir şekilde kullanımı için taşıma ve depolama altyapılarının geliştirilmesi

bulunmaktadır. Yenilenebilir hidrojen teknolojisiyle ilgili araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) süreçlerinin devam etmesi ve verimlilik gibi konular göz önüne alındığında, kısa ve orta vadelere yenilenebilir hidrojenin sınırlı miktarda kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu sebeple, üretilecek hidrojenin en verimli şekilde ve katma değeri yüksek sektör ve/veya uygulamalarda kullanılmasının önceliklendirilmesi elzemdir. Bununla birlikte, yenilenebilir hidrojenin diğer düşük karbonlu teknolojiler (örneğin ısı pompaları, elektrikli araçlar vb.) ile doğrudan bir rekabete girmemesi de önemli olacaktır. Bir diğer deyişle yenilenebilir hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklı elektriğin verimli kullanımını destekleyerek, doğrudan elektrifikasyonu tamamlayıcı nitelikte olmalıdır.

Rapor kapsamında yapılan analizler ve değerlendirmeler neticesinde, Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin hangi uygulama alanlarında önceliklendirilebileceği Şekil 72’de özetlenmektedir. Kısa vadede, gübre, demir-çelik, kimya (petrokimya ve rafineriler dahil) sektörleri yenilenebilir hidrojenin odak noktası olarak öne çıkmaktadır. Orta ve uzun vadede ise uzun mesafe taşımacılığı, cam ve seramik sektörleri hidrojenin potansiyel kullanım alanları arasında değerlendirilmektedir.

Şekil 72. Türkiye’deki yenilenebilir hidrojen uygulamaları için önerilen öncelikli alanlar



Bu doğrultuda, Türkiye aşağıdaki unsurları da dikkate alarak strateji önceliklerini şekillendirebilir:

- Mevcut durumda hidrojen üretim/tüketim tecrübesi olan sektörlerin (örneğin rafineriler ve gübre) yenilenebilir hidrojene geçişinin kolaylaştırılması/önceliklendirilmesi
- Küresel çapta yürütülen iyi uygulamalara/projelere ortak olunması ya da Türkiye’de başlatılması için girişimlerde bulunulması
- Yenilenebilir hidrojenin ölçeklendirilebilir alanlarda (örneğin demir-çelik) kullanılması
- Sektörel maliyet analizleri yapılarak, rekabetçiliği etkilemeyecek şekilde yenilenebilir hidrojenin alternatif yakıt kapsamında desteklenmesi

Türkiye’de sanayi sektörleri kapsamında yenilenebilir hidrojen uygulamaları için yapılan fayda-maliyet ve emisyon azaltımı analizi sonuçları⁴⁰ aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Demir-çelik sektörü için yapılan analizlerde, mevcut EAF teknolojisinin H₂-DRI-EAF üretim sürecine dönüşeceği ve entegre tesislerin de DRI-EAF teknolojisini içerecek şekilde modernize edileceği öngörülmüştür.⁴¹ Yürütülen fayda-maliyet analizleri sonuçlarına göre, sektörde yenilenebilir hidrojen kullanımının toplam faydası 2025-2053 yılları arasında 9,5 milyar ABD\$, öngörülen emisyon azaltımı ise 85,8 Mt CO₂ olarak hesaplanmıştır.
- Kimya sektörü kapsamında yapılan fayda-maliyet analizinde yenilenebilir hidrojen kullanımının 2025-2053 döneminde toplamda 3 milyar ABD\$ fayda, 14,6 Mt CO₂ emisyonu azaltımı sağlayacağı hesaplanmıştır. Bu bağlamda, bu süreçte ithal yakıt ve karbon maliyetlerinden de 3,7 milyar ABD\$ kaçınılabilecektir.

⁴⁰ Analiz sonuçlarının detayları "6. Fayda-maliyet analizi" bölümünde bulunmaktadır.

⁴¹ Tesis dönüşüm maliyetleri hesaba katılmamıştır. Fosil yakıtların yeşil hidrojenle ikamesi, yakıt maliyeti, karbon maliyeti ve LCOH bağlamında analiz edilmiştir.

- Petrokimya (rafineriler dahil olmak üzere) ve gübre sektörleri analizlerde bir arada ele alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, 2030-2053 yılları arasında gübre ve petrokimya sektörlerinde yenilenebilir hidrojen kullanımının toplam faydası 3 milyar ABD\$, emisyon azaltımı ise 17,4 Mt CO₂ olarak hesaplanmıştır.
- Cam ve seramik sektöründe fırınlarda yüksek ısı ihtiyacı için yakıt olarak yenilenebilir hidrojen kullanımı ile 2030-2053 döneminde toplamda 5,5 milyar ABD\$ fayda, ve 29,7 Mt karbon emisyonları azaltımı sağlanması mümkün olacaktır.

Türkiye’de gri hidrojen petrokimya sanayisinde (çoğunlukla rafinerilerde) bazı uygulamalarda ve amonyak üretiminde halihazırda kullanılmaktadır. Bu sektörlerin gri hidrojenden yenilenebilir hidrojene kademeli geçişi, üretim ve kullanım için bir pazar oluşumunu destekleyecektir. Piyasa açısından bakıldığında, endüstriyel talebin teşvik edilmesi ve üretimin talebi karşılayacak şekilde artırılması, ölçek ekonomisi bağlamında hidrojenin üretim maliyetinin azalmasına da katkı sağlayacaktır. Maliyetlerin azalmasında teknolojik gelişmeler (yenilenebilir enerji kaynaklarının seviyelendirilmiş elektrik maliyeti ve elektrolizör maliyetlerinin düşmesi) ve finansal teşvikler de faydalı olacaktır. Örneğin havacılık sektörü, yenilenebilir hidrojen türevleri (sentetik kerosen) gibi yüksek enerji yoğunluklu moleküllere ihtiyaç duyduğundan, bu sektörde doğrudan elektrifikasyonun artması mevcut teknolojiler çerçevesinde oldukça kısıtlıdır. Yenilenebilir hidrojen türevleri mevcut durumda, jet yakıtı gibi fosil yakıtlara kıyasla daha maliyetlidir. Bu durum, sentetik yakıtların maliyetlerinin azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümlerin önemini vurgulamaktadır. Yenilenebilir hidrojenin Türkiye’de, kısa vadede sektöre adaptasyon potansiyeli yüksek gübre ve demir-çelik gibi sektörlerde kullanılması önemli bir katma değer sunabilir. Cam üretiminde hidrojen, doğal gazın yerini alarak eritme fırınlarında yakıt olarak kullanılabilir. Böylelikle, hem emisyonlarda azaltım hem de üretim süreçlerinde gereken yüksek ısı sağlanabilir. Hidrojen, Türkiye çimento sektöründe fosil yakıtlara alternatif bir yakıt olarak orta-yüksek sıcaklıkta endüstriyel ısı sağlaması özelliğiyle ön plana çıkmaktadır. Fakat, çimento sektörü emisyonlarının sadece %35’lik payının yakıt kaynaklı emisyonlardan oluşması, diğer sektörlerle kıyasla yenilenebilir hidrojenin kısıtlı kullanımına neden olabilir. Sektördeki başlıca ihtiyaç, düşük karbon emisyonu ile çimento ürünlerinin üretimidir. Ayrıca, biyokütle kullanımı ve karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojileri, sektörün karbonsuzlaşmasında önemli rol oynayabilir.

Türkiye’de elektrik şebekesinin esnekliği batarya enerji depolama, enterkonneksiyon kapasitesi artırımı, talep tarafı katılımı, hidroelektrik santraller gibi çeşitli seçenekler yoluyla artırılabilir. Bu nedenle, elektrik sektöründe yenilenebilir hidrojenin depolanarak kullanımı öncelikli bir strateji değildir. Bununla birlikte, güneş enerjisi santrallerinin şebekede yüksek bir kapasiteye ulaşması durumunda, yenilenebilir hidrojenin mevsimsel enerji depolama için kullanılması arz güvenliğine ve şebeke esnekliğine katkı sağlayabilir. Analiz sonuçları, elektrik sektöründe yenilenebilir hidrojenin kullanılmasının 2025-2053 döneminde 47 milyar ABD\$ fayda ve 429 Mt karbon emisyonu azaltımı sağlayabileceğini göstermiştir.

Ulaştırma sektöründe ise öncelikli olarak doğrudan elektrifikasyonun artırılması, orta vadede ise özellikle karayolu uzun mesafe taşımacılığında hidrojenin daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Havayolu ve gemi taşımacılığında yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin kullanımı Türkiye için orta-uzun vadede önemli bir strateji olacaktır. Ulaştırma sektörü kapsamında yapılan fayda-maliyet analizi sonucunda, yeşil hidrojen ve türevlerinin kullanımı ile 2025-2053 döneminde kümülatif olarak 17,6 milyar ABD\$ fayda, 207,6 Mt karbon emisyonu azaltımı sağlanması mümkün olacaktır.

Bina ısıtmasında ise ısı pompalarının, doğal gaz kazanlarının yerini alması beklenmektedir. Bina ısıtmasında hidrojenin ısı pompalarına kıyasla çok daha verimsiz olması ve yenilenebilir enerji kapasitesinden sağlanan elektriğin doğrudan ısı pompaları yoluyla kullanılabilmesi, hidrojenin binalarda kullanılmasının öncelikli bir strateji olmayacağı değerlendirilmektedir.

Yenilenebilir hidrojen üretiminin, elektrik sektörünün dönüşüm hedefleriyle rekabet etmemesi diğer bir önemli husustur. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki artan payı, fosil yakıt tüketimini ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmada hayati bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, hidrojen üretimi için mevcut yenilenebilir enerji santrallerini kullanmak yerine yeni yenilenebilir enerji yatırımlarının gerçekleştirilmesi daha etkin bir dönüşüm sağlayacaktır. Bu süreçte, yenilenebilir hidrojen üretiminde kullanılacak kaynakların planlanması ve destekleyici mevzuatın oluşturulmasında eklenebilirlik (additionality) prensibi dikkate alınmalıdır.

Bununla birlikte, yenilenebilir hidrojen ekosisteminin oluşması için önemli bir altyapı gelişimine de ihtiyaç vardır. Hidrojen kullanımının önceliklendirildiği sektörlerde gerekli altyapının hazırlanması için politika ve destek mekanizmalarının hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu politikalar sadece üretimi değil, hidrojenin taşınması, depolanması ve nihai kullanım noktalarındaki süreçleri de kapsayacak şekilde bütüncül bir yaklaşım içermelidir.

Yenilenebilir hidrojen üretim maliyeti ile sektörlerdeki uygulamalar (sanayi ve uzun mesafe taşımacılığı gibi öncelikli alanlarda) arasındaki maliyet farklarının dikkate alınması ve yenilenebilir hidrojen piyasa gelişiminin bu doğrultuda desteklenmesi önerilmektedir. Hidrojen ekonomisinin gelişimini desteklemek ve uluslararası alanda rekabetçi bir sanayiye sahip olmak için her şeyden önce yenilenebilir enerji potansiyelinin azami şekilde kullanması gerekecektir.

Son olarak, uluslararası alanda rekabetçi bir hidrojen ekonomisine sahip olmak için Türkiye’nin yenilenebilir enerji potansiyelini azami düzeyde kullanması bir öncelik olarak belirlenmelidir. Bu hedef, hidrojen ekosisteminin sürdürülebilirliğini ve ülke ekonomisine sağlayacağı katkıyı artıracaktır.

Raporun temel bulgularını da dikkate alarak değerlendirilebilecek çeşitli politika önerileri aşağıda özetlenmektedir:

Yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin (yeşil amonyak, sentetik kerosen vb.) en yüksek faydayı sunduğu ve doğrudan elektrifikasyonun karbondan arındırmada tek başına yetersiz kaldığı sektörlerde kullanımına öncelik verilmelidir: Türkiye’de yenilenebilir hidrojenin kullanılacağı

öncelikli alanlar; amonyak (gübre), demir-çelik, kimya sektörü (rafineriler ve petrokimya dahil), cam-seramik ve uzun mesafe taşımacılığı (karayolu, havayolu, deniz) olarak tanımlanabilir.

Doğrudan elektrifikasyonun net sıfır karbon emisyonlu bir ekonomiye geçişte yeterli olmadığı sektörlerde özel hedefler oluşturarak yenilenebilir hidrojen ve türevlerine olan talebin teşvik edilmesi önerilmektedir: Sektörlere kotalar belirlenerek yenilenebilir hidrojen kullanımına yönelik bir talep oluşumu sağlanabilir. Böylelikle, sanayinin yenilenebilir hidrojene yönelik yatırımlarının önü açılarak, yenilenebilir hidrojen kullanımının sanayiye entegrasyonu hızlanabilir. Bu bağlamda, halihazırda gri hidrojen kullanan gübre sektörü ve rafineriler ile demir-çelik sektörlerine belli miktarda yenilenebilir hidrojen alım zorunluluğu getirilebilir.

