

TÜRKİYE YEŞİL HİDROJEN GELECEĞİ | 2023

H₂

Sabancı
Universitesi

IICEC

SABANCI UNIVERSITY
ISTANBUL INTERNATIONAL
CENTER FOR ENERGY AND CLIMATE

TÜRKİYE
YEŞİL HİDROJEN
GELECEĞİ | 2023

Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği 2023

Bora Şekip Güray

Ali Osman Çeker

Sabancı Üniversitesi IIcec

İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi

Minerva Palas, Bankalar Caddesi, No:2

Karaköy 34420

İstanbul / Türkiye

Tel: +90 212 292 49 39

Kitap Tasarım:

CEEN Enerji Bilgi Servisleri Dan. ve Org. ve Tic. Ltd. Şti.

Kavacık Mah. FSM Cad. Tonoğlu Plaza No: 3/4

Beykoz 34810 İstanbul / Türkiye

Tel: +90 216 510 12 40

Kitap Baskı:

G.M. Matbaacılık ve Tic. A.Ş.

100 yıl Mah. Matbaacılar Sitesi 1.Cad. No:88 Bağcılar/İstanbul / Türkiye

Tel: +90 212 629 00 24 **Fax:** +90 212 629 20 13

Matbaa Sertifika No: 45463

Aralık 2023

ISBN: 978-625-6956-22-3

IICEC Hakkında

Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi (IICEC), geleceğe yönelik bir bağımsız araştırma ve politika merkezi olarak, enerji ve iklim konularında nesnel, kaliteli araştırmalar yapmak üzere kurulmuştur.

IICEC, kamu-sanayi-akademi iş birliklerini destekleyen başarı üçgeni modeli içerisinde, enerji ve iklim gündeminde gerçekleştirdiği ulusal, bölgesel ve uluslararası çalışmalar ile daha temiz ve güvenli enerji geleceğine katkı sunmaktadır.

Bölgedeki en seçkin üniversitelerden birinin bünyesinde yer alan IICEC, Türkiye enerji sektörüne stratejik ve bütüncül bakış perspektifiyle analitik çalışmalar gerçekleştirmekte, aynı zamanda enerji ve iklim alanlarında kilit paydaşları bir araya getiren seçkin bir platform sağlayarak fikir alışverişini ve gelişimini de teşvik etmektedir. IICEC tarafından 2020 yılında Türkiye’de bir ilk olarak yayımlanan “Turkey Energy Outlook”, enerji sektörünün verimli, güvenli, rekabetçi, teknoloji-odaklı ve sürdürülebilir geleceğini somut öneriler ile desteklemektedir.

<https://iicec.sabanciuniv.edu>

[in iicec-sabancı-universitesi-istanbul-international-center-for-energy-and-climate](https://www.linkedin.com/company/iicec-sabancı-universitesi-istanbul-international-center-for-energy-and-climate)

[t sabancıu_iicec](https://twitter.com/sabancıu_iicec)

Önsöz

2010 yılında Dr. Fatih Birol ile yaptığım görüşmelerden ilham alarak kurduğumuz Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi (IICEC), benim *başarı üçgeni* olarak tanımladığım ve Türkiye'nin gelişimi için çok önemli olduğuna inandığım, kamu-özel sektör-akademi iş birlikleri modeliyle, yürüttüğü analitik çalışmalar ve diğer etkinliklerle daha temiz ve güvenli bir enerji geleceğine katkısını artırmaya devam etmektedir.

IICEC'in 2020 yılında Türkiye'de bir ilk olarak yayımladığı, ülkemizin enerji geleceği ile ilgili stratejik bir bakış içeren "Turkey Energy Outlook" (TEO) çalışması, sektörde tüm paydaşlar tarafından geniş bir kabul gördü. TEO, daha verimli, güvenli, rekabetçi, teknoloji odaklı ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine ulaşılabilmesi için sunduğu somut önerilerle referans niteliği kazanırken, aynı zamanda gelişmekte olan ülkeler için de güzel bir örnek oluşturdu. IICEC 2021 ve 2022 yıllarında da yine Türkiye'de ilkler olarak "Türkiye Elektrikli Araçlar Görünümü" ve "Türkiye Yenilenebilir Enerji Görünümü" çalışmalarını yayımladı. Bu alanlarda yüksek potansiyelimizi fırsatlara dönüştürebilecek güçlü ve sürdürülebilir büyüme perspektiflerinin, Türkiye'nin enerji güvenliği başta gelmek üzere enerji dengelerine, çevresel performansına ve iklim hedeflerine önemli katkıları sunuldu.

Dünya enerjide ve iklimde zorlu sınamalardan geçerken, temiz enerji yatırımlarında ve teknolojilerinde büyümenin enerji güvenliğinin ve daha sürdürülebilir bir geleceğin en kritik bileşenlerinden birini oluşturduğunu görüyoruz. Son dönemde enerji dönüşümü içerisinde konumunu güçlendirmeye başlayan, Türkiye için de enerji güvenliği, net-sıfır hedefleri ve teknoloji-odaklı temiz enerji geleceği yönlerinden yüksek gelişim potansiyeli ve önemli fırsat alanları sunan hidrojen, Dr. Birol'un IICEC'e bu yıl için önerdiği projenin konusu oldu.

Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği çalışmasında, analitik ve bütüncül bir yaklaşımla, yeşil hidrojen üretiminde ve talebinde uzun vadeli gelişim perspektifinin, Türkiye'nin daha güvenli, teknoloji-odaklı ve temiz enerji geleceğine sunacağı katkılar irdelenerek, çok yönlü faydaların gerçekleştirilebilmesi için somut öneriler sunuluyor.

IICEC tarafından yine Türkiye'de bir ilk olarak gerçekleştirilen bu çalışmanın, Türkiye enerji sektörü, enerji tüketicisi tüm sektörler, araştırmacılar, teknoloji ekosistemi ve tüm paydaşlar için önemli bir referans oluşturmasını bekliyorum. Bu çalışmanın, Türkiye'nin enerjide güvenli, verimli, temiz ve rekabetçi gelecek fırsatlarına odaklandığı bir dönemde zamanlama olarak da ayrıca değer taşıdığını düşünüyorum. Çalışmayı gerçekleştiren IICEC Direktörü Bora Şekip Güray ve ekibine, katkı sunan tüm paydaşlara teşekkür ediyorum.

Güler Sabancı

Sabancı Üniversitesi Kurucu Mütevelli Heyeti Başkanı

Yazarlar

IICEC Direktörü Bora Şekip Güray tarafından yönetilen IICEC "Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği 2023" çalışması, **Bora Şekip Güray** ve IICEC Uzmanı **Ali Osman Çeker** tarafından kaleme alınmıştır. Çalışmada IICEC "Turkey Energy Outlook" çalışmasının kritik bulgularından ve bütüncül modelleme altyapısından geniş ölçüde faydalanılırken, enerji, ulaştırma, sanayi, binalar ve tarım sektörlerine ilişkin detaylı bir veri tabanı kullanılmıştır. Çalışmanın teknolojiler ile ilgili kısımlarına, Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi (MDBF) Dekan Yardımcısı **Prof. Dr. Selmiye Alkan Gürsel** ve liderliğinde SUNUM Doktora Sonrası Araştırmacısı **Dr. Naeimeh Rajabalizadeh Mojarrad** ve MDBF Doktora Öğrencisi **Büşra Çetiner** önemli katkı sağlamıştır.

Teşekkürler

Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği çalışması, enerji sektörü, sanayi ve ulaştırma sektörleri, teknoloji ekosistemi ve diğer ilgili sektörlerden çok sayıda liderin ve uzmanın destekleri ve iş birlikleri ile hazırlanmıştır.

- **Sabancı Üniversitesi Kurucu Mütevelli Heyeti Başkanı Güler Sabancı'ya**, IICEC'in gelişimine liderlikleri, Türkiye'nin daha temiz ve güvenli enerji geleceğine yönelik analitik çalışmaları destekleyen vizyonları için,
- **Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Başkanı ve IICEC Onursal Başkanı Dr. Fatih Birol'a**, IICEC'in iş planlarına ve bu çalışmaya fikri liderlikleri için,
- **Sabancı Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Yusuf Leblebici'ye**, IICEC'e bağımsız bir araştırma ortamı ve olanağı sağlayan destekleri için,
- **IICEC Yönetim Kurulu'nun değerli üyeleri**
 - ALJ Türkiye,
 - Borusan EnBW Enerji,
 - BP,
 - Enerjisa,
 - Eren Holding,
 - ING Türkiye,
 - Sanko Enerji,
 - Shell,
 - Socar,
 - Zorlu Enerji'ye

IICEC'e destekleri için teşekkür ederiz.

- Analizleri ile çalışmaya destek veren Alper Özmumcu'ya,
- Çalışmaya değerli görüş ve önerileri ile destek sağlayan, aşağıda isimleri sunulan sektör paydaşlarına

teşekkür ederiz¹.

¹ İsimler alfabetik olarak belirtilmiştir.

- Adil Tekin Sanko Enerji
- Ahmet Özkaya ETKB EİGM
- Ahmet Türkoğlu EPİAŞ
- Alkım Bağ Güllü Shura
- Alper Tekeli Ford Otosan
- Alper Özmumcu İYTE
- Arkın Akbay Eksim Enerji
- Ayça Arınan TÜPRAŞ
- Ayşe Gül Boyacı TÜBİTAK MAM
- Başak Tuncer SOCAR Türkiye
- Bilal Guliyev SOCAR Türkiye
- Bilal Tuğrul Kaya ENTEK
- Burak Bakkal TTGV
- Can Sındıraç ASPİLSAN
- Caner Sevginer TEMSA
- Celal Erbay TENMAK
- Çağatay Ölken TÜPRAŞ
- Doğukan Ünal IPEC
- Ece Akın Armutak MEXT
- Efe Çağlayan ŞİŞECAM
- Emre Erdoğan Enerjisa Üretim
- Enis Amasyalı Borusan EnBW
- Erdeniz Erol Elkon
- Eser Dinçer Hafızoğlu SOCAR Türkiye
- Fakir Hüseyin Erdoğan EPDK
- Fehmi Akgün TÜBİTAK MAM
- Gaurab Chatterjea Shell
- Gökhan Hisar Ford Otosan
- Hacı Ali Ulutaş EPDK