Yerli arzı teşvik etmek için yenilenebilir hidrojen üretimine mali teşviklerin sağlanması önerilmektedir: Vergi muafiyetleri ve diğer mali teşvikler, özellikle fosil alternatifleriyle karşılaştırıldığında maliyetlerin daha yüksek olduğu ilk yıllarda yenilenebilir hidrojenin üretimini artırmada yardımcı olabilir. Örneğin, sınırlı hacimli Feed-in-Tariff'ler (FiT) ilk dönem hidrojen alım fiyatı olarak belirlenebilir. Ek olarak, hidrojen yarışması (YEKA benzeri) rafineriler ve demir-çelik sektörü için uygulanabilir. Bu konuda Avrupa Komisyonu'nun (European Commission) Avrupa Hidrojen Bankası (European Hydrogen Bank) nezdinde ilk kez gerçekleştirilen rekabetçi ihale süreci örnek alınabilir.

Yenilenebilir hidrojen üretiminde kullanılacak yenilenebilir enerji kaynaklarının planlanmasında, eklenebilirlik (additionality) prensibi de dikkate alınarak gerekli düzenlemelerin ve politikaların bütüncül bir çerçeve ile oluşturulması önerilmektedir: Yenilenebilir hidrojen üretim sürecinde halihazırda üretim yapan yenilenebilir enerji santrallerinden yararlanmak yerine, yeni yenilenebilir enerji santrallerinin kurulması önemli olacaktır. Böylelikle hidrojen üretimi, elektrik sisteminin karbonsuzlaşması ve doğrudan elektrifikasyonun artışı ile rekabet etmeyecektir. Diğer taraftan, yenilenebilir enerji kesintilerini (curtailment) önlemek için ihtiyaç fazlası yenilenebilir enerjinin elektrolizörlere yönlendirilmesi de değerlendirilmelidir.

Ulaşım sektöründe enerji dönüşümü teşvik edilerek, yenilenebilir hidrojen ekosisteminin oluşturulması sağlanabilir: Özellikle deniz taşımacılığı ve havacılık sektörlerinde emisyonların azaltılmasında yenilenebilir hidrojen türevlerinin (sentetik kerosen, e-amonyak ve e-metanol vb) üretimini ve kullanımını teşvik etmek için girişimlerde bulunulabilir. Mevcut durumda, yenilikçi gemi tasarımı ve inşa tecrübesi olan yerli tersaneler ile yeni bir yol haritası belirlenebilir. Bu doğrultuda, LNG ve hidrojen ve türevlerini (e-amonyak, e-metanol) kullanan yeni hibrit gemilerin geliştirilmesi hedeflenebilir.

Hidrojenin üretimi, taşınması, dağıtımı ve kullanımı açısından havalimanı ve liman altyapılarının iyileştirmeden geçirilmesi gerekecektir: Hidrojen ekosisteminin oluşturulmasında vergi teşviklerinin yanı sıra, yenilenebilir hidrojenin kullanımı ve taşınmasında büyük bir role sahip olacak havalimanı ve liman altyapılarının geliştirilmesi gerekecektir. İlgili tüm inşaat düzenlemelerini desteklemek için doğrudan finansal desteklerin sağlanmasının yanı sıra, altyapı yatırımlarına yönelik vergi indirimleri veya sübvansiyonların da tanımlanması, bu yatırımların vaktinde tamamlanmasına yardımcı olacaktır.

Yenilenebilir hidrojene ilişkin idari izin süreçlerinin ve ilgili destek mekanizmalarının belirlendiği, sektörler arası üretim ve gelişim planlarını koordine eden bir kamu biriminin oluşturulması önerilmektedir: Hidrojen özelinde oluşturulacak bir kamu birimi ile ilgili mevzuatlar ve ikincil mevzuatlar hazırlanabilir, yatırımcılar için bir yol haritası oluşturularak, hidrojen üretim tesisi alanları ile ilgili teknik esaslar belirlenebilir ve finansman için çözümler oluşturulabilir.

Yenilenebilir hidrojen teknolojilerinin ticari olarak yaygınlaştırılması için kamu-özel sektör ortaklıkları kapsamında karma finansmanın sağlanması önerilmektedir: Mevcut durumda uluslararası çeşitli kurum ve kuruluşlar, hidrojen proje finansmanının farklı düzeylerinde yer almaktadır. Bu bağlamda, kamu-özel sektör iş birlikleri kapsamında oluşturulacak karma finansman imkanlarıyla oluşacak hidrojen fonları, finansman anlaşması yapılmış (financial closure) projeleri desteklemekte kullanılabilir. Ayrıca, yabancı şirketler ile yapılacak ortaklıklar ile tecrübe gelişiminin hızlandırılması da mümkün olacaktır.

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

Elektrik sektöründe kullanılacak yenilenebilir hidrojenin üretimi ve depolanmasına yönelik teknik standartların oluşturulması önerilmektedir: Yenilenebilir hidrojenin elektrik sektöründe güvenle kullanılmasını sağlayacak standartlar ve yasal mevzuatların oluşturulması gerekmektedir. Doğal gaz şebekesine özel olarak, doğal gaz, yenilenebilir hidrojen ve diğer yenilenebilir hidrojen türevlerinden oluşacak gaz karışımının kullanılmasına yönelik altyapı iyileştirmeleri için Ar-Ge projelerinin de devamlılığının sağlanması önerilmektedir.

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

Elektrolizör teknolojilerinin yurt içinde geliştirilmesi için Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi önerilmektedir: Özellikle, ilk yatırım maliyetleri yüksek olan elektrolizör teknolojisinin yurtdışında geliştirilmesi ve üretilmesi için finansal teşvik ve desteklerin tanımlanması önemli bir adım olacaktır. Sektörel birikim ve insan kaynağı yetiştirilmesi önceliklendirilebilecek diğer konular arasındadır. Son olarak, hidrojen ekosisteminde taşıma, depolama ve son kullanım teknolojileri odağında, Türkiye’nin güçlü olduğu alanların belirlenerek, stratejilerin ve desteklerin bu doğrultuda oluşturulması önerilmektedir.

Kaynakça

- Agora Energiewende, 2021. 12 Insights on Hydrogen.
https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_H2_Insights/A-EW_245_H2_Insights_WEB.pdf
- Agora Energiewende, 2021. Making renewable hydrogen cost-competitive.
https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf
- Agora Energiewende, 2023. Chemicals in transition.
https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2022/2022-02_IND_Climate_Positive_Chemistry_DE/A-EW_300_Chemicals_in_transition_EN_WEB.pdf
- AIRBUS, 2020. Hydrogen combustion, explained.
<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained>
- AIRBUS, 2021. The green hydrogen ecosystem for aviation, explained.
<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-06-the-green-hydrogen-ecosystem-for-aviation-explained>
- Airbus, 2024. ZEROe.
<https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe>
- Airbus, t.y. Hydrogen.
<https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen#:~:text=If%20generated%20from%20renewable%20energy,by%2Dproduct%20of%20CO2%20emissions.>
- Allied Market Research, 2022. Hydrogen Fuel Cell Train Market.
<https://www.alliedmarketresearch.com/hydrogen-fuel-cell-train-market-A07806>
- Alpine, 2024. ALPENGLOW Hy4.
<https://www.alpine-cars.co.uk/concept-cars/alpenglow.html>
- Alstom, 2021. World's first hydrogen train Coradia iLint honoured.
<https://www.alstom.com/press-releases-news/2021/1/worlds-first-hydrogen-train-coradia-ilint-honoured>
- Amogy, 2024. Amogy Sails World's First Carbon-Free Ammonia Powered Maritime Vessel
<https://amogy.co/amogy-sails-worlds-first-carbon-free-ammonia-powered-maritime-vessel/>
- Argonne, 2009. Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications.
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/technical-assessment-cryo-compressed-hydrogen-storage-tank-systems#:~:text=Cryo%2Dcompressed%20hydrogen%20storage%20refers,hydrogen%20at%20near%2Dambient%20pressures.>
- Argus, 2023. S Korea on track to open hydrogen power bidding market.
<https://www.argusmedia.com/en/news/2432689-s-korea-on-track-to-open-hydrogen-power-bidding-market>

- Australian Government, 2022. Clean hydrogen collaboration with Japan.
<https://www.dfat.gov.au/about-us/publications/trade-investment/business-envoy/business-envoy-february-2022/clean-hydrogen-collaboration-japan>
- Avrupa Komisyonu, 2024. European Hydrogen Bank auction provides €720 million for renewable hydrogen production in Europe.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2333
- AWOE, 2023. The Haber-Bosch Process.
[https://www.awoe.net/Ammonia-Haber-Bosch-Process.html#:~:text=Nowadays%2C%20the%20Haber%2DBosch%20process,and%20coal%20\(19%25\)\)](https://www.awoe.net/Ammonia-Haber-Bosch-Process.html#:~:text=Nowadays%2C%20the%20Haber%2DBosch%20process,and%20coal%20(19%25)))
- BALLARD, 2023. Ballard announces partnership with Ford Trucks for fuel cell powered heavy-duty trucks & initial order.
<https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2023/08/03/ballard-announces-partnership-with-ford-trucks-for-fuel-cell-powered-heavy-duty-trucks-initial-order>
- Bassani, A., Previtali, D., Pirola, C., Bozzano, G., Colombo, S., Manenti, F., 2020. Mitigating Carbon Dioxide Impact of Industrial Steam Methane Reformers by Acid Gas to Syngas Technology: Technical and Environmental Feasibility. J. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst., 8 (1), 71-87. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d7.0258>
- Berkeley News, 2023. A big step toward 'green' ammonia and a 'greener' fertilizer.
<https://news.berkeley.edu/2023/01/11/a-big-step-toward-green-ammonia-and-a-greener-fertilizer>
- Bhaskar, A., Assadi, M., Somehsaraei, H., 2020. Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/758>
- BMW, 2013. Hydrogen fuel cell cars: everything you need to know.
<https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html>
- BNEF, 2020. The Economics of Power Generation.
- BNEF, 2022. Japan's Costly Ammonia Coal Co-Firing Strategy.
https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/BNEF-Japans-Costly-Ammonia-Coal-Co-Firing-Strategy_FINAL.pdf
- Bosu, S., Rajamohan, N., 2023. Recent advancements in hydrogen storage - Comparative review on methods, operating conditions and challenges.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923006286>
- Burke, A., Ogden, J., Fulton, L., 2024. Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs.
https://escholarship.org/content/qt83p5k54m/qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf?t=s9oa2u
- Carbon clean, 2023. CO2 capture technology for cement production.
<https://www.carbonclean.com/industries/cement>

Carbon Independent, t.y. Emissions from home energy use.

<https://www.carbonindependent.org/15.html#:~:text=The%20CO2%20generated%20by%20burning,kg%20%2F%20kWh%20%5B9%5D%20.>

Carscoops, 2024. Hear The NAMX HUV's Roaring Hydrogen V8 For The First Time.

<https://www.carscoops.com/2024/01/hear-the-namx-huvs-roaring-hydrogen-v8-for-the-first-time/>

CEMEX, 2022. CEMEX to introduce hydrogen technology to reduce CO₂ emissions in four cement plants in Mexico.

<https://www.cemex.com/w/cemex-to-introduce-hydrogen-technology-to-reduce-co2-emissions-in-four-cement-plants-in-mexico>

Cerame-unie, 2021. Ceramic Roadmap to 2050.

https://www.ceramica.info/cerinfo-content/uploads/2021/12/ceramic-roadmap-to-2050-continuing-our-path-towards-climate-neutrality_LOW.pdf

Cerniauskas, S., Junco, A., Grube, T., Robinius, M., Stolten, D., 2020. Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study.

<https://juser.fz-juelich.de/record/875142/files/Cerniauskas-2020-Options%20of%20Natural%20Gas%20Pipeline%20Reassignment%20for%20Hydrogen%20Cost%20Assessment%20for%20a%20Germany%20Case%20Study.pdf>

CEVA Logistics, t.y. WATT HOURS PER KILOGRAM.

<https://www.cevalogistics.com/en/glossary/watt-hours-kilogram>

Cehade, G., Dincer, I., 2021. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121007225>

Chen, Y., & Zuo, H., 2021. Review of hydrogen-rich ironmaking technology in blast furnace. Ironmaking & Steelmaking, 48(6), 749-768.

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03019233.2021.1909992>

CoğrafyaHarita, 2022. Türkiye Gübre Fabrikaları Haritası 2022.

http://cografyaharita.com/turkiye_sanayi_haritalari.html

Coolconversion, 2024. Petrol - US gallons to Kilograms Calculator.

<https://coolconversion.com/density-volume-mass/--1--gallon--of--petrol--in--kg>

Commodity Inside, 2023. Hydrogen Application in the Cement Industry: A Promising Pathway to Decarbonization.

<https://commodityinside.com/hydrogen-application-in-the-cement-industry-a-promising-pathway-to-decarbonization/#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20used%20to,CO2%20emissions%20from%20cement%20production.>

CRYOSPAIN, 2022. How do hydrogen airplanes work?.