- Hakan Yıldırım Sanko Enerji
- Hasan Akbulut Türkiye Çelik Üreticileri Derneği
- Hasan Aksoy Shura
- Hüseyin Devrim Teksis
- İbrahim Erden TÜREB
- İhsan Erbil Bayçol Enerjisa Üretim
- İrem Arısoy Eczacıbaşı Vitra
- İsmail Erilhan Linde
- Kağan Kayacı Kaleseramik
- Kahraman Çoban Enerjisa Üretim
- Kıvanç Zaimler Sabancı Holding
- Levent Özcan Caner Borusan EnBW
- Mehmet Erdem Yaşar EBRD
- Mehmet Kürkçü EPDK
- Mehmet Özenbaş PwC
- Mehmet Şerif Sarıkaya GAZMER
- Mehmet Volkan Duman GMKA
- Mehmet Yıldız Sabancı Üniversitesi
- Namık Baydemir ŞİŞECAM
- Nurşen Numanoğlu TÜSİAD
- Oğuzcan Samsun Enerjisa Enerji
- Onur Okutur Kearney
- Osman Tufan Doğan INNOVA
- Ömer Erdem ETKB SGB
- Özgür Adıyaman Linde
- Özlem Güçlüer OSD
- Öztürk Selvitop ETKB DİGM
- Pauline Seyfert AHK
- Roberto Gonzales EBRD

- Samet Arslan Enerjisa Üretim
- Selim Okutur Toyota Türkiye
- Selin Demiyürek ŞİŞECAM
- Selin Duru Linde
- Selmiye Alkan Gürsel Sabancı Üniversitesi
- Serkan Şahin ŞİŞECAM
- Şule Kılıç EBRD
- Tolga Arslan ŞİŞECAM
- Tolga Güneri Eczacıbaşı Vitra
- Tufan Şener GAZBİR
- Tümkan Işıltan BP
- Türkan Edige Ford Otosan
- Vecih Yılmaz Akçansa
- Veysel Yayan Türkiye Çelik Üreticileri Derneği
- Volkan Aktürk ENTEK
- Yasemin Kuytak KfW Ipex
- Yasemin Topçu TENMAK
- Yusuf Günay Yeşil Hidrojen Üreticileri Derneği
- Yusuf Turhan MEXT
- Zafer Korkulu EPDK

Çalışmaya katkı sağlayan kurumlar ve uzmanlar, burada yer verilen görüşlerden sorumlu değildir.

Sorularınız ve görüşleriniz için:

Bora Şekip Güray

Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi (IICEC)

Bankalar Caddesi, No:2

Karaköy, İstanbul,

Türkiye

tghf.iicec@sabanciuniv.edu

Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği ile ilgili detaylı bilgilere
<https://iicec.sabanciuniv.edu> adresinden ulaşabilirsiniz.

İÇİNDEKİLER

Yönetici Özeti

17

BÖLÜM 1: Giriş

25

BÖLÜM 2: Hidrojene Küresel & Bölgesel Bakış

41

BÖLÜM 3: Türkiye Enerji Sektörüne Genel Bakış & Hidrojen

87

BÖLÜM 4: IICEC Analizlerinde Türkiye’de Yeşil Hidrojen
Geleceği & Çok Boyutlu Faydalar

119

BÖLÜM 5: Gelişim Alanları & Öneriler

177

EKLER

195

IICEC Hakkında	3
Önsöz	5
Yazarlar	6
Teşekkürler	7
Yönetici Özeti	17
1 Giriş	25
1.1. Neden Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği ?	26
1.2. Türkiye Enerji Sektöründe Yeşil Hidrojende Gelişim için Hangi Fırsatlar Var ?	27
1.3. Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Geleceği için Güçlü Yönleri Neler ?	31
1.4. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojende Büyüme Perspektifi Ne Gösteriyor ?	32
1.5. IICEC Analizlerinde Bütüncül Fayda-Maliyet Perspektifi Neye İşaret Ediyor ?	35
1.6. Yeşil Hidrojende Çok Yönlü Faydalar için Gelişim Alanları Neler ?	39
1.7. Çalışmanın İçeriği	40
2 Hidrojene Küresel & Bölgesel Bakış	41
2.1. Küresel Enerji ve İklim Dinamikleri	42
2.2. Hidrojenin Temelleri ve Temiz Hidrojen Gelişimini Destekleyen Faktörler	45
2.3. Hidrojen Üretimi ve Tüketiminde Mevcut Durum	50
2.3.1. Hidrojen Talebi	50
2.3.2. Hidrojen Üretimi	51
2.4. Net-Sıfır Emisyon Hedeflerinde Hidrojen Gelişimi	56
2.4.1. Net-Sıfır Patikasında Hidrojen Talebi Perspektifi	56
2.4.2. Net-Sıfır Patikasında Hidrojen Üretimi ve Altyapı Gelişimi Perspektifi	58

2.5. Yeşil Hidrojende Güçlü ve Sürdürülebilir Büyüme için Kritik Zorluklar ve Fırsatlar	60
2.5.1. Yeşil Hidrojen Üretimine Alternatifler ile Daha Rekabetçi Konuma Gelmesi Hangi Faktörlere Bağlı Olacak ?	61
2.5.2. Piyasanın Büyüme Potansiyeli Yüksek Bileşenleri Yakın ve Orta Dönemde Nasıl Gelişebilir ?	63
2.5.3. Arz ve Talepte Hem Yüksek Büyüme Hem de Sürdürülebilir Denge Sağlanabilecek mi ?	64
2.5.4. İnovasyonda ve Teknolojik Gelişimde Hangi Önemli Fırsatlar Var ?	65
2.5.5. Hidrojen Vadileri ve Hub'ları Neden Önemli ?	75
2.5.6. Düzenlemeler ve Güvenlik Sürdürülebilir Büyüme için Neden Kritik ?	76
2.5.7. Destekleyici Finansal Mekanizmalarda Hangi Modeller Öne Çıkıyor ?	77
Referanslar	80
3 Türkiye Enerji Sektörüne Genel Bakış & Hidrojen	87
3.1. Enerji Arz ve Talep Dinamikleri	88
3.1.1. Enerji Talebi Dinamikleri	88
3.1.2. Nihai Enerji Talebi Gelişimi	93
3.1.3. Enerji Arz Dinamikleri	96
3.2. Enerji İthalatı	97
3.3. Enerji Sektöründen Kaynaklı Emisyonlar	99
3.4. Enerji Dinamiklerine Bütüncül Bakış ve Enerjinin Karekodu	101
3.5. İklim Riskleri ve Enerji Sistemi	104
3.6. Enerji, İklim Politikaları ve Stratejilerinin Temel Öncelikleri	105

3.7. Politika ve Stratejilerde Hidrojen	107
3.8. Hidrojen Ekosisteminde Öne Çıkan Güncel Gelişmeler	110
3.9. Yeşil Hidrojen Daha Güvenli, Temiz ve Teknoloji-Odaklı Enerji Geleceğine Nasıl Katkı Sağlayacak ?	111
Referanslar	113
4 IICEC Analizlerinde Türkiye'de Yeşil Hidrojen Geleceği & Çok Boyutlu Faydalar	119
4.1. IICEC Modeli ve Analizleri Genel Çerçevesi	120
4.2. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojen Arz ve Talep Gelişimi	121
4.2.1. Yeşil Hidrojen Üretimi Geleceği	121
4.2.2. Yeşil Hidrojen Talebi Geleceği	134
4.2.3. Yeşil Hidrojen İhracat Perspektifi	151
4.3. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojen Geleceğinin Çok Boyutlu Enerji ve İklim Faydaları	153
4.3.1. Enerji Arzında Yerleşme ve Çeşitlendirme	153
4.3.2. Enerji İthalat Tasarrufu	154
4.3.3. Sera Gazı Emisyonları Azaltımı	158
4.3.4. İhracat Kazanımı	161
4.4. Bütüncül Fayda-Maliyet Gelişimi Analizleri	162
4.5. Diğer Kritik Faydalar	170
4.6. Özet Değerlendirme	171
Referanslar	175

5	Gelişim Alanları & Öneriler	177
	5.1. Yeşil Hidrojende Verimli, Teknoloji-Odaklı, Sürdürülebilir Büyüme Destekleyecek Gelişim Alanları	178
	5.2. Politika Hedefleri ve Yol Haritaları	179
	5.3. Bütüncül Planlama ve Altyapı Gelişimi	182
	5.4. Piyasa Gelişimi	185
	5.5. Teknolojiler ve Yerleşme	186
	5.6. Uluslararası ve Bölgesel İşbirlikleri	188
	5.7. Geniş Ölçekte Sürdürülebilirlik	190
	5.8. İnsan Kaynakları ve Girişimcilik	191
	5.9. IICEC Önerileri	194
	EKLER	195
	EK A: Temel Politika Belgeleri ve Veri Kaynakları	197
	EK B: Dönüşüm Faktörleri	198
	EK C: Kısaltmalar	199
	EK D: Fosil Yakıt ve Karbon Fiyat Serileri	202
	EK E: Analiz Sonuçları Özeti	203

Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği 2023

(Türkiye Green Hydrogen Future 2023)

Yönetici Özeti

Neden “Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği” ?

2022 yılında yaşanan dünyanın ilk enerji krizi, günümüzün jeopolitik gelişmeleri, elektrifikasyonda güçlü büyümeyi destekleyecek elektrik sistemlerinin büyümesi ve esnekliği, temiz enerji teknolojilerinin ve tedarik zincirlerinin güvenliği gibi yeni sınamalar, dünyada enerji güvenliği paradigmasına çok yönlü bir nitelik kazandırmaktadır. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında 1,5 °C ve net-sıfır hedefleri yaşamsal önemini korurken, enerji dönüşümü için güvenli ve temiz enerji seçeneklerin güçlendirilmesi, sürdürülebilir geleceğin en önemli unsurlarından birini oluşturmaktadır. Son dönemde temiz enerji yatırımlarının büyüklüğünün fosil yakıt yatırımlarının belirgin şekilde üzerinde gerçekleşmesi sonucunda dünya enerji sektörü temiz enerjinin payının hızla artacağı bir döneme girmektedir. Yeni sanayi stratejilerinde, ekonomilerin sürdürülebilir rekabetçiliği bakımından enerji kaynakları portföyünün yanı sıra temiz enerji ve iklim teknolojilerinde de çeşitlendirme ve yerileştirme unsurları kritik öncelik niteliği kazanmakta, jeopolitik gelişmeler bu yönelimleri güçlendirmektedir.

Temiz hidrojene yönelim de makro enerji, iklim, sanayi, teknoloji dinamikleri ve jeopolitik gelişmeler içerisinde son dönemde hızlanmaktadır. Özellikle ağır sanayi, uzun yol taşımacılığı gibi, temiz elektrifikasyon yoluyla karbondan arındırılması güç olan sektörlerde yaygınlaşma potansiyeli yüksek olan temiz hidrojen, fosil yakıtlardan yenilenebilir ve nükleer enerjiye kadar çeşitli birincil enerji kaynaklarından, farklı teknolojiler yoluyla üretilebilmektedir. Hidrojen farklı formlarda depolanabilmekte, taşınabilmekte ve kullanıma sunulabilmektedir.

Tüm bu özellikler, temiz hidrojeni daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerji arz talep dengeleri içerisinde hem yakıt hem de esnek bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkarmaktadır. Özellikle büyük ekonomiler tarafından hayata geçirilen destekleyici finansman ve yenilikçi iş modelleri, ilk gelişim aşamasında yeşil hidrojenin ekonomisini ve rekabetçiliğini iyileştirmeyi, tedarik zincirlerinin sürdürülebilir büyümesini hedeflerken, özellikle 2030 sonrası dönemde net-sıfır patikası ile uyumlu bir büyüme zeminini güçlendirmektedir. Teknolojik gelişim fırsatlarının ve maliyetlerde düşüş perspektifinin yeşil hidrojenin rekabetçiliğinde önemli iyileşmeler sağlaması hedeflenmektedir. Yeşil hidrojenin büyümenin, Türkiye'nin enerji dengelerinde de gelecekte önemli rol oynaması beklenmektedir.

Türkiye'nin Potansiyeli ve Güçlü Yönleri

Türkiye, genç nüfus, sanayileşme, kentleşme ve mobilite gibi dinamiklerle desteklenerek artan enerji talebi ve enerji sektöründe yüksek büyüme potansiyeliyle Avrupa'nın en büyük, dünyanın ise en dinamik enerji piyasalarından birisi durumundadır. Arz güvenliği, rekabetçilik ve yerleşme odaklı gelişen enerji stratejileri ile birlikte 2053 net-sıfır emisyon hedefinin açıklanması, enerji piyasalarında ilerlemeler yoluyla önümüzdeki otuz yıl içerisinde daha güvenli ve temiz enerji geleceğinin belirleyicileri olacaktır.

Enerji sektöründe ithal fosil yakıt yoğunluğunun ve enerji ithalat faturasının azaltılmasını, kaynak ve teknoloji çeşitlendirmesinin ve arz güvenliğinin güçlendirilmesini, net-sıfır hedeflerine yönelik dönüşümü eş zamanlı olarak destekleyebilecek tüm alanlarda, teknoloji-odaklı gelişme ve çok yönlü büyüme fırsatları bulunmaktadır. Enerji politikaları, piyasa gelişimi ve yatırım öncelikleri arasında, temiz elektrifikasyonda hızlı yaygınlaşma, yenilenebilir enerjide ve enerji verimliliğinde yüksek potansiyelin değerlendirilmesi gibi başlıklar son dönemde daha fazla öne çıkmaktadır. Küresel ve bölgesel gelişmeler, ulusal kalkınma, enerji, iklim ve sanayi politikalarında belirlenen öncelikler, sanayide yeni girişimler çerçevesinde hidrojen ekosisteminde gelişim odağı da güçlenmektedir. Türkiye'nin dinamik enerji piyasası, enerji talebinde büyüme ihtiyacı ve güçlü yenilenebilir enerji potansiyeli, yeşil hidrojen üretimi ve ilgili teknolojilerin gelişimi bakımından önemli bir zemin oluşturmaktadır.

12. Kalkınma Planı (2023), Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022) ve Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023), özellikle yeşil hidrojenin üretimine, karbondan arındırılması zor sektörlerde tüketimine, ilgili altyapıların ve teknolojilerin gelişimine yönelik önemli hedefler ve açılımlar sunmaktadır. Yeşil hidrojen talebi ve ithalat ihtiyacı yüksek olan Avrupa pazarlarına yakınlık ise, gelecekte iç tüketim sektörlerinin kullanımı öncelikli olmak üzere yeşil hidrojeninde ihracat bakımından enerji ticaret merkezi perspektifi içerisinde yeni fırsatlar getirmektedir. Politika belgelerindeki öncelikler de bu vizyonu desteklemektedir.

IICEC Modeli ve Analizleri Özeti

"Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği", IICEC tarafından Türkiye'de bir ilk olarak yayımlanan Türkiye Energy Outlook (Türkiye Enerji Görünümü) çalışmasının ve IICEC Enerji Modeli ile Türkiye enerji ekonomisinin detaylı bir envanteri üzerine kurulmuştur. Enerjide arz ve talep zincirinin tamamını kapsayan bir veri tabanından yararlanan bütüncül modelleme çerçevesi, küresel ve bölgesel enerji ve iklim dinamiklerini, Türkiye'nin güncel kalkınma, enerji, sanayi ve iklim politikalarındaki kritik öncelikleri ve yönelimleri, enerji piyasalarındaki ve teknolojilerdeki ihtiyaçları, beklentileri ve ilerlemeleri yansıtmaktadır.

Analitik bir yaklaşım, detaylı analizler ve uzun-vadeli perspektifle gerçekleştirilen bu öncü çalışmada, Türkiye'nin yeşil hidrojeninde 2050-2053 yıllarına kadar olan dönemde büyüme ve gelişim perspektifinin, enerjide kaynak çeşitlendirmesine ve enerji güvenliğine, ithal fosil yakıt tüketiminde ve enerji ithalat faturasında düşüşe, CO₂ emisyonlarında azaltıma, temiz enerji dönüşümü amaçlarına ve net-sıfır emisyon perspektifine sağlayabileceği katkılar somut sayısal göstergeler ile sunulmaktadır. Ayrıca, Türkiye'nin ilgili hidrojen teknolojilerinde belirlediği öncelikli alanlarda sağlanabilecek, yerleşme gibi kritik kazanımlar da değerlendirilmiştir.

IICEC modeli ve analizleri, yeşil hidrojen üretiminde Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası'ndaki elektrolizör kurulum hedeflerini baz almaktadır (2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW ve 2053 yılında 70 GW). Bu çerçevede, 2050-2053 yıllarına kadar olan dönemde 50-70 GW¹ elektrolizör kapasitesine ulaşan bir büyüme patikasında teknolojilerin, talep sektörlerinin, üretimde ve tüketimde kapasite kullanım oranlarının, hidrojen üretiminin ekonomisinin ve diğer ilgili faktörlerin gelişimine ilişkin teknolojik analizler gerçekleştirilmiştir.

Elektrolizör kapasitesinde, özellikle 2035 sonrası dönemde çok hızlı büyüme hedefini yansıtan analizlerde, üretim 2030 yılından itibaren her beş yılda yaklaşık iki kat artış göstermektedir. Türkiye yeşil hidrojen üretiminin 2035 yılında 0,6 Mt ve 2050 yılında 5,5 Mt² seviyesinde gerçekleşebileceği öngörülmektedir.

Mevcut teknolojilerle günümüzde yeşil hidrojenin şebeke elektriğinden üretim maliyeti 8,5-9 \$/kg³ aralığında olup, mevcut doğal gaz maliyetlerinin enerji eşdeğeri cinsinden 5-6 katına karşılık gelmektedir. Üretim rekabetçiliği için en kritik unsur elektrik girdi maliyetlerinin gelişimi olacaktır. Hedeflenen maliyet seviyeleri (2035 yılında 2,4 \$/kg ve 2053 yılında 1,2 \$/kg), sırasıyla 30 \$/MWh ve 10-15 \$/MWh elektrik maliyetleri gerektirmektedir. Yeşil hidrojen, mevcut doğal gaz fiyat seviyelerinde gri hidrojenle 2030, doğal gazla 2040 civarında başa baş noktasına gelmektedir. Karbon maliyetlerinde daha hızlı yükseliş veya fosil yakıt fiyatlarının gelecekte daha yüksek seyretmesi halinde rekabetçilik daha erken gerçekleşebilecektir.

Karbondan arındırılması zor olan sektörlerde hidrojen talebinin muhtemel gelişimi, sektörel dinamikler çerçevesinde analiz edilmiştir. Mevcutta gri hidrojen tüketicileri olan rafineri ve gübre sektörlerinde dönüşümün ve AB Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'nın etkileriyle özellikle 2030 sonrası dönemde, çelik başta olmak üzere fosil yakıt yoğunluğu yüksek, aynı zamanda Türkiye'nin ihracatta rekabetçiliği bakımından kritik olan sanayi sektörlerinin talepteki ilk önemli büyüklükleri oluşturması beklenmektedir.

¹ IEA NZE (Net Zero Emissions) Senaryosunda 2050 yılında öngörülen küresel elektrolizör kapasitesinde %1,5 pay.

² IEA NZE Senaryosunda 2050 yılında öngörülen küresel yeşil hidrojen üretiminde %1,6 pay.

³ Seviyelendirilmiş Hidrojen Üretim Maliyeti (Levelized Cost of Hydrogen)

Otomotiv sektörünün dünyadaki ve Avrupa'daki gelişmeler ile uyumlaşması, lojistikte Türkiye'nin konumu, mobilitede temiz enerji yönelimleri gibi dinamikler neticesinde karayolu, havacılık ve denizcilikte talebin de özellikle 2030-2035 sonrasında hızlanması öngörülmektedir. 2050-2053 döneminde 3,8 Mt toplam yeşil hidrojen talebinin yaklaşık %90'u sanayide ve ulaşımda gerçekleşmektedir⁴.

Yeşil hidrojen tüketimi, ulaşımda enerji talebinin 2035 yılında binde 7'sine ve 2050 yılında %11'ine, sanayide enerji talebinin ise 2035 yılında %1'ine ve 2050 yılında %8'ine yükselmektedir. Yeşil hidrojen, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin 2035 yılında binde yedisine, 2040 yılında %1'ine ve 2050 yılında %6'sına karşılık gelmektedir⁵. IICEC analizlerine göre, temiz elektrifikasyon, doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil hidrojenin toplam nihai enerji talebine katkısı 2050-2053 yıllarına kadar %70-75'e çıkabilmektedir (Son dönemde %10-15)⁶. Üretim ve tüketimde gelişim perspektifi, Türkiye'nin yeşil hidrojen potansiyel tüketici sektörlerin talebinin karşılanması öncelikli olacak şekilde ihracatçı konum da sağlayabileceğini göstermektedir (2035 yılında 0,2 Mt ve 2050 yılında 1,7 Mt hidrojen eşdeğeri ihracat).

Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki ihracat vizyonuyla da uyumlu olan bu büyüme patikasında 2050 yılına kadar kümülatif üretiminin yaklaşık %30'u, ağırlıklı bölümü amonyak olmak üzere Avrupa'ya ihracat yoluyla değerlendirilebilmektedir. Orta ve uzun vadede boru hatlarındaki gelişmeler de ihracatı çeşitlendirebilecektir. İhracatta gelişim yoluyla Türkiye AB'nin toplam yeşil hidrojen ithalatında 2050 yılına kadar ortalama %3 pay alabilecektir (2050 yılında %8).