<https://cryospain.com/how-do-hydrogen-airplanes-wotk>

- CWW, 2021. The green hydrogen revolution at Iris Ceramica.
<https://ceramicworldweb.com/en/news/green-hydrogen-revolution-iris-ceramica#:~:text=The%20world's%20first%20ceramic%20factory,by%20the%20end%20of%202022.>
- Çimento, Cam, Seramik ve Toprak Ürünleri İhracatçıları Birliği, 2022. Faaliyet Raporu.
https://ccst.org.tr/Uploads/arastirmaRaporlari_view/ccisb---2022-faaliyet-raporu---web.pdf
- ÇŞİDB, 2022. Ulaştırma Türüne Göre Seragazi Emisyonu.
<https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790>
- Dash, S. K., Chakraborty, S., Elangovan, D. A., 2023. Brief Review of Hydrogen Production Methods and Their Challenges.
<https://doi.org/10.3390/en16031141>
- Dash, S., Chakraborty, S., Roccotelli, M., Sahu, U., 2022. Hydrogen Fuel for Future Mobility: Challenges and Future Aspects.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8285>
- Dedeoğlu, V., Topal, Y., Gökalp, İ., 2023. Hidrojen Taşınmasında Doğal Gaz Ağının Rolü.
<https://open.metu.edu.tr/handle/11511/103052>
- DGCA, 2023. Statistics.
<https://web.shgm.gov.tr/tr/kurumsal/4547-istatistikler>
- DHMI, 2023. İstatistikler.
<https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx>
- Dimitriou, P., Javaid, R., 2020. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920300124?via%3Dihub>
- Dinçer, İ., Ezan, M., 2020. TÜBA-ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ RAPORU.
<https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/T%C3%9CBA-Enerji%20Depolama%20Teknolojileri%20Raporu.pdf>
- Edison, 2023. Edison Next with Iris Ceramica Group for 'H2 Factory', the first green hydrogen-powered ceramic slab industry.
<https://www.edison.it/en/edison-next-iris-ceramica-group-h2-factory-first-green-hydrogen-powered-ceramic-slab-industry>
- Ekonomim, 2023. Amonyakta by-pass operasyonu.
<https://www.ekonomim.com/ekonomi/amonyakta-by-pass-operasyonu-haberi-696196#:~:text=T%C3%BCrkiye%2C%20Rusya'n%C4%B1n%20yan%C4%B1nda%20Ukrayna,g%C4%B1da%20ve%20tekstil%20end%C3%BCstrilerinde%20kullan%C4%B1l%C4%B1yor.>
- El-Shafie, M., Kambara, S., Hayakawa, Y., 2019. Hydrogen Production Technologies Overview.
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=90227>
- Eljack, F., Kazi, M., 2021. Prospects and Challenges of Green Hydrogen Economy via Multi-Sector Global Symbiosis in Qatar.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsus.2020.612762/full#B17>

EMSA, 2023. Potential of Ammonia as Fuel in Shipping.

<https://www.emsa.europa.eu/publications/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html>

EnergyNow, 2023. INFOGRAPHIC: Energy Efficiencies: EVs Versus Fuel Cell Vehicles – ENERGYminute.

<https://energynow.com/2023/07/infographic-energy-efficiencies-evs-versus-fuel-cell-vehicles-energyminute/>

en-former, 2023. Why the chemical sector needs so much hydrogen.

<https://www.en-former.com/en/why-the-chemical-sector-needs-so-much-hydrogen/>

Energy Market Regulatory Authority, 2023. NATURAL GAS MARKET 2022 SECTOR REPORT.

<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-94/dogal-gazyillik-sektor-raporu>

Energy Star, 2017. Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Ammonia and Nitrogenous Fertilizer Production.

https://www.energystar.gov/buildings/tools-and-resources/energy_efficiency_and_cost_saving_opportunities_ammonia_and_nitrogenous

EPA, 2023. Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle.

<https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>

EPDK, 2018. 2017 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu.

<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-24-3/elektrikyllik-sektor-raporu>

EPDK, 2024. 2023 Yılı Elektrik Piyasası Aralık Ayı Sektör Raporu.

<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar>

EPDK, 2024. Doğal Gaz Piyasası Aylık Sektör Raporu Listesi.

<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-95/dogal-gazaylik-sektor-raporu>

Erdemir, t.y. Sıfır Karbon Hedefine Doğru “Çeliğin Yeşil Yolculuğu”.

<https://www.erdemir.com.tr/storage/uploads/2024/01/7e1a961a047812f2cd9ed9ae73edeb4e.pdf>

ETKB, 2022. SERAMİK SEKTÖR RAPORU.

<https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sektor-raporlari/mu2812011410>

ETKB, 2022. Türkiye Ulusal Enerji Planı.

https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_National_Energy_Plan.pdf

ETKB, 2023. EİGM Raporları.

<https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>

ETKB, 2023. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası.

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

ETKB, 2023. 2022 yılı Ulusal Enerji Denge Tablosu.

<https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>

EU Commission, 2023. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS.

https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-03/COM_2023_156_1_EN_ACT_part1_v6.pdf

EU Commission, t.y. Projects selected for grant preparation.

https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/large-scale-calls/projects-selected-grant-preparation_en

Euronews, 2020. Hydrogen fuel cell vs electric cars: what you need to know but couldn't ask.

<https://www.euronews.com/green/2020/02/13/hydrogen-fuel-cell-vs-electric-cars-what-you-need-to-know-but-couldn-t-ask>

European Commission, 2022. HYBRIT Demonstration: Swedish largescale steel value chain demonstration of Hydrogen Breakthrough Iron-making Technology.

https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-07/if_pf_2022_hybrit_en.pdf

European Commission, 2023. EDGAR database: EU's emissions keep falling, as post-COVID rebound in world emissions continues.

https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/edgar-database-eus-emissions-keep-falling-post-covid-rebound-world-emissions-continues-2023-10-19_en

European Council, 2023. RefuelEU aviation initiative: Council adopts new law to decarbonise the aviation sector.

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>

European Parliament, 2020. The potential of hydrogen for decarbonising steel production.

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI\(2020\)641552_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_EN.pdf)

European Parliament, 2023. EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained.

<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>

European Parliamentary Research Service, 2021. Carbon-free steel production.

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU\(2021\)690008_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690008/EPRS_STU(2021)690008_EN.pdf)

Eurotherm, 2019. Hydrogen or Electrical Power for a Greener Glass Industry.

<https://www.eurotherm.com/glass-manufacture/hydrogen-or-electrical-power-for-a-greener-glass-industry/>

Fakhreddine, O., Gharbia, Y., Derakhshandeh, J., Amer, A., 2023. Challenges and Solutions of Hydrogen Fuel Cells in Transportation Systems: A Review and Prospects.

<https://www.mdpi.com/2032-6653/14/6/156>

FCHEA, 2019. Hydrogen as a Clean Alternative in the Iron and Steel Industry.

<https://www.fchea.org/transitions/2019/11/25/hydrogen-in-the-iron-and-steel-industry>

Fertiberia, 2024. H2F Project.

<https://www.fertiberia.com/en/greenammonia/h2f-project/>

Fertilizers Europe, t.y. How fertilizers are made.

<https://www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/how-fertilizers-are-made/>

Financial Times, t.y. Green hydrogen to power ceramics revolution.

<https://www.ft.com/partnercontent/iris-ceramica-group/green-hydrogen-to-power-ceramics-revolution.html>

fmi, 2022. Hydrogen Buses Market.

<https://www.futuremarketinsights.com/reports/hydrogen-buses-market>

Foreks, 2023. Türkiye’nin karbonsuzlaşma hedefinde kimya sektörü öncelikli.

<https://foreks.com/haber/detay/64527a7452faff00010a97e3/FRKS/tr/basin-bulteni-strategy-turkiye-ozenbas-turkiyenin-karbonsuzlasma-hedefinde-kimya-sektoru-oncelikli/>

Fraunhofer, 2022. THE LIMITATIONS OF HYDROGEN BLENDING IN THE EUROPEAN GAS GRID.

https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/en/documents/Studies-Reports/FINAL_FraunhoferIEE_ShortStudy_H2_Blending_EU_ECF_Jan22.pdf

Gan, H., Sun, H., 2022. Methanol Sensor-Less Control Strategy for Direct Methanol Fuel Cell Startup.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.827763/full>

Genovese, M., Schlüter, A., Scionti, E., Piraino, F., Corigliano, O., Fragiaco, P., 2023. Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923003889>

Ghasem, N., 2022. A Review of the CFD Modeling of Hydrogen Production in Catalytic Steam Reforming Reactors.

<https://www.mdpi.com/1422-0067/23/24/16064>

glasstec, t.y. Decarbonisation in the Float Glass Industry.

https://www.glasstec-online.com/en/Media_News/Magazine/Stories/Decarbonisation_in_the_Float_Glass_Industry

Glass International, 2022. German Glass Industry: Results of hydrogen in glassmaking are ‘promising’.

<https://www.glass-international.com/news/german-glass-industry-results-of-hydrogen-in-glassmaking-are-promising>

global cement, 2022. Update on hydrogen injection in cement plants.

<https://www.globalcement.com/news/item/14637-update-on-hydrogen-injection-in-cement-plants>

Global Efficiency Intelligence, 2022. Steel Climate Impact.

<https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/624ebc5e1f5e2f3078c53a07/1649327229553/Steel+climate+impact-benchmarking+report+7April2022.pdf>

Global Maritime Forum, 2022. Ammonia as a shipping fuel.

<https://www.globalmaritimeforum.org/news/ammonia-as-a-shipping-fuel>

Gökalp, İ., Kıymaz, T. B., Böncü, E., Güleriyüz, D., Karaca, M., Yılmaz, B., Allouis, C., 2022.

Numerical investigations on flashback dynamics of premixed methane-hydrogen-air laminar flames.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922023874?via%3Dihub>

H2eart for Europe, 2024. The role of underground hydrogen storage in Europe.

https://h2eart.eu/wp-content/uploads/2024/01/H2eart-for-Europe_Report_Role-of-UHS-in-Europe.pdf

H2 energy news, 2023. Hydrogen-Powered Vessels Revolutionize the Marine Industry.

<https://energynews.biz/hydrogen-powered-vessels-revolutionize-the-marine-industry/>

H2 green steel, 2022. On course for large-scale production from 2025.

<https://www.h2greensteel.com/articles/on-course-for-large-scale-production-from-2025>

Hafsi, Z., Mishra, M., Elaoud, S., 2018. Hydrogen embrittlement of steel pipelines during transients.

https://www.researchgate.net/publication/330028247_Hydrogen_embrittlement_of_steel_pipelines_during_transients

Hanson Heidelberg Cement Group, 2021. World first net zero fuel trial success at Ribblesdale.

<https://www.hanson.co.uk/en/news-and-events/world-first-net-zero-fuel-trial-success-at-ribblesdale>

Hintco, t.y. Shaping the global energy transition.

<https://www.hintco.eu/>

Hornby, S., Brooks, G., 2021. Impact of Hydrogen DRI on EAF Steelmaking.

<https://www.midrex.com/tech-article/impact-of-hydrogen-dri-on-eaf-steelmaking/>

Hume, D., 2021. Ammonia as Maritime Fuel.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-08/9-nh3-maritime-fuel.pdf>

HYBRIT, t.y. A fossil-free future. Retrieved August 22, 2023, from

<https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-future/>

Hydro, t.y. This is Hydro.

<https://www.hydro.com/en/global/about-hydro/this-is-hydro/>

Hydro, t.y. World's first batch of recycled aluminium using hydrogen fueled production.

<https://www.hydro.com/en/media/news/2023/worlds-first-batch-of-recycled-aluminium-using-hydrogen-fueled-production/>

Hydrogen Europe, 2021. How Hydrogen Can Help Decarbonise the Maritime Sector.

https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/How-hydrogen-can-help-decarbonise-the-maritime-sector_final.pdf

Hydrogen Europe, 2022. Steel From Solar Energy: A Techno-Economic Assessment of Green Steel Manufacturing.

https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/06/Steel_from_Solar_Energy_Report_05-2022_DIGITAL.pdf

Hydrogen Insight, 2023. German gas operator says 20% hydrogen blending trial in 100 homes has been ‘100% trouble-free’ after six months.

<https://www.hydrogeninsight.com/innovation/german-gas-operator-says-20-hydrogen-blending-trial-in-100-homes-has-been-100-trouble-free-after-six-months/2-1-1455488>

Hydrogeninsight, 2023. India to offer green hydrogen production subsidy of up to \$0.60/kg – for three years only.

<https://www.hydrogeninsight.com/production/india-to-offer-green-hydrogen-production-subsidy-of-up-to-0-60-kg-for-three-years-only/2-1-1477425>

hydrom, t.y. About Hydrom.

<https://hydrom.om/Hyfindr>, t.y. Cryogenic Hydrogen Storage & Cryogenic Cooling. <https://hyfindr.com/cryogenic-hydrogen-storage-cryogenic-cooling/>

IDTechEx, 2023. Autothermal Reforming: A Promising Technology for Blue Hydrogen.

<https://www.idtechex.com/en/research-article/autothermal-reforming-a-promising-technology-for-blue-hydrogen/29044>

IEA, 2018. Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>

IEA, 2020. Iron and Steel Technology Roadmap.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf

IEA, 2021. Global Hydrogen Review 2021.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>

IEA, 2021. Green refinery hydrogen for Europe.

<https://www.iea.org/articles/green-refinery-hydrogen-for-europe>

IEA, 2022. Global Hydrogen Review 2022.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

IEA, 2022. Steel.

<https://www.iea.org/energy-system/industry/steel>

IEA, 2023. Aviation.

<https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>

IEA, 2023. Cement.

<https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>

IEA, 2023. Chemicals.

<https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>

IEA, 2023. Global Hydrogen Review 2023.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

IEA, 2023. International Shipping.