Sunulan yeşil hidrojen gelişimi patikası, 2035 yılına kadar yaklaşık 15 GW ve 2050 yılına kadar 90 GW'ın üzerinde ilave yenilenebilir enerji kurulu gücü geliştirilmesini gerektirmektedir. Yeşil hidrojen üretimini temin edecek elektrik girdisi, Türkiye toplam brüt elektrik üretiminin 2035 yılında %6'sına ve 2050 yılında yaklaşık %20'ine karşılık gelmektedir. Hidrojen depolamanın, elektrik sektörünün artan esneklik gereksinimleri içerisinde orta ve uzun dönemde elektrik arz güvenliği ve yenilenebilir enerjide güçlü büyüme bakımından önemli bir seçenek konumuna ulaşması beklenmektedir. Dolayısıyla, yeşil hidrojen arz ve talep dengesinin gelişiminden azami ekonomik faydanın sağlanabilmesinde, elektrik sisteminde yakın, orta ve uzun dönem büyüme hedeflerinin ve arz güvenliği önceliklerinin de mutlaka gözetilmesi, elektrik ve hidrojen üretimi için entegre planlama yaklaşımlarının ve yol haritalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, yenilikçi nükleer teknolojilerinden pembe hidrojen üretimi potansiyeli, yerli fosil kaynaklara entegre karbon teknolojilerindeki gelişime dayalı hidrojen üretimi, tüm dünyada olduğu talepte büyüme hızına ilişkin bazı belirsizlikler gibi faktörler de yeşil hidrojen arz-talep dengesinin orta ve uzun vadede gelişimini etkileyebilecektir.

⁴ Doğal gazla karışım hedeflerini, temiz elektrifikasyon ve verimli ısı pompası çözümlerini yansıtan IICEC analizlerinde binaların toplam yeşil hidrojen tüketiminde payının sınırlı olacağı görülmektedir. Güçlü elektrifikasyon ve artan değişken yenilenebilir enerji payı çerçevesinde, depolama-odaklı olarak hidrojenin özellikle sistem esnekliği bakımından önemli kazanımlar sağlanabilecektir.

⁵ 2050 yılında dünya ortalaması IEA APS Senaryosunda %3 ve IEA NZE Senaryosunda %8.

⁶ Nihai enerji tüketiminin yarısının elektrik enerjisinde gerçekleşmesi beklenmektedir (günümüzde yaklaşık %20).

Elektrik-yoğun yeşil hidrojen üretiminin su-yoğunluğu da yüksek olup, sürdürülebilir üretimi desteklemek üzere deniz suyu öncelikli kullanımın da şimdiden planlanması gerekmektedir. 2050 yılına kadar olan dönemde elektrolizör hedeflerini desteklemek üzere toplam su gereksinimi, ağırlıklı bölümü deniz suyu olmak üzere 1,5 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır⁷. Elektrolizör üretimine, kurulumlarına ve diğer teknolojilere girdi oluşturacak kritik minerallerin ve tedarik zincirlerinin güvenliğinin de yeşil hidrojeninde geniş ölçekte sürdürülebilir büyüme bakımından önemli bir planlama alanı olacağı değerlendirilmektedir. Değer zincirinin gelişiminde, bütüncül sistem perspektifiyle azami güvenlik mutlaka temin edilmelidir.

Enerji, İklim ve Teknoloji-Odaklı Sanayi Gelişimi için Çok Boyutlu Faydalar

Türkiye, yeşil hidrojen gelişim patikasında özellikle 2030-2035 sonrası dönemden itibaren çok boyutlu enerji ve iklim faydaları sağlayabilecektir. 2050 yılına kadar olan dönemde yeşil hidrojenin petrol ürünleri, doğal gaz ve kömürü ikamesi yoluyla fosil yakıt tüketiminde toplam 81,0 Mtep tasarruf gerçekleştirilebilmektedir (nihai enerji tüketiminin mevcut yıllık fosil yakıt tüketimine eşdeğer). Bu tasarruf, 2050 yılına kadar enerji ithalat faturasında yıllık ortalama 0,8 milyar 2022\$ düşüşe karşılık gelmektedir⁸ (2050 yılında 3,1 milyar 2022\$).

Aynı dönemde sera gazı emisyonlarında 287,2 Mt CO₂-eş azaltım gerçekleşmekte, yeşil hidrojeninde büyüme net-sıfır hedefini desteklemektedir (Mevcut durumda karbondan arındırılması zor sektörlerin emisyon envanteri 79,5 MtCO₂-eş). 2050 yılına kadar olan dönemde bunun karşılığı ise 1,4 milyar 2022\$ olarak hesaplanmaktadır⁹ (2050 yılında 4,8 milyar 2022\$). Dolayısıyla, bu iki alanda yılda ortalama 2,2 milyar 2022\$ ekonomik fayda sağlanabilmektedir. AB'ye ihracat ile sağlanabilecek ekonomik fayda ise yıllık ortalama 1,3 milyar 2022\$ olarak hesaplanmaktadır (2050 yılında 4,4 milyar 2022\$). Üretimin %30'una karşılık gelen AB'ye ihracat, 2050 yılına kadar toplam ekonomik faydanın yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır.

Hidrojen ekosisteminde büyümeyi sağlayacak yatırımların maliyetlerinin irdelendiği IICEC analizlerinde, 2050 yılına kadar yaklaşık yarısı elektrik üretimine odaklı olmak üzere, yıllık ortalama yaklaşık 3,0 milyar 2022\$ yatırım gereksinimi tespit edilmiştir (Elektrik üretimine 1,6 milyar 2022\$, elektrolizör kurulumuna 0,8 milyar 2022\$ ve diğer altyapılar için 0,6 milyar 2022\$). Teknolojilerinde gelişim beklentileri, 2050 yılına kadar olan dönemde elektrolizör maliyetlerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Değer zincirinde en önemli belirsizliklerden olan altyapıda gelişimin hızı ve optimizasyonu toplam maliyet seviyeleri bakımından kritiktir.

⁷ Tamamının yeraltı suyu olması durumunda mevcut yeraltı suyu tüketiminin %6'sına eşdeğer.

⁸ IEA STEPS Senaryosu emtia fiyat serileriyle. IEA APS Senaryosuna göre 0,6 milyar 2022\$. IICEC analizleri petrol ve doğal gazda yerli üretimde artış perspektifini dikkate almakta, fosil yakıt ithalat oranları zaman içerisinde üçte-ikiye düşmektedir. Fosil yakıt arzında mevcut ithalat yoğunluğu oranlarının devam etmesi durumunda 1,1 milyar 2022\$.

⁹ IEA STEPS Senaryosu karbon fiyat serileriyle. IEA APS Senaryosuna göre 1,8 milyar 2022\$.

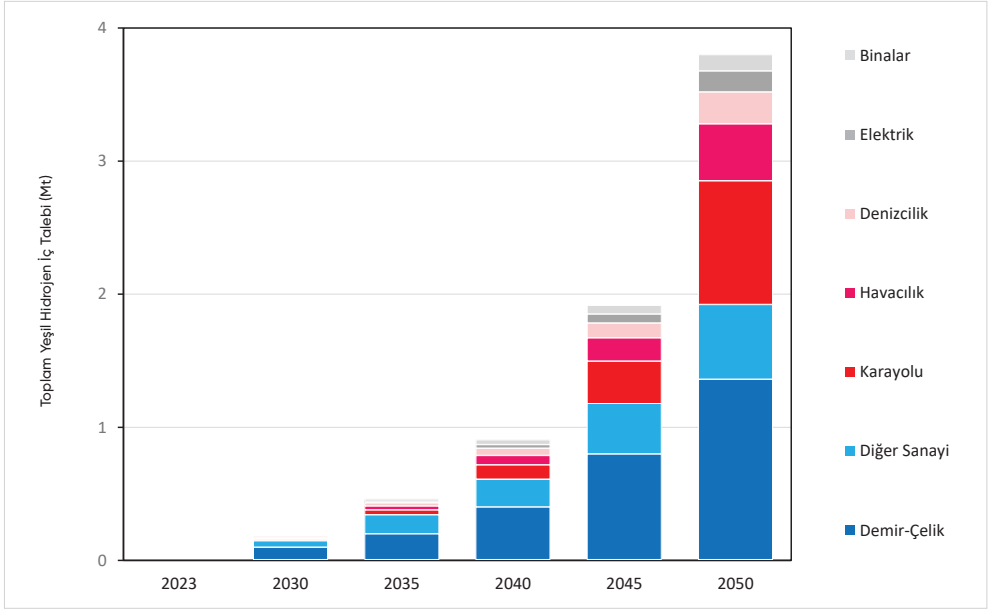
2050 yılına kadar olan dönemde yıllık ortalama 3,0 milyar 2022\$ yatırım karşılığında 3,5 milyar 2022\$ enerji ithalatı, emisyon ve yeşil hidrojen ihracatı faydası elde edilmektedir (Kümülatif 91,7 milyar 2022\$ ve 77,2 milyar 2022\$; 2050 yılında 12,3 milyar 2022\$ ve 5,2 milyar 2022\$). Fayda-maliyet çarpanı 2,4'e, kümülatif fayda-maliyet çarpanı 1,2'ye ulaşmaktadır. Kümülatif olarak maliyetlerin üzerinde fayda sağlanması 2045 civarında gerçekleşmektedir. Bu analizler, yeşil hidrojenin geleneksel, fosil yakıtla dayalı alternatiflerle maliyet bazında tam rekabetçi konuma gelmesinin zamanlamasıyla da geniş ölçüde uyum göstermektedir.

Yeşil hidrojenin önemli katkılarından birisi de enerji arzında yerleşme ve çeşitlendirme yoluyla enerji güvenliğinin desteklenmesidir. Ekosistemin gelişimiyle birlikte teknolojilerde yerleşme gibi alanlardaki kritik kazanımlar, fayda-maliyet çarpanını daha yukarılara taşıyacak, makro perspektifte yatırımların geri dönüşünü hızlandırabilecektir. Dünyadaki iyi uygulama örneklerine benzer mekanizmalara ilk gelişim aşamasında işlerlik kazandırılabilmesi, öngörülebilirliği ve uzun vadede kazanımları güçlendirecektir.