<https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping>

IEA, 2023. Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach 2023 Update.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf

IEA, 2023. Road transport.

<https://www.iea.org/reports/road-transport>

IEA, 2023. The Role of E-fuels in Decarbonising Transport.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e0c82d4-06d2-496b-9542-f184ba803645/TheRoleofE-fuelsinDecarbonisingTransport.pdf>

IEA, 2023. Transport.

<https://www.iea.org/energy-system/transport>

IEA, t.y. Carbon Capture, Utilisation and Storage.

<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>

IEEFA, 2022. The facts about steelmaking Steelmakers seeking Green steel.

<https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf>

Iglauer, S., Ali, M., Keshavarz, A., 2020. Geophysical Research letters.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL090814>

IIEEC, 2019. HYDROGEN FUEL CELL VEHICLES.

https://iieec.sabanciuniv.edu/sites/iieec.sabanciuniv.edu/files/2020-11/iieecenergyandclimatepaperhfvcdoganucok_0.pdf

IMO, n.d. Climate action.

<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/decarbonization%20of%20shipping.aspx#:~:text=Under%20a%20voyage%2Dbased%20allocation,business%2Das%2Dusual%20scenarios.>

International Journal of Biosensors & Bioelectronics, 2021. Hydrogen: State of the art and directions of future use.

<https://medcraveonline.com/IJBSBE/IJBSBE-07-00207.pdf>

IPM, 2023. TÜRKİYE ÇELİK SEKTÖRÜNÜN KARBONSUZLAŞMASI: MEVCUT DURUM.

<https://ipc.sabanciuniv.edu/Content/Images/CKeditorImages/20240129-14014245.pdf>

IRENA, 2019. RENEWABLE POWER-TO-HYDROGEN INNOVATION LANDSCAPE BRIEF.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Power-to-Hydrogen_Innovation_2019.pdf

IRENA, 2020. Green Hydrogen: A guide to Policy Making.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf?rev=c0cf115d8c724e4381343cc93e03e9e0

IRENA, 2020. GREEN HYDROGEN COST REDUCTION: SCALING UP ELECTROLYSERS TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf?rev=95b8c10569874148a44e1d17b301d263

IRENA, 2021. DECARBONISING END-USE SECTORS: PRACTICAL INSIGHTS ON GREEN HYDROGEN.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Coalition_Green_Hydrogen_2021.pdf?rev=ffd96aee97c4d029b01aa3a93131e8b

IRENA, 2021. INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf

IRENA, 2022. Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II - Technology review of hydrogen carriers.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf?rev=3d707c37462842ac89246f48add670ba

IRENA, 2022. Green Hydrogen for Industry: A Guide for Policy Making.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022_.pdf

IRENA, 2023. GREEN HYDROGEN FOR SUSTAINABLE INDUSTRIAL DEVELOPMENT: A POLICY TOOLKIT FOR DEVELOPING COUNTRIES.

https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Feb/IRENA_UNIDO_IDOS_Green_hydrogen_industrial_development_2024.pdf?rev=ff4fa04b12384be68ffad7ec712689bc

IRENA, 2024. Green hydrogen strategy: A guide to design.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Green_hydrogen_strategy_design_2024.pdf

IRENA, t.y. Hydrogen.

<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20combined%20with,new%20applications%20such%20as%20shipping.>

Izumi, Y., Iizuka, A., & Ho, H.-J., 2021. Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry. Journal of Cleaner Production.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621018369>

Kahn, M., Young, C., Layzell, D., 2021. The TechnoEconomics of Hydrogen Pipelines.

<https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2023/06/The-Techno-Economics-of-Hydrogen-Pipelines-v2.pdf>

- Kamps, A., Citters, C., Schut, C., 2021. Hydrogen for the ceramic industry.
<https://www.gasunie.nl/nieuws/publicatie-rapport-h2-voor-de-keramische-industrie>
- Katebah, M., Al-Rawashdeh, M., Linke, P., 2022. Analysis of hydrogen production costs in Steam-Methane Reforming considering integration with electrolysis and CO2 capture.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001574?via%3Dihub>
- kei, t.y. Ceramics industry.
<https://www.klimaschutz-industrie.de/en/topics/energy-intensive-industries/ceramics-industry/>
- Kiwa, 2012. Management Summary “Hydrogen blending with Natural Gas on Ameland”.
https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Waterstof_56_7c0ff368de.pdf
- Kokayeff, P., Zink, S., Roxas, P., 2014. Hydrotreating in Petroleum Processing.
https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-05545-9_4-1
- Koons, E., 2023. Ammonia Fuel: Advantages and Disadvantages.
<https://energytracker.asia/ammonia-fuel-advantages-and-disadvantages/>
- Kushnir, D., Hansen, T., Vogl, V., Ahman, M., 2020. Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619330550>
- Langmi, H., Engelbrecht, N., Modisha, P., Bessarabov, D., 2022. Chapter 13 – Hydrogen storage.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128194249000069?via%3Dihub>
- Li, H., Chen, J., 2023. An Analysis of Long-Process Ironmaking in a Reduction Smelting Furnace with Hydrogen-Enriched Conditions.
<https://www.mdpi.com/2075-4701/13/10/1756>
- Machaj, K., Kupecki, J., Malecha, Z., Morawski, A., Skrzypkiewicz, M., Stanlik, M., Chorowski, M., 2022. Ammonia as a potential marine fuel: A review.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22001201?via%3Dihub>
- Marine & Offshore, t.y. AN OVERVIEW OF AMMONIA AS FUEL FOR SHIPS.
<https://marine-offshore.bureauveritas.com/shipping-decarbonization/future-fuels/ammonia#:~:text=There%20are%20several%20advantages%20to,is%20widely%20and%20freely%20available.>
- MarketsandMarkets, t.y. Hydrogen Application in Glass Manufacturing Industry.
<https://www.marketsandmarkets.com/industry-practice/hydrogen/glass-manufacturing-industry#:~:text=Here%20are%20some%20of%20the,and%20limestone%20to%20produce%20glass.>
- Massaro, M., Biga, R., Kolisnichenko, A., Marocco, P., Monteverde, A., Santarelli, M., 2023. Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877532201374X?via%3Dihub>

McCay, M. H.; Shafiee, S., 2020. Hydrogen: An Energy Carrier. *Futur. Energy Improv. Sustain. Clean Options Our Planet*, 475-493.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00022-0>

Mckinsey & Company, 2020. Laying the foundation for zero-carbon cement.

<https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement>

Megia, P., Vizcaino, A., Calles, J., Carrero, A., 2021. Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review.

<https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>

Ministry of Oceans and Fisheries, 2023. Toward Green Shipping by 2050.

<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/NAP/R.O.K%20National%20Action%20Plan%20-%20Toward%20Green%20Shipping%20by%202050.pdf>

Miocic, J., Heinemann, N., Edlmann, K., Scafidi, J., Molaei, F., Alcalde, J. 2023. Underground hydrogen storage: a review.

<https://chooser.crossref.org/?doi=10.1144%2FSP528-2022-88>

Monroe Aerospace, 2019. Why Airplanes Use Kerosene Rather Than Plain Gasoline for Fuel.

<https://monroeaerospace.com/blog/why-airplanes-use-kerosene-rather-than-plain-gasoline-for-fuel/>

Nagar, R., Srivastava, S., Hudson, S., Amaya, S., Tanna, A., Sharma, M., Achayalingam, R., Sonkaria, S., Khare, V., Srinivasan, S., 2023. Recent developments in state-of-the-art hydrogen energy technologies – Review of hydrogen storage materials.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772940023000012#sec0005>

Najjar, Y., 2013. Hydrogen safety: The road toward green technology.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991301358X>

Nallapaneni, A., Malladi, K., 2021. Green Hydrogen through Electrolysis: Fuelling the Future.

<https://wri-india.org/blog/green-hydrogen-through-electrolysis-fuelling-future>

NBM&CW, 2023. Challenges in usage of Hydrogen in Cement Industry.

<https://www.nbmcw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/concrete-admixtures/challenges-in-usage-of-hydrogen-in-cement-industry.html>

New Energy Coalition, t.y. Hydrogen Valley.

<https://www.newenergycoalition.org/en/hydrogen-valley/>

Office of Clean Energy Demonstrations, t.y. Regional Clean Hydrogen Hubs.

<https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, t.y. Fuel Cells.

<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells#:~:text=A%20fuel%2C%20such%20as%20hydrogen,creating%20a%20flow%20of%20electricity.>

Offshore Technology, 2023. TotalEnergies agrees deal to use green hydrogen in oil refinery.
<https://www.offshore-technology.com/news/totalenergies-leuna-green-hydrogen-vng/>

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

Petrochemicals Europe, 2021. OVERVIEW PAPER.
https://www.petrochemistry.eu/wp-content/uploads/2021/03/Petrochemicals_Paper_hydrogen-1.pdf

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

PIN, 2023. Increased production of green hydrogen could be essential for scalability of zero-carbon fertilizer.
<https://www.petro-online.com/news/hydrogen-fuel/181/international-environmental-technology/how-scaling-up-green-hydrogenwill-be-essential-forthe-future-of-zero-carbon-fertiliser/61513#:~:text=The%20role%20of%20green%20hydrogen,drastically%20reduce%20its%20carbon%20footprint.>

Plug, 2022. From Grey to Green: How Refineries Can Turn to Plug for a Green Transition.
<https://www.plugpower.com/from-grey-to-green/>

PowerCell Group, 2024. PowerCell signs SEK 165m order for fuel cell systems with leading Italian marine OEM manufacturer.
<https://powercellgroup.com/press-releases/powercell-signs-sek-165m-order-for-fuel-cell-systems-with-leading-italian-marine-oem-manufacturer/>

Prasad, R., 2009. Efficient fertilizer use: The key to food security and better environment.
<https://jtropag.kau.in/index.php/ojs2/article/view/198/198>

Precedence Research, 2022. Glass Manufacturing Market.
<https://www.precedenceresearch.com/glass-manufacturing-market#:~:text=The%20glass%20manufacturing%20market%20size,forecast%20period%202023%20to%202032.>

pwc, t.y. Yeşil hidrojen ekonomisi için yol ayrımının eşiğinde, Türkiye’nin attığı umut verici adımlar.
<https://www.strategyand.pwc.com/tr/tr/pdf/yesil-hidrojen-ekonomisi-icin-yol-ayriminin-esiginde-turkiyenin-attigi-umut-verici-adimlar.pdf>

Ramirez, C. X., Torres, J. E., Perez-Martinez, D. de J., Kafarov, V., Guzman, A., 2016. Hydrocracking Reaction Model of Petroleum Heavy Cuts Using Molecular Reconstruction.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444634283503830>

RECHARGE, 2022. Blow for green glass.
<https://www.rechargenews.com/energy-transition/blow-for-green-glass-hydrogen-reduces-product-quality-when-replacing-natural-gas-pilot-finds/2-1-1216468>

RECHARGE, 2022. Why the Netherlands' planned hydrogen network will be difficult to replicate in other countries.

<https://www.rechargenews.com/energy-transition/why-the-netherlands-planned-hydrogen-network-will-be-difficult-to-replicate-in-other-countries/2-1-1253792>

REFHYNE, 2018. REFHYNE Project - 10 MW Electrolyser Rhineland Refinery.

<https://refhyne.eu/wp-content/uploads/2020/06/REFHYNE-project-overview-Sep18.pdf>

Renault Group, 2022. Sustainable development at the heart of the Renault Scenic Vision concept car.

<https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/sustainable-development-at-the-heart-of-the-renault-scenic-vision-concept-car/>

Renault Group, 2023. All there is to know about hydrogen fuel cells.

<https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/all-there-is-to-know-about-hydrogen-fuel-cells/>

Republic of Türkiye Ministry of Trade, 2023. Chemical Sector.

<https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Kimya%20Sekt%C3%B6r%C3%BC%2012042023.pdf>

REUTERS, 2021. Dutch airline KLM says operated first flight with synthetic kerosene.

<https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/dutch-airline-klm-says-operated-first-flight-with-synthetic-kerosene-2021-02-08/>

Rezakazemi, M., Zhang, Z., 2018. 2.29 Desulfurization Materials.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128095973002637>

RFF, 2020. Green Public Procurement for Natural Gas, Cement, and Steel.

https://media.rff.org/documents/RFF_WP_20-17_Green_Public_Procurement_for_Natural_Gas_Cement_and_Steel.pdf

Roland Berger, 2021. Hydrogen Fuel Power Generation.

<https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/The-role-of-hydrogen-as-fuel-for-power-generation.html>

Safety4Sea, 2023. Benefits and drawbacks of emerging fuels for shipping.

<https://safety4sea.com/benefits-and-drawbacks-of-emerging-fuels-for-shipping/>

Saygin, D., Gielen, D., 2021. Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector.

<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3772>

SFC Energy, 2024. Fuel cell efficiency.

<https://www.sfc.com/glossary/fuel-cell-efficiency/>

SHURA, 2021. Techno-economic study of Turkey's production and export potential for green hydrogen.

<https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2021/12/SHURA-2021-12-Techno-Economic-Study-of-Turkeys-Production.pdf>

SHURA, 2021. Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları.
https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2021/03/Turkiyenin_ulusal_hidrojen_stratejisi_icin_onceelik_alanlari.pdf

SHURA, 2022. SHURASTAT 30.
<https://shura.org.tr/en/shurastat-issue-30-2/>

SHURA, 2023. Net Zero 2053: A Roadmap for the Turkish Electricity Sector.
<https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/05/Net-Zero-EN.pdf>

SHURA, 2023. Türkiye'de Konut ve Sanayi Sektörünün Elektrifikasyonu.
<https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2023/09/SHURA-2023-08-Rapor-Elektrifikasyon.pdf>

SHURA, 2024. SHURASTAT 40.
<https://shura.org.tr/shurastat-40-sayi/>

Simple Flying, 2022. What Are The Major Challenges Of Hydrogen-Powered Aircraft?.
<https://simpleflying.com/hydrogen-powered-aircraft-major-challenges/>

Smart Delta Resources, 2021. Ørsted and Yara develop project for green ammonia production.
<https://www.smartdeltaresources.com/en/orsted-and-yara-develop-project-green-ammonia-production-0>

Spreitzer, D., & Schenk, J., 2019. Reduction of iron oxides with hydrogen—a review. steel research international, 90(10), 1900108.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/srin.201900108>

SSAB, t.y. Time line for fossil-free steel production.
<https://www.ssab.com/en/company/sustainability/first-in-fossil-free-steel/timeline>

Statista, 2023. Glass industry worldwide – statistics & facts.
<https://www.statista.com/topics/4108/glass/#topicOverview>

Surgenor, C., 2021. With Lufthansa backing, Atmosfair opens world's first e-kerosene production plant in Germany.
<https://www.greenairnews.com/?p=1803#:~:text=The%20world%27s%20first%20power-to,by%20climate%20protection%20organisation%20atmosfair.>

ŞAN, S., KARAKILÇIK, M., 2021. TUZ DOMLARINDA HİDROJEN DEPOLAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ.
<https://fbe.cu.edu.tr/storage/makaleler/2021/TUZ%20DOMLARINDA%20H%C4%B0DROJEN.pdf>

Şişecam, 2022. Sürdürülebilirlik Raporu 2022.
<https://www.sisecam.com.tr/sites/catalogs/tr/Documents/sustainability/sisecamsurdurulebilirlik2022.pdf>

Şişecam, t.y. 2022 faaliyet raporu.
<https://www.sisecam.com.tr/tr/yatirimci-iliskileri/sunumlar-ve-raporlar/yillik-faaliyet-raporlari/dijital-faaliyet-raporu/2022/index.html#giris/1>

T.C. ÇŞİDB, 2023. Ulaştırma Türüne Göre Seragazi Emisyonu.

<https://cevresehgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K'in%202021%20y%C4%B1l%C4%B1%20seragaz%C4%B1,ise%20di%C4%9Fer%20ula%C5%9Ft%C4%B1rma%20t%C3%BCrlerinden%20kaynaklanmaktad%C4%B1r.>

T.C. Dışışleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı, 2023. ReFuelEU Havacılık Girişimi: AB Konseyi, Havacılık Sektörünün Karbonsuzlaştırılmasına Yönelik Yeni Tüzüğü Kabul Etti https://www.ab.gov.tr/refueleu-havacilik-girisimi-ab-konseyi-havacilik-sektorunun-karbonsuzlastirilmasina-yonelik-yeni-tuzugu-kabul-etti_53623.html

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021. Seramik Sektörü Raporu (2021).

<https://ramazaninan.com.tr/osto/SeramikSektorRaporu-2021.pdf>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022. Cam Sektör Raporu.

<https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sektor-raporlari/mu2812011402>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022. Çimento Sektör Raporu 2021.

<https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sektor-raporlari/mu0102011404>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022. TÜRKİYE İÇİN ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ ALTYAPISI.

<https://sarjdestek.sanayi.gov.tr/turkiye-icin-elektrikli-arac-sarj-altyapisi#:~:text=Literat%C3%BCrdeki%20genel%20kabuller%20ve%20%C3%BClke,say%C4%B1%20160%20bin%20olarak%20belirlenmi%C5%9Ftir.>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023. Türkiye Çelik Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası.

<https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-celik-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023. Türkiye’nin hidrojen vadisi.

<https://www.sanayi.gov.tr/medya/haber/turkiyenin-hidrojen-vadisi>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024. Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası.

<https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-cimento-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024. Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası.

<https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-cimento-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024. Türkiye Gübre Sektörü için Düşük Karbonlu ve İklim Dirençli Yol Haritası.

<https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/birimler/turkiye-gubre-sektoru-icin-dusuk-karbonlu-yol-haritasi.pdf>

T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024. Avrupa Komisyonu, Avrupa Hidrojen Bankası nezdinde gerçekleştirilen rekabetçi ihale süreciyle yenilenebilir hidrojen projelerine destek vermiştir <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/duyurular/avrupa-komisyonu-avrupa-hidrojen-bankasi-nezdinde-gerceklestirilen-rekabetci-ihale-sureciyle-yenilenebilir-hidrojen-projelerine-destek-vermistir>

Tang, D., Tan, G., Li, G., Liang, J., Ahmad, S., Bahadur, A., Humayun, M., Ullah, H., Khan, A., Bououdina, M., 2023. State-of-the-art hydrogen generation techniques and storage methods: A critical review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X23005935#s0065>

Tawalbeh, M., Alarab, S., Al-Othman, A., Javed, R., 2022. The Operating Parameters, Structural Composition, and Fuel Sustainability Aspects of PEM Fuel Cells: A Mini Review. <https://www.mdpi.com/2673-3994/3/3/28>

TÇÜD, t.y. Çelik haritası. <https://celik.org.tr/harita/>

TEMSA, 2023. TEMSA VE CAETANOBUS TÜRKİYE'NİN İLK ŞEHİRLER ARASI HİDROJENLİ OTOBÜSÜNÜ 2024'TE BANTTAN İNDİRECEK. <https://www.temsa.com/tr/tr/haberler/temsa-ve-caetanobus-turkiye-nin-ilk-sehirler-arasi-hidrojenli-otobusunu-2024-te-banttandan-indirecek--d8LtbNoklzO>

Thakkar, N., Paliwal, P., 2022. Hydrogen storage based micro-grid: A comprehensive review on technology, energy management and planning techniques. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2022.2049797>

The Chemical Engineer, 2022. Energy: Using Hydrogen for Glass. <https://www.thechemicalengineer.com/features/energy-using-hydrogen-for-glass/>

The European Files, 2021. Clean Hydrogen as A Major Enabler for Making Carbon-Free Ammonia and Fertilizers. <https://www.europeanfiles.eu/climate/clean-hydrogen-as-a-major-enabler-for-making-carbon-free-ammonia-and-fertilizers>

The ICCT, 2024. Understanding the proposed guidance for the Inflation Reduction Act's Section 45V Clean Hydrogen Production Tax Credit. <https://theicct.org/publication/proposed-guidance-for-the-inflation-reduction-act-45v-clean-hydrogen-tax-credit-mar29/>

The Royal Society, 2020. Ammonia : zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>

Topsoe, 2024. FLIGHT PLAN GREEN: TECHNOLOGY ROUTES. <https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel-technology>

TRT Haber, 2023. Doğal gaz keşfinin görünmeyen yüzü: Gübre üretimi de artacak. <https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/dogal-gaz-kesfinin-gorunmeyen-yuzu-gubre-uretimi-de-artacak-736729.html#:~:text=Do%C4%9Fal%20gaz%2C%20azotlu%20g%C3%BCbrenin%20hammaddesi,g%C3%BCbrenin%20hammaddesi%20olarak%20%C3%A7ok%20%C3%B6nemli.>

UNCTAD, 2023. Review of Maritime Transport 2023.

<https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>

UNECE, 2022. COP27: UN report shows pathways to carbon-neutrality in “energy intensive” steel, chemicals and cement industries.

<https://unece.org/media/press/372890>

Universal Hydrogen, t.y. Fueling Carbon-Free Flight.

<https://hydrogen.aero/>

Verstraete, D., 2009. The Potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion.

<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/items/dc023873-db96-4dd6-882b-835ea7cbf3d0>

Washing, E., Pulugurtha, S., 2015. Well-to-Wheel Analysis of Electric and Hydrogen Light Rail.

<https://digitalcommons.usf.edu/jpt/vol18/iss2/6/>

World Fertilizer Magazine, 2023. PepsiCo and Fertiberia launch programme to produce fertilizer from green hydrogen.

<https://www.worldfertilizer.com/project-news/07072023/pepsico-and-fertiberia-launch-programme-to-produce-fertilizer-from-green-hydrogen/>

World Resources Institute, 2024. Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector.

<https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

Zakaria, Z., Kamarudin, S., 2021. A review of alkaline solid polymer membrane in the application of AEM electrolyzer: Materials and characterization.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.6983>

Zeroavia, 2024. Our Mission: A Hydrogen-Electric Engine in Every Aircraft.

<https://zeroavia.com/about-us/#:~:text=Our%20Mission%3A%20A%20Hydrogen%2DElectric%20Engine%20in%20Every%20Aircraft&text=Focused%20on%20hydrogen%2DElectric%20propulsion,80%20seat%20aircraft%20by%202027.>

Zhou, Y., Searle, S., Pavlenko, N., 2022. Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe.

<https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/02/fuels-us-europe-current-future-cost-ekerosene-us-europe-mar22.pdf>

Ekler

Ek 1 - Hidrojenin son kullanım sektörlerindeki rolü

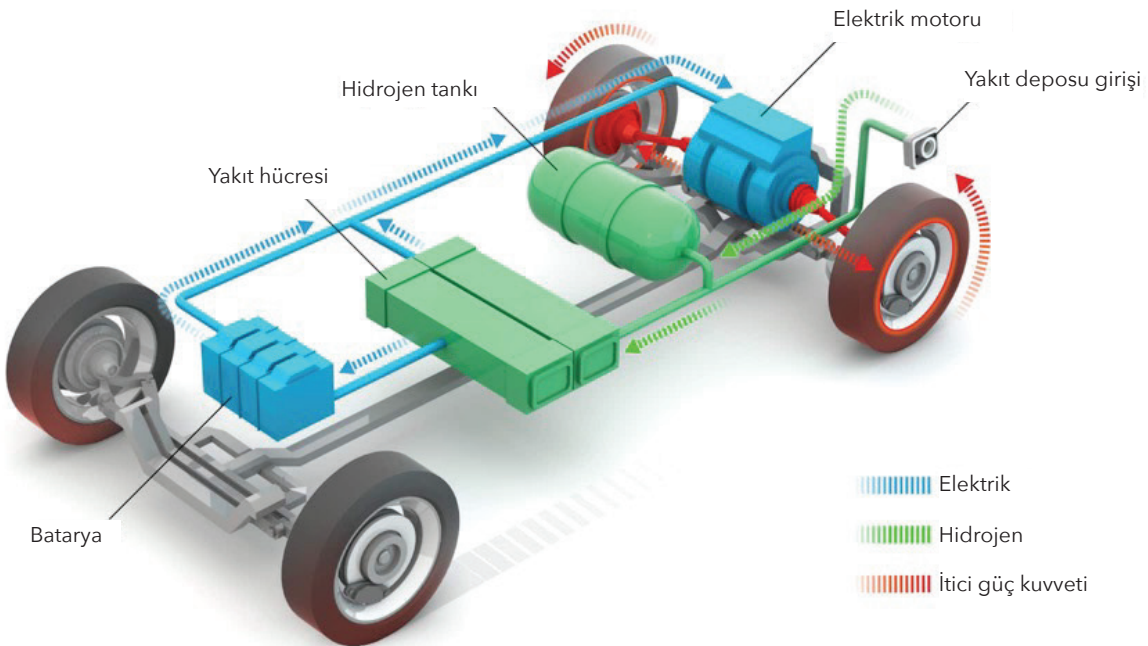
Ek 1-1 Ulaşım sektörü

Ek 1-1-1 Binek araçlar (Otomotiv)

Hidrojen, yakıt hücresi elektrikli araçlarda (Fuel cell electric vehicles - FCEV) yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojenli FCEV'ler, bataryalardan elektrik çekmek yerine, yakıt hücresi kompartmanında hidrojen ile oksijen arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonla elektrik üretirler.

Yakıt hücresi kompartmanında, hidrojen bir polimer membrandan geçerek havadan gelen oksijen ile birleşir ve anottaki bir katalizör ile hidrojen moleküllerinin proton ve elektronlara ayrıştırılması sağlanır. Protonlar membrandan geçerken, elektronlar dış bir devreden geçerek bir elektrik akımı üretir ve bu akım tekerlekleri döndürür (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, t.y.). Şekil 73, yakıt hücresi araçların çalışma prensibini göstermektedir. Yan ürün olarak oluşan su buharı, küçük bir tüp aracılığıyla araç altından gaz halinde serbest bırakılır. FCEV'lerde yaygın olarak kullanılan teknoloji, 1 kilovat (kW) ile 100 kW aralığında güç sağlayan polimer elektrolit membran yakıt hücreleridir⁴² (Tawalbeh ve diğerleri, 2022; Gan & Sun, 2022). Üretilen enerji ve bataryada depolanan enerji, aracın elektrik motorunu çalıştırır. Sonuç olarak, araç sessiz bir şekilde ve sera gazı emisyonu yaratmadan çalışabilir.