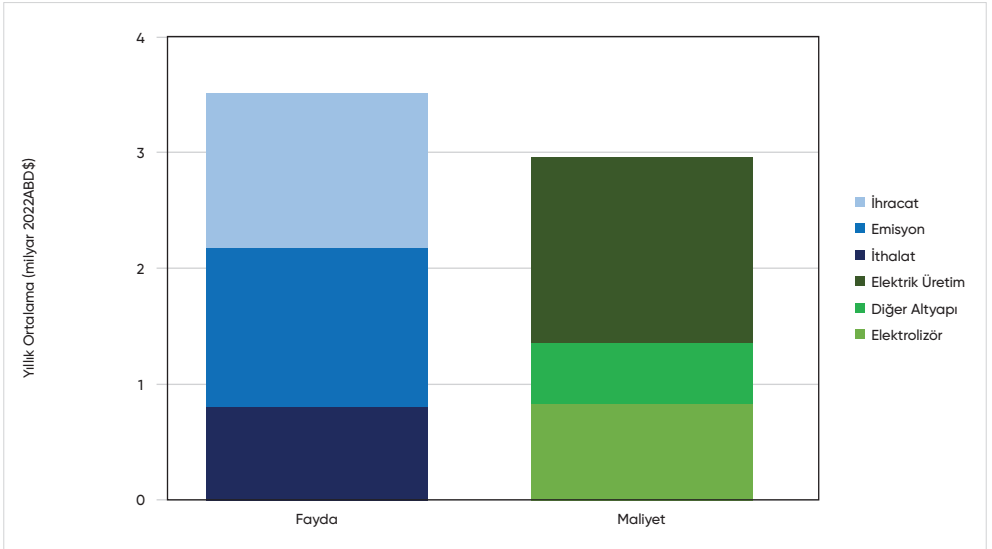
Çalışmada orta ve uzun vadede enerji ve karbon fiyatları gelişimine ilişkin farklı fiyat serilerine ek olarak, fosil yakıt ithalat ağırlığının değişimi, hidrojen ve amonyak fiyatlarının bölgesel gelişimi, talep ve altyapıların gelişim hızı gibi önemli belirsizlikler de dikkate alınarak arz ve talebin fayda ve maliyet boyutlarına ilişkin çeşitli hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Örneğin, altyapı maliyetlerinde %20 artışta fayda-maliyet çarpanı yaklaşık %5 düşerken, hidrojen ve amonyak ihracat fiyatlarında %20 yükseliş durumunda fayda-maliyet çarpanı %8 artış göstermektedir.

Yeşil hidrojeninde, kalkınma, enerji, sanayi ve iklim stratejileri ve hedefleri ile uyumlu, yenilenebilir enerji ve elektrik sektörlerinin gelişimine entegre yaklaşımlarla sağlanabilecek büyüme, güvenli ve temiz enerji geleceğine ve teknolojik gelişime çok boyutlu katkılar sunabilecektir. Tüm bu kazanımlar, kamu, özel sektör, akademi iş birlikleri içerisinde, uzun vadeli hedefleri destekleyen yol haritaları, sistem seviyesinde verimliliği ve güvenliği gözeterek teknik ve düzenleyici altyapılarda gelişim, bütüncül planlama ile desteklenen piyasa gelişimi ve yatırım ortamı, geleceğin teknolojilerinde Ar-Ge, yerleşme ve imalat yetkinlikleri, uluslararası iş birlikleri, yetkin insan kaynağı ve yenilikçi iş modelleri gibi kritik gelişim alanlarında önemli adımlar ile hayata geçirilebilecektir.

Yeşil Hidrojen İç Talebinin Sektörel Gelişimi (2023-2050, Mt/y)



Yeşil Hidrojen Gelişiminde Yıllık Ortalama Fayda ve Maliyet (2023-2050, milyar 2022\$/y)



IICEC Önerileri

IICEC, Türkiye'nin yeşil hidrojende ve ilgili teknolojilerde sahip olduğu avantajları çerçevesinde, enerji güvenliği, temiz enerji dönüşümü, rekabetçilik, yerleşme ve teknoloji-odaklı sanayi gelişimi için çok boyutlu fırsatlar sunan yüksek potansiyelinin değerlendirilmesi için,

1. Üretimde, talepte ve ilgili altyapılarda gelişim perspektifine ilişkin yol haritalarının, öncelikli sektörler ve bölgeler bazında belirlenmesini,
2. Teknik ve düzenleyici altyapıların oluşturulmasını, optimal kaynak kullanımını ve azami güvenliği temin edecek uzun vadeli master planlamaların hazırlanarak hayata geçirilmesini,
3. Değer zincirinde verimli ve öngörülebilir büyüme için piyasa ve destek mekanizmalarının, elektrik, doğal gaz, karbon piyasaları ile etkileşimler ve elektrik arz güvenliği de gözetilerek oluşturulmasını,
4. Elektrolizör, depolama ve yakıt hücresi başta olmak üzere kritik teknolojilerde fırsatların değerlendirilmesini, yerleşme ve imalat kabiliyetlerinin geliştirilmesini,
5. Uluslararası ve bölgesel iş birliklerinin güçlendirilmesini, Avrupa'nın artan talebine yönelik ihracat imkanlarının azami fayda sağlayacak değerlendirilmesini,
6. Ekosistemin genelinde, rüzgar ve güneş kaynakları ve su kullanımı, kritik mineraller ve tedarik zincirleri gibi alanlarda geniş ölçekte sürdürülebilirlik perspektifinin gözetilmesini,
7. Sürdürülebilir büyümeyi ve rekabetçiliği destekleyecek, nitelikli insan kaynağı ve yetenek havuzunun geliştirilmesini ve güçlü bir girişimcilik ekosisteminin hayata geçirilmesini önermektedir.

BÖLÜM 1:

Giriş

1.1. Neden Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği ?

Dünya, daha güvenli, temiz ve teknoloji-odaklı enerji geleceğine yönelik çabaların yoğunlaştığı bir dönemin içerisinde. Arz güvenliğini, iklimle ilişkin hedefleri ve gelişen tüketici ihtiyaçlarını gözeterek kapsamlı bir enerji dönüşümü yeni zorlukları ve fırsatları da beraberinde getirmektedir.

Enerji güvenliği, 2022 yılında yaşanan dünyanın ilk enerji krizi ve güncel jeopolitik gelişmelere ek olarak elektrifikasyonda güçlü büyümeyi destekleyecek elektrik sistemlerinin büyümesi ve esnekliği ihtiyacı, temiz enerji teknolojilerinin ve tedarik zincirlerinin güvenliği gibi yeni sınamalar sonucunda çok katmanlı bir nitelik kazanmaktadır. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında net-sıfır hedefleri yaşamsal önemini korumakta, temiz enerji yatırımlarının büyüklüğünün fosil yakıt yatırımlarının belirgin şekilde üzerinde gerçekleşmesi sonucunda dünya enerji sektörü temiz enerjinin payının hızla artacağı bir döneme girmektedir. Temiz enerjiye yönelim, enerji güvenliği arayışları sonucunda pekişirken, enerji kaynakları portföyünün yanı sıra temiz enerji ve iklim teknolojilerinde de çeşitlendirme ve yerleştirme unsurları sanayi stratejileri için de kritik öncelik durumuna gelmektedir. Çok yönlü jeopolitik gelişmeler tüm bu yönelimleri güçlendirmektedir.

Temiz hidrojene yönelimin itici unsurlarını da enerji dönüşümü planlarına baz oluşturan makro enerji, iklim, sanayi ve teknoloji dinamikleri, jeopolitik gelişmeler ve hidrojenin çok yönlü karakteristiklerinden gelen bazı avantajlar oluşturmaktadır. Yeşil hidrojene yönelimi, temiz elektrifikasyon çözümleriyle karbondan arındırılması zor olan sektörlerde sürdürülebilir enerji çözümlerine olan ihtiyaçlar güçlendirmektedir (Şekil 1.1).

- Yeşil hidrojen farklı yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilmekte, farklı formlarda depolanabilmekte, taşınabilmekte ve kullanıma sunulabilmektedir.
- Özellikle büyük ekonomiler tarafından hayata geçirilen ve giderek yaygınlaşan, destekleyici finansman ve yenilikçi iş modelleri, ilk gelişim aşamasında yeşil hidrojenin ekonomisini ve rekabetçiliğini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Söz konusu modellerde, ilgili teknolojik gelişmeler, tedarik zincirlerinin güvenliği ve sürdürülebilir büyümesi de yerleşme odaklı olarak önceliklendirilmektedir.
- Son dönemde arz, talep, altyapılar ve teknolojilere ilişkin gelişmeler, belirli sektörlerde özellikle 2030 sonrası dönemde net-sıfır patikası ile uyumlu bir büyüme zeminini güçlendirmektedir. Öngörülen büyüme perspektifleri, destekleyici modellerinin itici etkileri ile gelişirken, teknolojik gelişim fırsatlarının ve maliyetlerde düşüş perspektifinin de yeşil hidrojenin rekabetçiliğinde önemli iyileşmeler sağlaması beklenmektedir. Sürdürülebilir büyümenin, iklim güvenliği, temiz enerji gibi başlıkların ötesinde, geniş ölçekte sürdürülebilir kalkınma hedef setini de destekleyebileceği değerlendirilmektedir.

Yeşil hidrojeninde büyümenin, halen ithal fosil yakıt ve karbon yoğunluğu yüksek olan Türkiye enerji sektörünün geleceğinde de belirli sektörlerde önemli işleve sahip olması beklenmektedir. Bu yönde ilerlemeler, enerji ithalat miktarlarında ve faturasında azaltım, emisyon envanterinde düşüş ve karbon yoğunluğuna iyileşme, teknoloji-odaklı ve katma değeri yüksek büyüme, yerleşme gibi başlıklarda çok yönlü enerji güvenliği, iklim değişikliği ve teknoloji katkıları sunabilecektir.