Şekil 73. Yakıt hücresi araçların çalışma prensibi şeması



Kaynak: BMW (2013)

⁴² Polymer electrolyte membrane fuel cells, PEMFC.

2021 yılında dünya genelinde FCEV sayısı 2020 yılına kıyasla %55 artarak 51.000 seviyesine ulaşmıştır. 2022 yılının Haziran ayı itibarıyla, küresel FCEV stoğu 59.000 araçtan daha fazladır. 2022 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) 1.800’ün üzerinde FCEV kaydı yapılırken, Güney Kore’de FCEV satışları 4.900 adeti geçmiştir (IEA, 2022). Teknolojinin ilerlemesi ve altyapının geliştirilmesiyle FCEV pazarının otomotiv sanayinde daha yaygın olacağı öngörülmektedir.

Mevcut durumda binek araçlarda hidrojen kullanımının zorluklardan biri hidrojenin araç içinde depolanmasıdır. Hidrojen iki ana formda yani, metal hidrürleri veya kriyojenik sıvı formunda sıkıştırılmış gaz olarak depolanabilir. Sıkıştırılmış gaz tanklarının kullanımı hidrojenin 450 bar ile sıkışmasını sağlasa da, yüksek hacimli depolama alanlarına ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda, bir kilogram (kg) saf hidrojen depolamak için yaklaşık 40-50 litre hacimli depolama alanı gerekmektedir. Araç üzerinde depolanan yakıt miktarı ise, yakıt verimliliği ve aracın dizayn edileceği menzil gibi faktörlere bağlıdır (Fakhreddine ve diğerleri, 2023).

Bunlara ek olarak, hidrojen yakıcı ve patlayıcı bir gaz olması nedeniyle yol taşımacılığında dikkatli bir şekilde ve sıkı güvenlik önlemleri çerçevesinde kullanılmalıdır. Kuzey İrlanda’daki Ulster Üniversitesi, araçlarda hidrojenin güvenli kullanımına ilişkin araştırmalar yürütmekte olup ve bu çalışmalarda değerlendirilen Honda Clarity aracının 171 litrelik silindirik tankında depolanan 350-bar sıkıştırılmış hidrojenin patlaması sırasında açığa çıkan mekanik enerjinin, 3 kg TNT patlayıcı ile benzer kuvvette olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, hidrojenle çalışan araçlar güvenlik açısından, fosil yakıtla çalışan araçlara kıyasla daha yüksek riskler taşımaktadır (International Journal of Biosensors & Bioelectronics, 2021).

Ek 1-1-2 Otobüs

Hidrojenle çalışan otobüsler, geleneksel içten yanmalı motor (Internal combustion engine, ICE) otobüslere kıyasla daha temiz ve sürdürülebilir bir alternatif olarak popülerlik kazanmaktadır. Küresel hidrojenli otobüs pazarı büyüklüğü 2018’deki 311,8 milyon ABD\$ seviyesinden 2022’de 641,1 milyon ABD\$ seviyesine ulaşmıştır. 2021 yılında, otobüs sektörünün hidrojen talebi, ulaşım sektöründeki toplam talebin %45’ini oluşturmuştur (fmi, 2022). Future Market Insights (2022) yakıt hücreli otobüs endüstrisinin 2023 yılı itibarıyla 8,5 milyar ABD\$ değerinde olacağını ve 2033 yılına kadar %67’lik bir artışla 14,3 milyar ABD\$ büyüklüğe ulaşacağını tahmin etmektedir.

Ek 1-1-3 Ağır yük taşımacılığı

Hidrojenle çalışan kamyonlar, geleneksel dizel yakıtlı kamyonlara göre daha temiz ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır (IEA, 2023). Hidrojen kullanan kamyonlara entegre edilen elektrik sistemler, yüksek verimlilik ve düşük emisyon sağlayarak daha sürdürülebilir bir sektörün oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Elektrik bataryalı kamyonlarla karşılaştırıldığında, hidrojen kullanan kamyonlar daha hızlı yakıt ikmali ve daha uzun sürüş menzili gibi avantajlara sahiptir (IEA, 2023). Verimlilik açısından, hidrojenle çalışan bir kamyonun toplam verimliliği, hidrojenin üretiminden aracın ilk hareketine kadar olan tüm enerji geçişlerini dikkate alan

“yakıttan tekerleğe” (well-to-wheel) verimlilik hesaplamasıyla ölçülebilir. Yakıttan tekerleğe verimliliği, hidrojen üretimi, taşınması ve yakıt hücresi tarafından elektrığe dönüştürülmesi ile tekerin dönüşünün sağlandığı prosesin verimliliğini içermektedir (Washing & Pulugurtha, 2015). Hidrojen yakıt hücreli sistemler, %45 ila %60 “well-to-wheel” verimliliğine sahiptirler (Dash ve diğerleri, 2022). Hidrojen, yenilenebilir veya düşük karbonlu kaynaklardan üretildiğinde araç verimliliği, içten yanmalı motorlara oranla daha yüksek olabilir.

Bu avantajlarıyla birlikte hidrojen kullanan kamyonların yaygınlaştırılması, hidrojen üretimi, depolanması ve yakıt ikmali istasyonlarının kurulmasını içeren güçlü bir yakıt ikmali altyapısının geliştirilmesine bağlı olacaktır.

Ek 1-1-4 Tren

Hidrojen yakıt hücreli trenler, doğrudan elektrifikasyonun yetmediği uzun mesafe güzergahlarında çalışan trenlerin karbondan arındırılmasında önemli bir rol oynayabilir. Hidrojen yakıt hücreli trenler, yalnızca bataryayla çalışan trenlere kıyasla oldukça uzun bir menzile sahiptir ve tek bir depo ile yaklaşık 1.000 km yol katedebilirler. Bu bağlamda, trenlerde hidrojen kullanımının yüksek bir potansiyeli olmasına rağmen, 2021 yılında trenlerde hidrojen kullanımı 0,1 kiloton’un (kt) altında kalmıştır (IEA, 2022).

Alstom tarafından geliştirilen Coradia iLint, dünyanın ilk seri üretim hidrojen yakıt hücreli treni olarak öne çıkmaktadır (Alstom, 2021). 2018 ile 2020 yılları arasında bu trenlerin iki ön serisi, Almanya’da düzenli yolcu hizmetinde kullanılmış ve toplamda 180.000 km mesafe yol kat edilmiştir. Temmuz 2018 tarihinde hidrojenle çalışan trenler, Hamburg’un batısında bulunan Bremervörde üzerinden geçerek Cuxhaven’dan Buxtehude’ye bölgesel demiryolu hattında işletmeye alınmıştır. Almanya, Ağustos 2022 tarihinde ise 14 tane yakıt hücreli trenden oluşan bir tren filosu da oluşturmuştur (IEA, 2022).

Pazar araştırmaları, küresel hidrojen yakıt hücreli tren pazarının 2025 yılına kadar 2,7 milyar ABD\$ değerine ulaşacağını ve 2035 yılına kadar 26,4 milyar ABD\$ büyüyeceğini öngörmektedir (Allied Market Research, 2022).

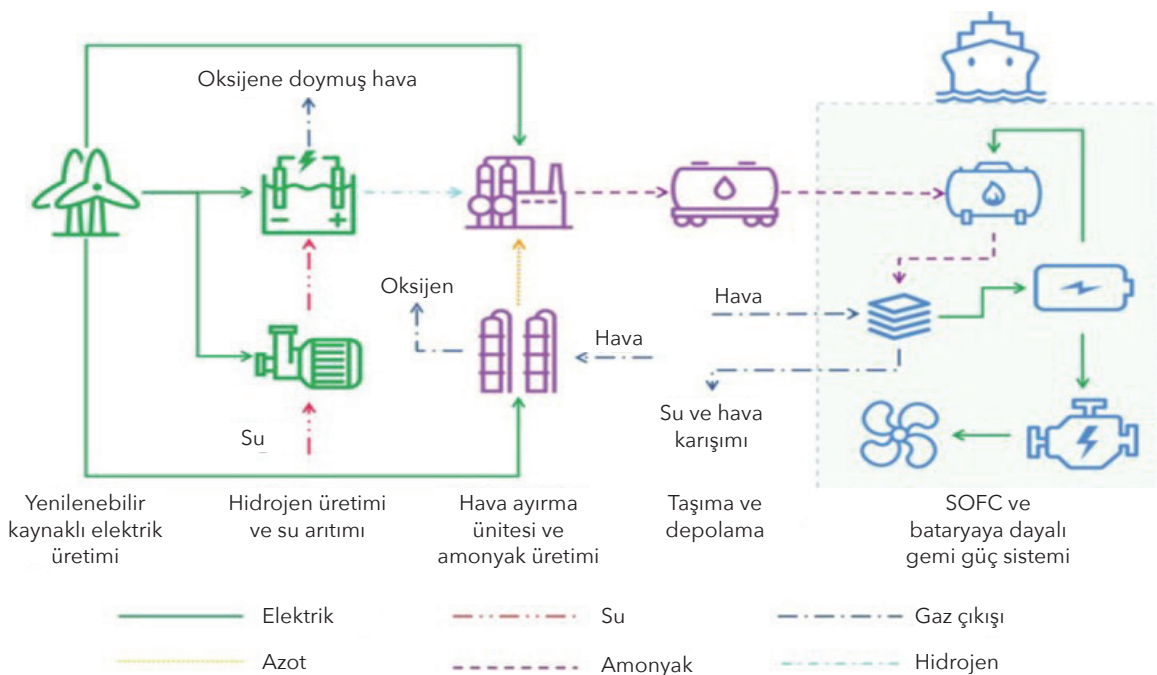
Ek 1-1-5 Denizyolu taşımacılığı

Hidrojen, azot (N) ile birleştğinde yeşil amonyak (NH_3) üretimini, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen karbon ile birleştğinde ise metanol (CH_3OH) üretimini sağlamaktadır. Bu nedenle hidrojen, sentetik yakıt olarak deniz ve hava yolu taşımacılığı sektörlerinde kullanılabilir. Amonyak, denizcilik endüstrisi tarafından tercih edilen önemli bir hidrojen türevidir (Dimitriou & Javaid, 2020). Amonyak, metanol ile benzer enerji yoğunluğuna sahiptir ve ihtiva ettiği yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle uzun mesafeli taşımacılık için ideal bir alternatif yakıttır. Yenilenebilir (yeşil) hidrojen Haber-Bosch işlemiyle yeşil amonyağa dönüştürülebilmektedir. Ayrıca yeşil amonyak üretimi, metanol veya e-metanol üretimine kıyasla daha az enerji gerektirmektedir (Global Maritime Forum, 2022). Bu bağlamda amonyak, düşük emisyonlu alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında daha maliyet etkin olmaktadır (EMSA, 2023). Bunlarla

birlikte, mevcut amonyak üretim altyapısı ve limanlarda amonyak depolama ve iletim hatlarının ölçeklenebilirliği, amonyağın deniz yolu taşımacılığı yakıtı olarak kullanımını hızlandıracığı da değerlendirilmektedir (Marine & Offshore, t.y.). Amonyak, diğer gemi yakıtlarının yaklaşık yarısı kadar enerji yoğunluğuna sahiptir ve -33°C 'de sıvı form alır. Dolayısıyla amonyağın, yüksek basınçlı veya kriyojenik tanklarda depolanmasına ihtiyaç yoktur. Bununla birlikte amonyak, son derece toksik bir yakıt olup, rahatsız edici bir kokuya sahip olmasından ötürü bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Global Maritime Forum, 2022). Ayrıca amonyak; bakır, pirinç, çinko, çeşitli alaşım ve bazı metaller için koroziftir (Safety4Sea, 2023). Bununla birlikte amonyağın düşük hacimsel verimliliği ve enerji yoğunluğu nedeniyle, gemi üzerinde büyük bir depolama alanına da ihtiyaç vardır. Gemi boyutları da gerekli yakıt depolama alanını karşılamak için büyümektedir.

Amonyak hızla buharlaşan ve ısınma nedeniyle kaynar gaz üreten bir yapıya sahip olduğundan eğer soğutularak depolanacaksa, depolama tanklarının sıcaklık ve/veya basıncı düzenleyecek şekilde tasarlanması da gerekmektedir. Amonyağı düşük sıcaklıklarda depolamak için de ilave enerjiye ihtiyaç olacaktır (Hume, 2021). Bununla birlikte, amonyak bileşiğinde metanolden farklı olarak karbon elementi içermediğinden, karbon salımı da yaratmamaktadır (Global Maritime Forum, 2022). Amonyak her ne kadar yanma sırasında karbon salımı yapmasa da, içten yanmalı motorlarda kullanıldığı zaman azot oksit (NO_x) üretebilir (Koons, 2023).

Bahsedilen bu zorluklara rağmen, amonyağın deniz ulaşımında en verimli ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasına yönelik Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Mevcut çalışmalara göre, yeşil amonyağın gemi taşımacılığında verimliliği yaklaşık %18 seviyesindedir (Machaj ve diğerleri, 2022). Bunlarla birlikte araştırmaların güvenlik, gemi tasarımı ve yakıt ikmalini önceliklendirecek şekilde yürütülmesi çok yönlü faydalar sağlayacaktır.



Kaynak: Machaj ve diğerleri (2022)

Metanol ise deniz yolu taşımacılığında halihazırda kullanılan bir teknolojidir. Metanolün mevcut gemi motorlarıyla uyumluluğu, bu sektörün emisyonlarını azaltmada kullanılabilecek ve kısa dönemde uygulanabilecek bir strateji yaratmaktadır (IEA, 2022).

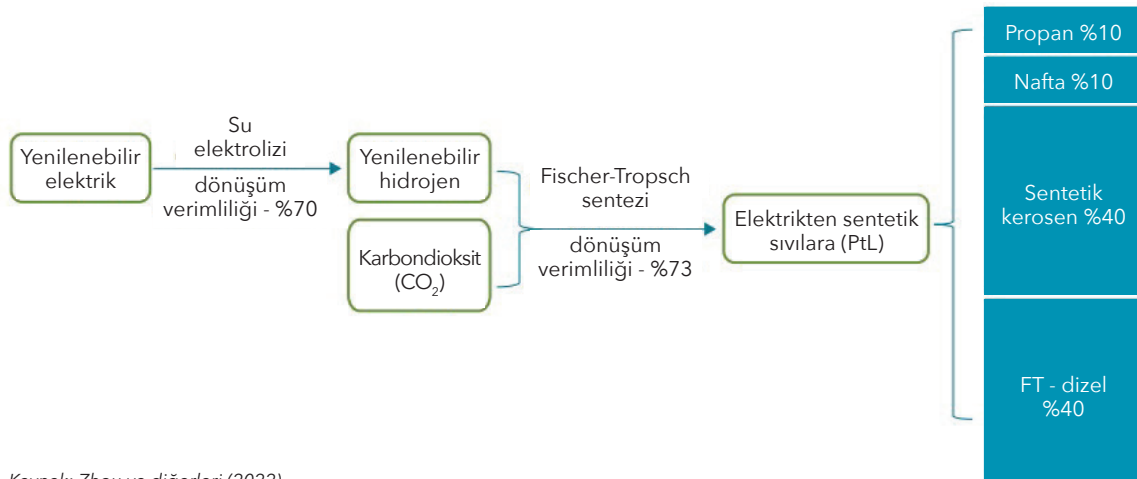
Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), 2050 yılına kadar deniz taşımacılığı emisyonlarını en az %50 oranında azaltmayı hedeflediğinden, yenilenebilir hidrojen ve türevlerinin bu sektöre entegrasyonunun hızlanması beklenmektedir (Eljack ve Kazi, 2021). Bu bağlamda, Japonya, ABD ve Avrupa Birliği üyesi ülkeler, hidrojenin denizcilik endüstrisine entegrasyonu için çeşitli girişimlerde bulunmaktadır. Nisan 2022 tarihinde IMO, gemilerde yakıt hücresi güç sistemlerinin güvenli kullanımı için yönergeler hazırlamıştır. Bu bağlamda, genel olarak sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) için tasarlanmış olan Uluslararası Güvenlik Kodu (IGF Kodu), hidrojenin yakıt depolama ve yakıt hücrelerine tedariki için de uygulanabilir olduğu değerlendirilmektedir. Ancak, hidrojen için özel olarak hazırlanmış yönergelerin oluşturulması ve uygulanması elzemdir (IEA, 2022).

Ek 1-1-6 Havayolu taşımacılığı

Avrupa Birliği (AB) Konseyi Ekim 2023 tarihinde, 2030 hedefleri kapsamında havacılık sektörünün karbonsuzlaşması için fosil yakıt kaynaklı üretilen yakıtlar yerine, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının üretimini konu alan ReFuelEU Havacılık girişimini kabul edilmiştir. Tüzük, yakıt tedarikçilerinin kullandıkları uçak yakıtlarını belirli oranlarda mevcut durumda kullanılan Jet A1 yakıtlarını sürdürülebilir yakıtlarla karıştırmalarını şart koşmaktadır. Bu bağlamda, AB havalimanlarındaki uçak yakıtlarının 2025’te %2, 2030’da %6 ve 2050’de %70 oranında sürdürülebilir havacılık yakıtı içermesi gerekmektedir. 2030 yılından itibaren yakıtların %1,2’sinin, 2050 yılından itibaren ise %35 de sentetik yakıtlar olması gerekecektir (T.C. Dışişleri Bakanlığı Avrupa Birliği Başkanlığı, 2023).

Havayolu taşımacılığı sektöründe yenilenebilir hidrojen kullanılarak üretilen sentetik kerosenin yaygınlaşması önemli bir strateji olacaktır. Sentetik kerosen, atmosferdeki karbonun doğrudan hava yakalama (DAC) yöntemiyle elde edilip, yenilenebilir hidrojen ile birleştirildiği power-to-liquid (PtL) teknolojisi kullanılarak üretilmektedir (Şekil 75).

Şekil 75. Yenilenebilir hidrojen ve atmosferik karbondioksitten sentetik kerosen üretimi



Kaynak: Zhou ve diğerleri (2022)

emisyonu sağlanmakla birlikte, bu yakıtın düşük bir donma noktasına sahip olması ve benzinden daha yüksek sıcaklıkta alev alması nedeniyle oldukça avantajlıdır (Monroe Aerospace, 2019). Sentetik kerosen üreten ilk PtL tesisi, 2021 yılında Almanya’nın Emsland bölgesinde faaliyete geçmiştir. Bu tesis, Atmosfair adlı bir iklim koruma organizasyonu tarafından işletilmektedir (Surgenor, 2021).

Havacılık sektöründe sıvı hidrojen talebi artmaktadır. Bunun nedeni, hidrojenin sıvı formunun, kg başına yaklaşık 2,5 kat daha fazla enerji ihtiva etmesidir. Sıvı hidrojenin hacimsel yoğunluğu, kerosenin hacimsel yoğunluğundan daha düşüktür (Najjar, Y., 2013). Uçaklar daha düşük kütlede yakıt gerektirse de, bu yakıtın kaplayacağı alan kerosene göre yaklaşık 4 kat daha büyüktür (Verstraete, D., 2009). Bu durum, uçak tasarımcıları için zorluk teşkil etmektedir ve geleneksel uçak gövdesi tasarımlarında önemli değişiklikler yapılmasını gerektirmektedir.

Hidrojen altyapısı oluşturulması için kullanım alanlarına yakın sıvılaştırma tesisleri ile boru hatlarının birlikte tasarlanması ve kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, hidrojenle çalışan uçakların verimli ve sağlıklı bir şekilde yakıt ikmali yapabilmesi için yüksek akış hızına sahip sıvı yakıt doldurma sistemlerine ihtiyaç vardır. Hidrojen, doğal gazla göre çok daha yüksek yanma hızına sahiptir ve kontrollü bir yanma sürecinden geçmesi gerekmektedir. Airbus, hidrojenin çeşitli uygulamalarını araştıran ZEROe projesinde hidrojeni “yakıt” olarak kullanmayı önermektedir. Bu senaryoda, hidrojenin daha geniş tutuşabilirlik aralığı ve daha yüksek yanma hızını incelemek için aktif yanma kontrolü uygulamalarını da içermektedir (Simple Flying, 2022). Bu zorlukların üstesinden gelinmesi, hidrojenin yakıt olarak havacılık sektöründe daha fazla kullanılmasında önemli bir rol oynayacaktır (Massaro ve diğerleri, 2023).

Ek 1-2 Endüstriyel süreçler

Ek 1-2-1 Petrol rafinerileri ve petrokimyasallar

Petrol rafinerileri ve petrokimya sektörlerinde hidrojen, yüksek kaliteli petrol ürünlerinin üretimi ve kükürt içeriğinin azaltılması gibi önemli süreçlerde kritik bir rol oynamaktadır. ‘Hydrocracking’, ‘hydrotreating’ ve desülfürizasyon, bu süreçlerin başlıca örneklerindendir.

‘Hydrocracking’, ağır hidrokarbon moleküllerini daha hafif ve değerli ürünlere, örneğin benzin ve dizel yakıtına dönüştürme işlemidir (Ramirez ve diğerleri, 2016). ‘Hydrotreating’, çeşitli hammaddelerden safsızlıkların ve kirleticilerin giderilmesine odaklanarak nihai ürünlerin yüksek kalite ve çevre standartlarını karşılamasını sağlamaktadır (Kokayeff ve diğerleri, 2014). Desülfürizasyon, ham petrolden veya diğer hidrokarbon kaynaklarından kükürt bileşiklerinin uzaklaştırılması işlemidir ve bu sayede daha temiz ve çevreye daha az zararlı yakıtlar üretilmektedir (Rezakazemi ve diğerleri, 2018). Mevcut durumda dünya genelinde faaliyet gösteren binden fazla petrol rafinerisinin operasyonel uygulamaları, küresel karbon emisyonlarının en az %4’ünü oluşturmaktadır (IEA, 2021; Plug, 2022). Bu sektörün karbonsuzlaştırılması için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bunlara örnek olarak Fransız petrol ve gaz firması TotalEnergies gösterilebilir. TotalEnergies, rafineri süreçlerinde yenilenebilir hidrojenden yararlanmak amacıyla Alman gaz dağıtım firması olan VNG ile yakın zamanda bir ortaklık kurduğunu duyurmuştur (Offshore

Technology, 2023). Ayrıca, Indian Oil, 2050 yılına kadar rafinerilerindeki hidrojen kullanımının %50’sini yenilenebilir hidrojene dönüştürmeyi amaçlayan iddialı bir hedef belirlemiştir. Türkiye’de TÜPRAŞ yenilenebilir hidrojene yönelik stratejiler belirleyerek, yenilenebilir hidrojen üretimine yönelik planlamalar yapmaktadır. TÜPRAŞ 2025 yılında Batman ve Kırıkkale’de güneş enerjisi santralleri ile (planlama aşamasında) yenilenebilir hidrojen üretmeyi hedeflemekte olduğunu ve 2030 yılı itibarıyla da lojistik ve ağır yük taşımacılığı sektörlerine hidrojen satışını planladıklarını duyurmuştur (Pwc, t.y; Tüpraş, 2022). Bu gelişmeler özellikle yenilenebilir hidrojenin, yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda rafine petrol ürünlerinin üretimine ilişkin emisyonları önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir.

Ek 1-2-2 Metal Sanayisi ve Malzeme İşleme

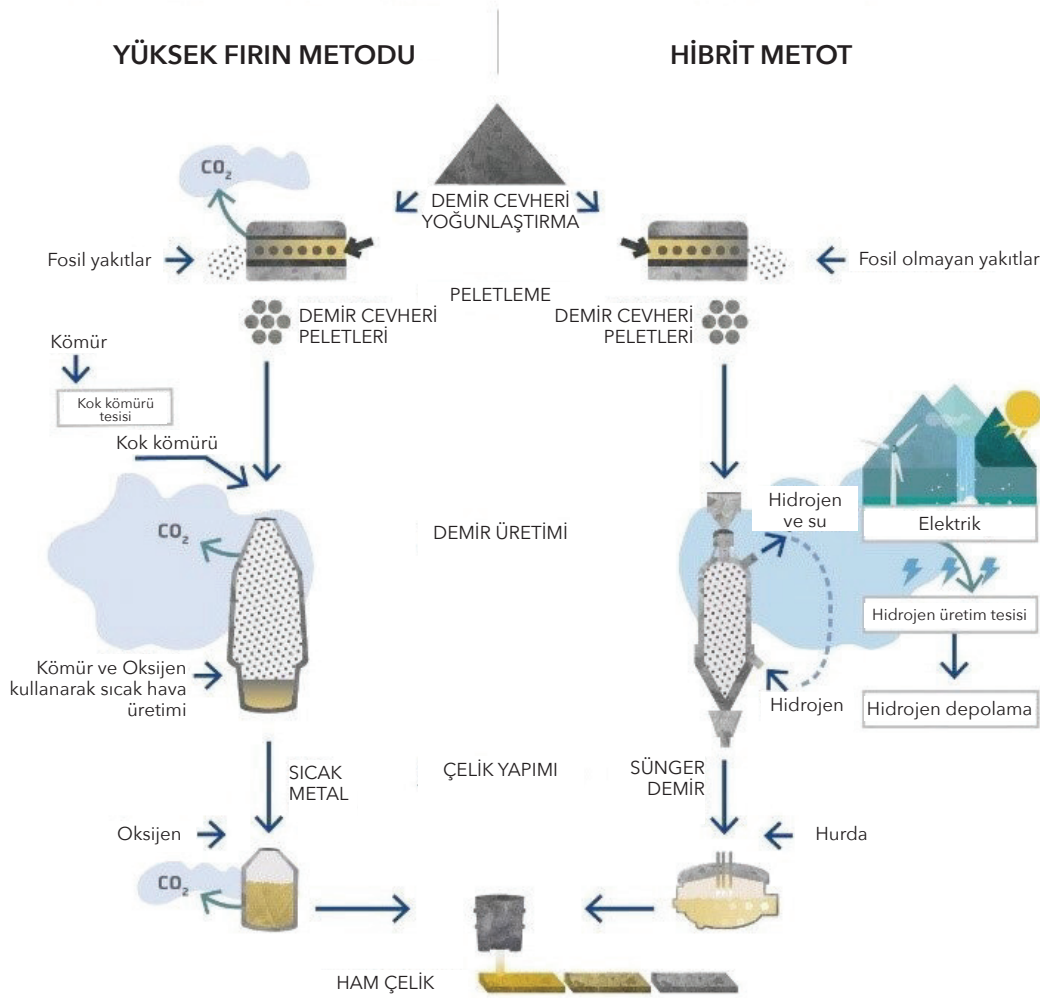
Metal sanayi, hidrojen teknolojisinin kullanımıyla sürdürülebilir bir dönüşüm sürecindedir. Geleneksel olarak metal eritme işlemleri, yüksek miktarda sera gazı emisyonuna neden olan kömür ve diğer fosil yakıtlar kullanılarak yapılmaktadır. Ancak, hidrojenle çalışan eritme fırınlarının kullanılması, metal işleme alanında önemli bir değişimi getirmektedir (Chen & Zuo, 2021). Yenilenebilir hidrojen, cevher indirgeme süreçlerinde de önemli bir rol oynayarak karbon ayak izini düşürebilir. Bu sektörde yenilenebilir hidrojenin benimsenmesi, yalnızca emisyonların azaltılmasında değil, aynı zamanda fosil yakıt fiyat dalgalanmalarından da korunmayı sağlayacaktır (Chen & Zuo, 2021).