Şekil 1.1. Yeşil Hidrojen Gelişimini Destekleyen Faktörler

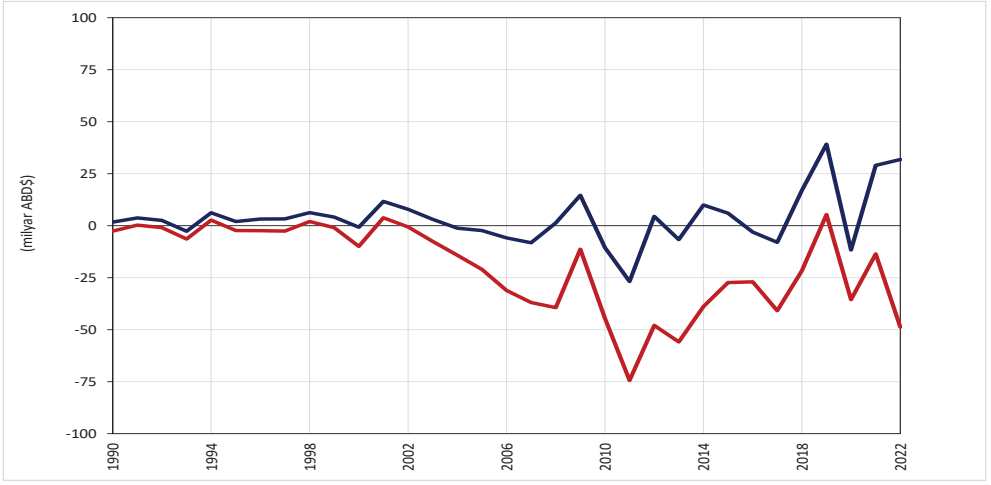


1.2. Türkiye Enerji Sektöründe Yeşil Hidrojen Gelişim için Hangi Fırsatlar Var ?

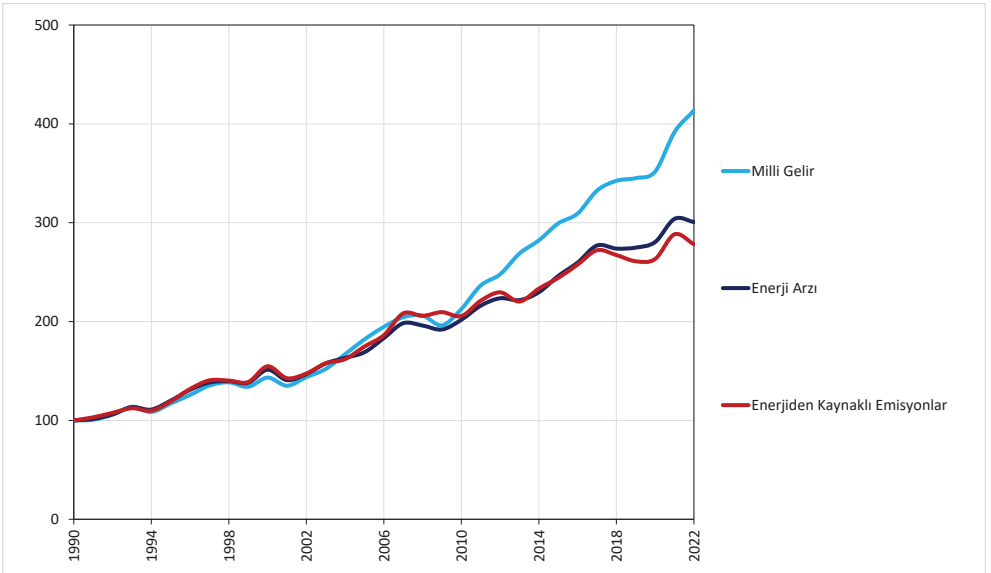
Türkiye'nin kişi başına birincil enerji tüketimi halen dünya ortalamasına oldukça yakın olmakla birlikte, diğer büyük ekonomilerle kıyaslandığında düşük seviyededir (G-20 ortalamasının yaklaşık %80'i AB ortalamasının yaklaşık %60'ı ve OECD ortalamasının yaklaşık yarısı). Türkiye Ulusal Enerji Planı'na (TUEP) göre, birincil enerji talebinin 2020-2053 döneminde yıllık ortalama %1 artış göstermesi beklenmektedir (%36 artış) (ETKB, 2022).

Genç nüfus, nüfus artışı, kentleşme, mobilite, sanayileşme gibi faktörler talepte büyümeyi desteklerken, birincil enerji arzının ve nihai enerji tüketiminin ithal-fosil yakıt yoğunluğu halen yüksek seviyelerdedir. Enerji ithalatı, cari işlemler dengesinde oldukça belirleyici durumdadır. Emisyon envanterinde büyüme devam ederken, bu büyüme ile ekonomik gelişim arasındaki ilişki de henüz belirgin şekilde değişim göstermemektedir (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3). Bu çerçevede, enerji güvenliğini pekiştiren, kapsamlı bir enerji dönüşümü için enerji ve iklim stratejileri, enerji ithalat miktarlarında ve karbon yoğunluğunda eş zamanlı olarak ve kalıcı düşüşler sağlanmasına yönelik öncelikler ve yatırım alanları ekseninde şekillenmektedir.

Şekil 1.2. Cari İşlemler Dengesi ve Enerji İthalatı Etkisi (1990-2022, milyar ABD\$)



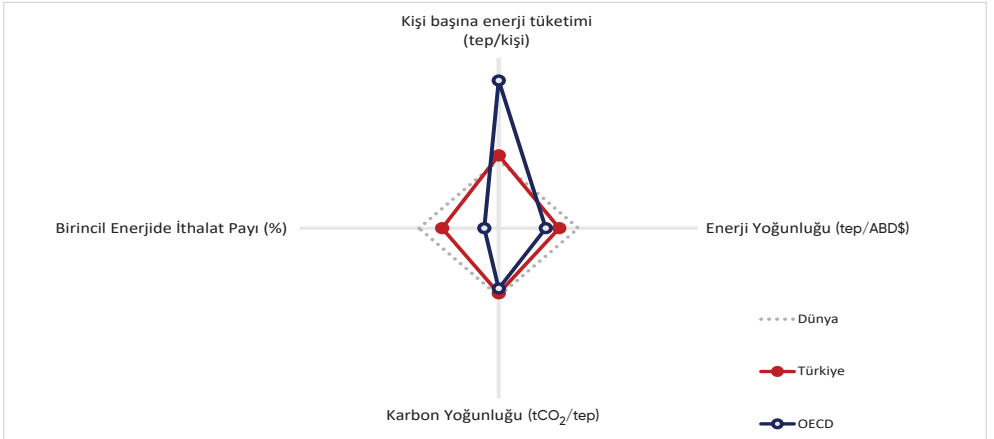
Şekil 1.3. Enerjiden Kaynaklı Sera Gazı Emisyonu, Birincil Enerji Arzı ve Ekonomik Büyüme Gelişimi (1990=100)



IICEC analizlerine göre, yüksek büyüme dinamikleri içerisinde Türkiye enerji sektörünün önümüzdeki dönemde daha güvenli, verimli, temiz ve sürdürülebilir enerji geleceğine ulaştırılabilmesi bakımından kritik olan performans göstergeleri aşağıda özetlenmektedir (Şekil 1.4).

- **Kişi başına enerji tüketimi:** OECD ve AB ortalamalarının yaklaşık yarısı seviyelerinde olan kişi başına enerji tüketiminde büyümenin güvenli, sürekli, uygun maliyetli ve rekabetçi koşullarda sağlanması,
- **Enerji yoğunluğu:** Enerji verimliliğinde özellikle son dönemde sağlanmaya başlayan önemli iyileşmelerle enerji yoğunluğunda azaltım hedeflerinin sürdürülmesi, enerjide verimli büyümenin güçlenmesi ve enerji tüketiminin katma-değeri yüksek üretime dönüşümü fırsatlarının daha hızlı şekilde değerlendirilmesi,
- **Nihai enerji tüketiminde karbon yoğunluğu:** OECD ortalamasının halen üzerinde olan karbon yoğunluğunun, büyüyen bir enerji ekosistemi içerisinde, temiz enerji kaynaklarına dayalı elektrifikasyon, yenilenebilir enerjinin doğrudan kullanımı, yenilikçi temiz enerji teknolojilerinin üretiminde ve kullanımında yaygınlaşma fırsatları, dünyadaki ve bölgedeki temiz enerji odaklı girişimler ve iş birlikleri değerlendirilerek düşürülmesi,
- **Birincil enerjide ithalat yoğunluğu:** Birincil enerji arzının üçte-ikisini oluşturan ithal fosil kaynak payının, yukarıdaki üç faktörle de yakından ilişkili olarak düşürülmesi, böylelikle kendine yeterliliğin güçlendirilmesi ve enerjide ve ekonominin genelinde güçlü, sürdürülebilir ve rekabetçi büyümenin desteklenmesi.

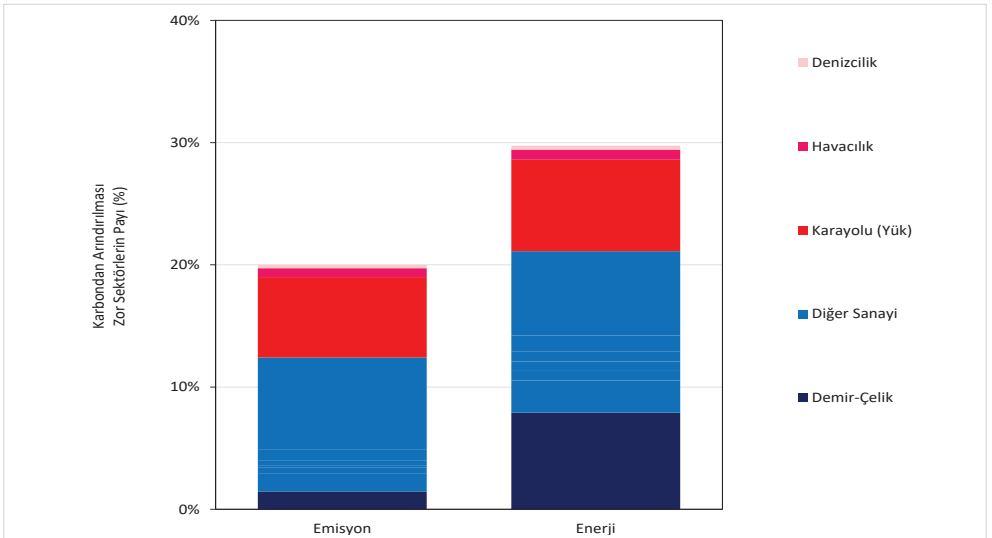
Şekil 1.4. Enerji Sektörünün Karekodu
(2022/2023, Dünya=1:1:1:1, tep/kişi, tep/ABD\$, tCO₂/tep, %)



Elektrifikasyon yoluyla karbondan arındırılmalarında zorluklar nedeniyle yeşil hidrojenin potansiyel talep alanları olan sektörler, Türkiye toplam nihai enerji talebinin yaklaşık %30'una, enerjiden kaynaklı sera-gazı emisyon envanterinin yaklaşık %20'sine karşılık gelmektedir (Şekil 1.5). Son dönemde dünya genelinde temiz enerji dönüşümüne yönelik hedefler, AB özelinde son dönemde işleyiş kazanan SKDM ve karbon fiyatlandırmasına ilişkin gelişmeler çerçevesinde, Türkiye endüstrisinin rekabetçiliğinin sürdürülebilirliği bakımından da kritik bir döneme girilmiştir. SKDM ilk fazı faaliyete geçmiş olup, önümüzdeki dönemde fosil yakıt yoğunluğu yüksek, aynı zamanda Türkiye'nin ihracatta rekabetçiliği bakımından kritik olan sanayi sektörlerinin karbon yoğunluğunun düşürülmesine yönelik teknolojiler ve yatırımlar daha fazla önem kazanmaktadır. Otomotiv sektörünün dünyadaki ve Avrupa'daki gelişmeler ile uyumlaşması, mobilitede küresel ve bölgesel temiz enerji yönelimleri, lojistikte Türkiye'nin konumu gibi dinamikler neticesinde de karayolu, havacılık ve denizcilikte benzer dinamikler giderek güçlenmektedir.