Hidrojen bir enerji taşıyıcısı olmanın ötesinde, metalurji süreçlerinde bir indirgeyici olarak da kullanılmaktadır. Bu kapsamda hidrojen çevresel etkisi düşük metal üretiminde kritik bir öneme sahiptir ve endüstrinin genel sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Spreitzer ve Schenk, 2019). Hidrojenin, çelik üretiminde kullanılmasında yeşil hidrojenin maliyeti önemli bir engeldir. Operasyonel zorluklar arasında, yüksek fırınlardaki doğrudan redüksiyon (DR) süreçlerinde, hidrojen indirgeme reaksiyonlarının endotermik doğasının getirdiği özgün ısı dengesini korumak gibi konular bulunmaktadır. Karbonsuz doğrudan indirgenmiş demir (DRI) üretiminde elektrik ark ocağı (EAF) teknolojisinde hidrojen kullanılmasının çelik üretimindeki potansiyel etkileri de araştırılmaktadır. EAF ile çelik üretimi, küresel üretimin %28’ini karşılamakta olup, demir-çelik sanayi kaynaklı karbon emisyonlarındaki payı ise sadece %8’dir. Yüksek fırınlar (Blast Furnace, BF) ve bazik oksijen fırınlar (Basic Oxygen Furnace, BOF) toplam küresel çelik üretiminin %65’ini karşılamaktadır (SHURA, 2023). BF ve BOF prosesleri, EAF’den daha yüksek karbon emisyon oranına sahiptir ve toplam emisyonların %92’sini oluşturmaktadır. Bu durum, EAF ile ilişkili çevresel avantajları göstermekle birlikte, sürdürülebilirlik bağlamında farklı çelik üretim yöntemlerini dikkate almanın önemini de vurgulamaktadır (Hornby ve diğerleri, 2021).

Hybrit Projesi⁴³ kapsamında, İsveç’te çelik üretiminde kullanılacak yenilenebilir hidrojen üretimi için alkali elektrolizörler kullanılarak, karbon emisyonlarının önemli ölçüde azaltılması hedeflenmektedir. Hybrit özellikle İsveç ve Finlandiya’nın karbon emisyonlarını sırasıyla %10 ve %7 oranında azaltmayı amaçlamaktadır (IRENA, 2021).

Çelik üretiminde kullanılan hibrit yöntemler Şekil 76’da gösterilmektedir. Benzer çalışmalar, alüminyum gibi çeşitli sanayi alt dallarında da yürütülmektedir (Kushnir ve diğerleri, 2020). Örneğin, İspanya Navarra’da bulunan Hydro firması, yenilenebilir hidrojeni birincil enerji kaynağı olarak kullanarak alüminyum üreten ilk başarılı girişim olmuştur (Hydro, t.y.).

Şekil 76. Yüksek fırın (BF) ve hibrit yöntemlerle çelik üretiminin karşılaştırması



Kaynak: FCHEA (2019)

⁴³ İlgili projeye ilişkin açıklama raporun "4.1.1 Demir-çelik sektörü" bölümünde bulunmaktadır.

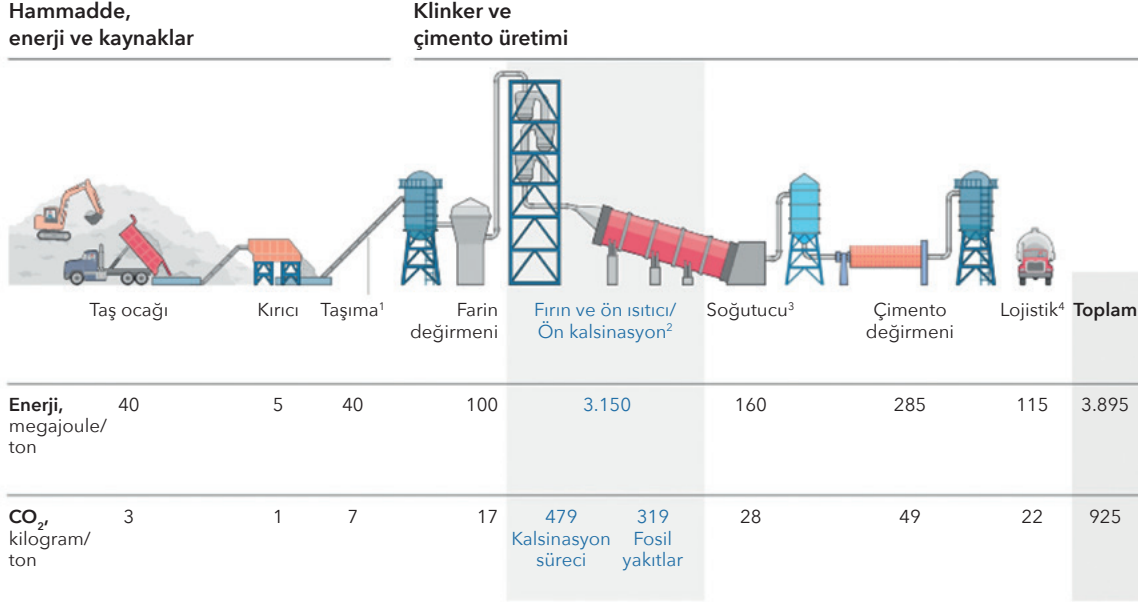
Demir-çelik sektöründe hidrojenin kullanımı oldukça maliyetlidir. Mevcut durumda, yenilenebilir hidrojen üretim maliyetleri kg başına 3,6 - 5,3 EUR arasında değişmekte olup, bu fiyat aralığı gri hidrojen üretim maliyetinden oldukça yüksektir (European Parliament, 2020). Gelişmiş elektroliz teknolojilerinin yanı sıra, 2017 yılı yenilenebilir enerji fiyatları baz alındığında, bu fiyatların 2030 yılına kadar %50 azalması beklentisi, düşük maliyetli yenilenebilir hidrojen üretim hedefine ulaşmak için oldukça önemlidir (European Parliament, 2020). Çelik sektörü talebini karşılamak için hidrojen üretiminin ölçeklendirilmesi de ayrı bir zorluktur. Almanya’da yıllık 42 megaton çelik üretiminin tamamen karbondan arındırılması için yıllık yaklaşık 100 terawatt-saat (TWh) yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi gerekmektedir (European Parliament, 2020). Büyük ölçekli hidrojen üretim tesislerinin kurulumuna ve mevcut çelik üretim süreçlerine hidrojenin verimli bir şekilde entegre edilmesine yönelik de önemli yatırımlar gerekmektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim profilleri nedeniyle, elektrolizden yüksek verim almak için enerji depolama teknolojilerinin kullanımı da gerekmektedir.

Yenilenebilir hidrojen, düşük emisyon ve yüksek enerji verimliliği nedenleriyle cam sektöründe de önemli bir potansiyel sağlamaktadır. Cam eritme fırınları için temiz bir yakıt olarak hidrojen kullanılabilir. Ayrıca, cam elyaf üretiminde ince lifler oluşturmak için de kullanılmaktadır. Ayrıca hidrojen, yalıtım ve güçlendirme malzemesi üretiminde emisyonların azaltılmasına ve proses kontrolüne katkı sağlamaktadır (Genovese ve diğerleri, 2023). Camın yanı sıra, Snam ile iş birliği yapan Iris Ceramica Group, İtalya’nın Castellano kentinde dünyanın ilk yenilenebilir hidrojenle çalışan seramik fabrikasını kurmayı planlamaktadır. Projenin ilk aşamasında doğal gaz ve yenilenebilir hidrojen⁴⁴ karışımının kullanılması, sonrasında ise sadece yenilenebilir hidrojen kullanılarak seramik üretmek hedeflenmektedir (CWW, 2021; Financial Times, t.y.).

Çimento sektörü, küresel karbon emisyonlarının %7’sine neden olmaktadır (UNECE, 2022). Çimento üretimi enerji yoğunluğu yüksek üretim sektörlerinden biri olarak tanımlanır ve bu sektörde yıllık 1 milyar Amerika Birleşik Devletleri Doları (ABD\$) tutarında sevkiyat başına yaklaşık 24 trilyon fit küp (ft³) eşdeğerinde enerji kullanılmaktadır (RFF, 2020). 2050 yılı projeksiyonları bu sektördeki enerji talebinin 17 trilyon ft³ seviyesine düşeceğini öngörmektedir (RFF, 2020; Commodity Inside, 2023). Çimento üretiminde 1.450°C’ye kadar sıcaklıklar gerektiğinden, enerji yoğun yüksek yakıtlar, yani genellikle fosil yakıtlar, kullanılmaktadır ve bu durum da yüksek seviyede karbon emisyonlarına neden olmaktadır (IRENA, 2022) Bu bağlamda hidrojen, çimento üretiminde emisyonların azaltılması için kömür ve doğal gazın yerine kullanılabilir.

⁴⁴ Proje kapsamında, 2,5 megavat (MW) gücünde fotovoltaik güneş santraline entegre elektroliz tesisi ile üretilecek hidrojenin tamamının kullanılması hedeflenmektedir.

Şekil 77. Çimento üretim süreci aşamalarında salınan karbon emisyon miktarları



¹ 1kWh/t/100m olduğu varsayılmıştır.

² Küresel ortalamalar varsayılmıştır; veriler “Global Cement and Concrete Association” ve “Getting The Numbers Right 2017” çalışmalarından alınmıştır.

³ İleri-geri hareketli ızgara soğutucusunun ton klinker başına 5 kWh elektrik kullandığı öngörülmüştür.

⁴ Ortalama 200km kamyon ile taşıma yapıldığı varsayılmıştır.

Kaynak: McKinsey & Company (2020)

Ek 2 - Dönüşüm faktörleri ve katsayılar

Fayda-maliyet analizi bölümünde kullanılan dönüşüm faktörleri ve katsayılar aşağıda verilmektedir.

Tablo 5. Kullanılan enerji kaynağı bazında üretilen 1 GWh enerji başına salınan karbon (CO₂) miktarı

Enerji kaynağı (1 GWh)	CO ₂ emisyon miktarı
1 GWh kömür	390 tCO ₂
1 GWh doğal gaz	185 tCO ₂
1 GWh petrol	1.080 tCO ₂

Kaynak: Carbon Independent (t.y.)

Tablo 6. Elektrik sektörü, sanayi ve enerji üretimi için dikkate alınan karbon fiyatları

Yıl	Karbon fiyatı ⁴⁵ (ABD\$/tCO ₂)
2030	90
2040	160
2050	200

Kaynak: IEA (2024)

Tablo 7. Enerji kaynakları bazında fiyat projeksiyonu

Yıl	Kömür (ABD\$/t)	Petrol (ABD\$/varil)	Doğal gaz (ABD\$/MBtu ⁴⁶)
2030	57	42	4,3
2040	45	30	4,2
2050	43	25	4,1

Kaynak: IEA (2024)

Tablo 8. Bir GWh enerji üretimi için gereken yakıt miktarları

1 GWh	122,8 t kömür eşd.
1 GWh	3.412,1 Mbtu
1 GWh	588,2 varil petrol eşd.

Kaynak: Kyle's converter (2024), Unit Converters (2024), Convertunits (2024)

⁴⁵ CO₂ vergisi için IEA'nın "Gelişen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler" bölümü dikkate alınmıştır. 2035 ve 2045 yılları ±5 yılın ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

⁴⁶ BTU: British thermal unit (İngiliz ısı birimi).

Tablo 9. Bir kg hidrojenin (H₂) LCOH ve enerji değeri

LCOH	
Dönem	LCOH (ABD\$/kgH ₂)
2030-2040	2,4
2040-2045	2,4
2045-2055	1,2
Enerji değeri	
Enerji değeri (kWh/kg H ₂)	
1 kg	33 kWh

Kaynak: ETKB (2023)

Tablo 10. Bir galon benzin ve dizel yakıtından kaynaklı salınan CO₂ miktarı

	Salınan CO ₂ miktarı (kg CO ₂ /galon)
Benzin	8,9
Dizel	10,2

Kaynak: EPA (2023)

İstanbul Politikalar Merkezi

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

European Climate Foundation

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

Agora Energiewende

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



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

SHURA Kurucu Ortakları