Türkiye'nin sosyo-ekonomik gelişim dinamikleri ve makro ekonomik dengeleri bakımından kritik olan bu sektörlerin gelecekteki enerji taleplerinde fosil yakıt ağırlığının düşürülebilmesi, güvenli enerji dönüşümünü ve net-sıfır emisyon hedeflerini eş zamanlı olarak destekleyecek bir gelişim patikasının en önemli bileşenlerinden birisi konumundadır. Bu yönde gelişmeler, özellikle enerji arzında çeşitlendirmenin artırılmasına, enerji güvenliğinin güçlendirilmesine, enerji ithalat hacimlerinin ve faturasının azaltılmasına ve karbon yoğunluğunun düşürülmesine yönelik hedeflere önemli katkı sunacaktır.

Şekil 1.5. Karbondan Arındırılması Zor Sektörler, Nihai Enerji Talebi ve Sera Gazı Emisyon Envanterinde Payları (%)



1.3. Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Geleceği için Güçlü Yönleri Neler ?

Genç nüfus, sanayileşme, kentleşme ve mobilite gibi dinamiklerle desteklenerek artan enerji talebi ve enerji sektöründe yüksek büyüme potansiyeline sahip Türkiye, Avrupa'nın en büyük, dünyanın ise en dinamik enerji piyasalarından birisi konumuna gelmiştir. Enerji politikaları, stratejiler ve yatırımlar, arz güvenliği, rekabetçilik ve yerleşme odaklı gelişirken, 2053 net-sıfır emisyon hedefinin açıklanması ile birlikte enerji dönüşümü ve enerji piyasalarında ilerlemeler yoluyla önümüzdeki otuz yıl içerisinde daha güvenli, temiz ve rekabetçi enerji geleceği fırsatları bakımından önemli bir döneme girilmiştir. Türkiye'nin dinamik enerji piyasası içerisinde, elektrifikasyon yoluyla karbondan arındırılması zor sektörlerin enerji talebinde büyüme ihtiyacı yeşil hidrojen tüketimi bakımından potansiyel oluştururken, son dönemde kalkınma, enerji, iklim ve sanayi stratejilerinde yeşil hidrojenin önemi artmaktadır.

12. Kalkınma Planı (2023), Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022) ve Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023), yeşil hidrojenin üretimine, karbondan arındırılması zor sektörlerde tüketimine, ilgili altyapıların ve teknolojilerin gelişimine yönelik önemli hedefler ve açılımlar sunmaktadır.

Teknolojilerde gelişim ve yeni iş modelleri başta olmak üzere küresel ve bölgesel gelişmeler, Türkiye'de sanayide ve geniş ekosistemde iş birlikleri yoluyla yeni girişimler ve projeler ekseninde de hidrojen değer zincirinde gelişim odağı güçlenmektedir. Güçlü ve yaygın yenilenebilir enerji potansiyeli, verimli ve rekabetçi yeşil hidrojen üretimi bakımından önemli avantajlar getirmektedir. Son dönemde rüzgar ve güneş alanlarında yerleşmede sağlanan gelişmeler yeni enerji teknolojilerinde yerleşme bakımından önemli deneyim sunmakta, yeşil hidrojenin geleceği bakımından kritik teknolojilerde gelişim ve yerleşme fırsatları için güçlü bir zemin oluşturmaktadır.

Avrupa pazarlarının yüksek yeşil hidrojen talebi, ithalat ihtiyacı ve ithalatta çeşitlendirme hedefleri Türkiye'nin yeşil hidrojen geleceğinde bölgesel konumunu desteklemekte, iç tüketim sektörlerinin kullanımı öncelikli olmak üzere ihracat bakımından yeni fırsatlar getirmektedir. Türkiye'nin makro enerji ticaret merkezi perspektifi ve politika belgelerindeki ilgili hedefler de önümüzdeki dönem için bu vizyonu desteklemektedir (Şekil 1.6).

Şekil 1.6. Yeşil Hidrojende Türkiye'nin Güçlü Yönleri



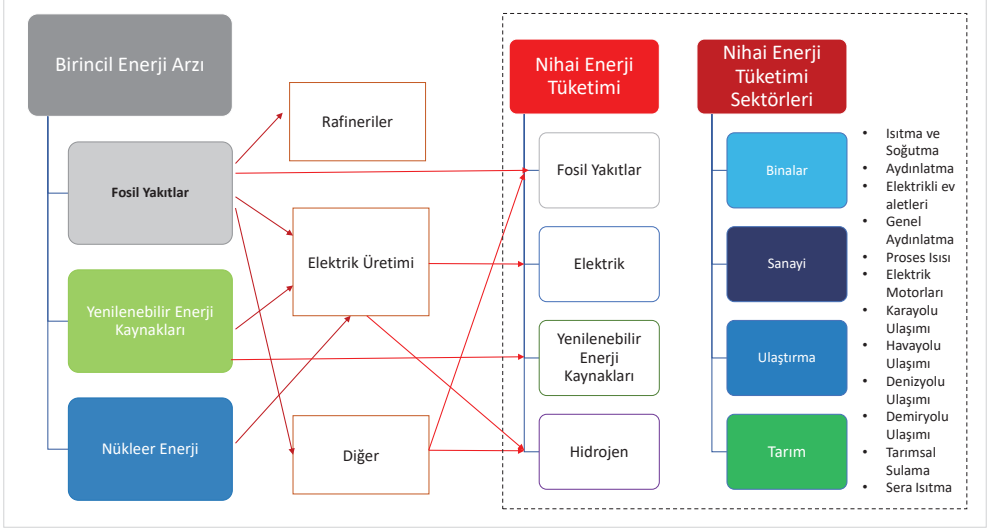
1.4. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojende Büyüme Perspektifi Ne Gösteriyor ?

"Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği", IICEC tarafından Türkiye'de bir ilk olarak yayımlanan Türkiye Energy Outlook (Türkiye Enerji Görünümü) çalışmasının ve IICEC Enerji Modeli ile Türkiye enerji ekonomisinin detaylı bir envanteri üzerine kurulmuştur. Bütüncül modelleme çerçevesinde, enerji arz ve talep zincirinin tamamını kapsayan bir veri tabanından yararlanılmıştır.

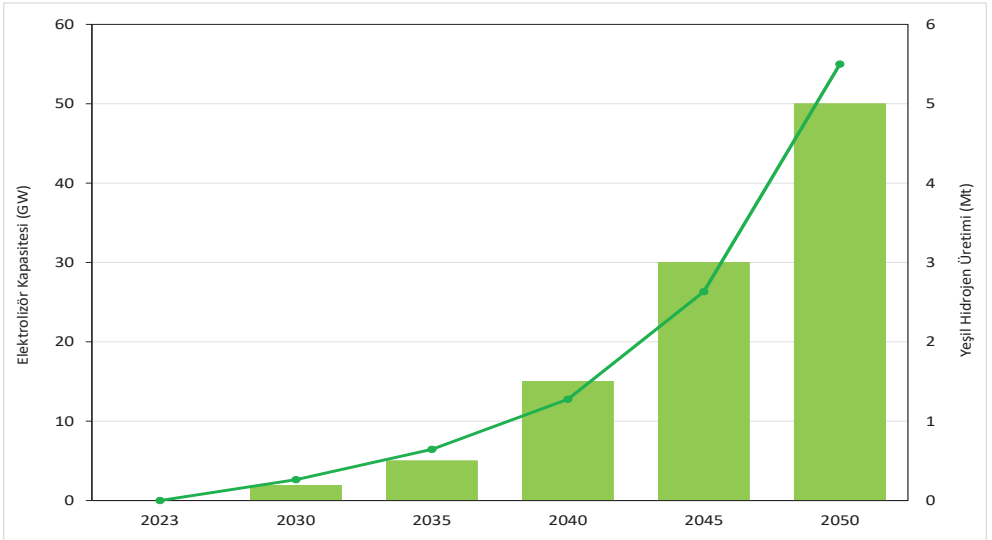
Modelleme ve analizler, küresel ve bölgesel enerji ve iklim dinamiklerini, Türkiye'nin güncel kalkınma, enerji, sanayi ve iklim politikalarındaki kritik öncelikleri ve yönelimleri, enerji piyasalarındaki ve teknolojilerdeki ihtiyaçları, beklentileri ve ilerlemeleri yansıtmaktadır (Şekil 1.7).

IICEC modeli ve analizleri, yeşil hidrojen üretiminde Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası'ndaki elektrolizör kurulum hedeflerini baz almaktadır. Bu kapsamda, 2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW ve 2053 yılında 70 GW hedefleri içerisinde 2050-2053 yıllarına kadar olan dönemde 50-70 GW elektrolizör kapasitesine ulaşan büyüme perspektifinde üretim 2030 yılından itibaren her beş yılda yaklaşık iki kat artış göstermekte ve yeşil hidrojen üretiminin 2035 yılında 0,6 Mt ve 2050 yılında 5,5 Mt seviyesinde gerçekleşebileceği öngörülmektedir (Şekil 1.8). 2050 yılında söz konusu kapasite ve üretim miktarları, IEA NZE (Net Zero Emissions) Senaryosunda öngörülen küresel kapasitenin ve üretimin yaklaşık %2'sine karşılık gelmektedir (Şekil 1.9).

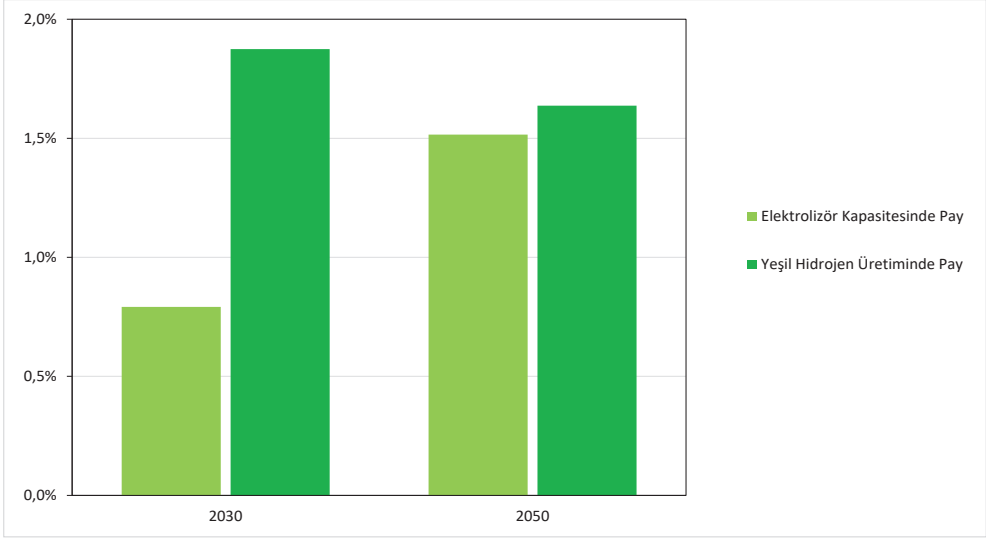
Şekil 1.7. IIEEC Modelleme ve Analiz Perspektifine Genel Bakış



Şekil 1.8. Elektrolizör Kapasitesi ve Yeşil Hidrojen Üretimi Gelişimi (2023 – 2050, GW, Mt)



Şekil 1.9. Türkiye'nin Elektrolizör Kapasitesi ve Yeşil Hidrojen Üretiminde Küresel Payı (2030, 2050, %)

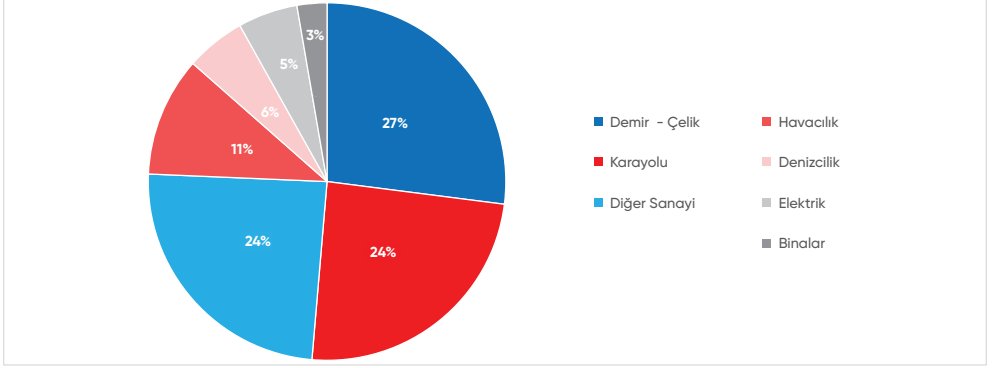


Yeşil hidrojen üretiminin elektrik ve su yoğunluğu yüksektir. Hedeflenen elektrolizör kapasiteleri ve buna dayanan üretim analizlerinde, elektrik girdisinde de özellikle 2030 yılı sonrası dönemde hızlı bir artışa işaret etmektedir. Bu çerçevede, elektrolizör kapasitesi için gereken elektrik enerjisi miktarı brüt elektrik talebinin 2050 yılında yaklaşık %20'sine karşılık gelecektir 2050 yılında 50 GW elektrolizör kurulumu ve 5,5 Mt yeşil hidrojen üretimi için kurulu güç gereksiniminin ise 90-100 GW mertebesinde gerçekleşmesi beklenmektedir. Özellikle ilk gelişim aşamasında elektrolizör kurulum hedeflerinin, elektrifikasyonda gelişime ve elektrik arz güvenliğine yönelik stratejiler, yatırımlar ve özellikle rüzgar ve güneş kurulu güçlerinde artışa yönelik hedefler ile entegre olarak planlanması gerekecektir. 2050 yılına kadar olan dönemde elektrolizör hedeflerini desteklemek üzere toplam su gereksinimi, sürdürülebilir büyümeyi teminen ağırlıklı bölümü deniz suyu olmak üzere 1,5 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır. Yeşil hidrojen üretimi için gereken su girdisinin tamamının yeraltı suyu olması, mevcut yeraltı suyu tüketiminin %6'sına eşdeğer tüketim gerektirecektir.

Yeşil hidrojen talebinde ilk önemli gelişmelerin, mevcutta gri hidrojen tüketicileri olan rafineri ve gübre sektörlerinde dönüşümden ve AB Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'nın sanayinin rekabetçiliği üzerinde etkileriyle özellikle 2030 sonrası dönemde çelik başta olmak üzere sanayide gerçekleşmesi beklenmektedir. Karayolu, denizyolu ve havacılık taleplerinin de üretim, ihracat ve istihdam bakımından kritik sektörlerden olan otomotiv sektörünün dünyadaki ve Avrupa'daki gelişmeler ile uyumlaşması, mobilitede temiz enerji yönelimlerinin artması, lojistik alanında Türkiye'nin konumu çerçevesinde güçlenmesi öngörülmektedir. 2050-2053 döneminde 3,8 Mt toplam yeşil hidrojen talebinin yaklaşık %90'u sanayide ve ulaşımda gerçekleşmektedir.

Doğal gazla karışım hedeflerini, temiz elektrifikasyon ve verimli ısı pompası çözümlerini yansıtan IICEC analizlerinde binaların toplam yeşil hidrojen tüketiminde payının 2050 yılında %3 olacağı, elektrik sektöründe ise sistem esnekliğini destekleyecek, depolama çözümleri ile değeri yaratılabileceği görülmektedir (Şekil 1.10).

Şekil 1.10. Yeşil Hidrojen Talebinin Sektörel Kırılımı (2050, %)



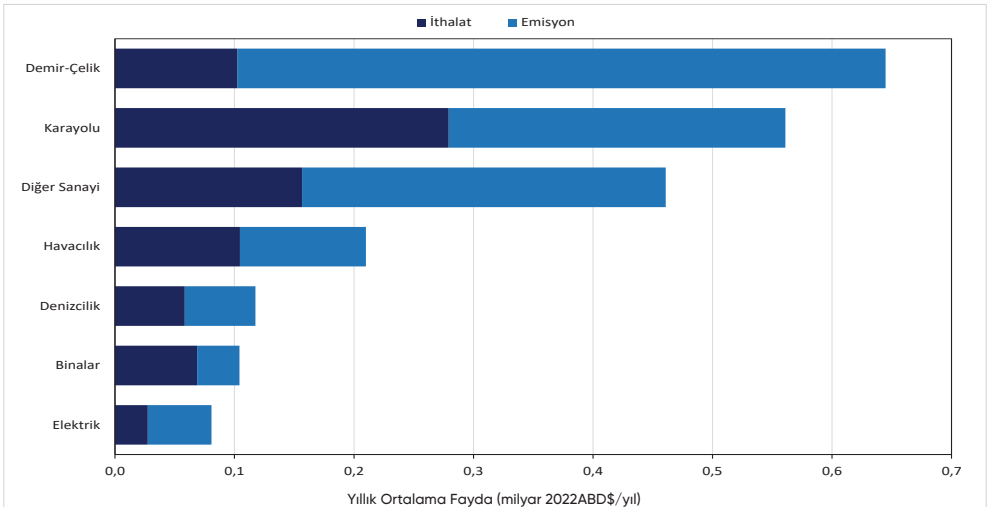
1.5. IICEC Analizlerinde Bütüncül Fayda-Maliyet Perspektifi Neye İşaret Ediyor ?

Yeşil hidrojen gelişim patikası, özellikle teknolojilerde olgunluğun, üretim ekonomisinin ve rekabetçiliğin geliştiği 2030-2035 sonrası dönemden itibaren çok boyutlu enerji ve iklim faydaları sağlayabilecektir. 2050 yılına kadar olan dönemde yeşil hidrojenin petrol ürünleri, doğal gaz ve kömür ikamesi yoluyla fosil yakıt tüketiminde sağlanacak 81,0 Mtep eşdeğeri tasarruf, nihai enerji tüketiminde mevcut yıllık fosil yakıt tüketimine eşdeğerdir. Bu tasarruf yoluyla, 2050 yılına kadar enerji ithalat faturasında yıllık ortalama 0,8 milyar 2022ABD\$ düşüş sağlanabilmektedir (IEA STEPS fiyat serileri ile ve 2050 yılında 3,1 milyar 2022ABD\$. IEA APS Senaryosu fiyat serilerine göre söz konusu kazanım yıllık ortalama 0,6 milyar 2022ABD\$'a karşılık gelmektedir. IICEC analizleri petrol ve doğal gazda yerli üretimde artış hedeflerini dikkate almaktadır. Bu kapsamda petrol ve doğal gazda gelecekteki talebi karşılayacak yerli üretim oranları önümüzdeki dönemde %35 oranında yükselmektedir. Fosil yakıt arzında mevcut ithalat ağırlığının devam etmesi durumunda ise yıllık ortalama ithalat tasarrufu 1,1 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmaktadır.) Yeşil hidrojenin karbondan arındırılması zor sektörlerde kömür, petrol ve doğal gazı ikame etmesi yoluyla 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarında 287,2 Mt CO₂-eş azaltım gerçekleşmektedir. Bu miktar, karbondan arındırılması zor sektörlerin mevcut yıllık emisyon envanterinin üç katından daha yüksektir. Yeşil hidrojeninde büyüme net-sıfır hedefini desteklerken, 2050 yılına kadar olan dönemde emisyon azaltımları ile sağlanacak tasarrufun parasal karşılığı yıllık ortalama 1,4 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmaktadır (IEA STEPS Senaryosu karbon fiyat serileri ile ve 2050 yılında 4,8 milyar 2022ABD\$. IEA APS Senaryosuna göre yıllık ortalama 1,8 milyar 2022ABD\$).

Yeşil hidrojeninde sürdürülebilir bir üretim ve talep gelişim perspektifi içerisinde enerji ithalat faturasında ve emisyon maliyetlerinde düşüşler yoluyla baz fiyat serilerine göre yılda ortalama 2,2 milyar 2022ABD\$ ekonomik fayda sağlanabilmektedir. Çelik sektörü en yüksek toplam yıllık ortalama kazanımı oluştururken (640 milyon 2022ABD\$/yıl veya yaklaşık %30), talep büyüklüklerinin kısımlı ile benzer şekilde karayolu ulaşımı ve diğer sanayi sektörlerinde yeşil hidrojen tüketiminde yaygınlaşmanın sağladığı ekonomik kazanımlar bunu takip etmektedir (karayolu ulaşımı 560 milyon 2022ABD\$/yıl ve diğer sanayi sektörleri 460 milyon 2022ABD\$/yıl). Bu üç sektör, 2050 yılına kadar olan dönemde ortalama talebin yaklaşık %80'ini ve ortalama yıllık kazanımın yaklaşık dörtte-üçünü oluşturmaktadır.

Fosil yakıt tasarrufundan kaynaklı ortalama kazanımlarda karayolu ulaşımı 280 milyon 2022ABD\$/yıl ile öne çıkarken, çelik ve diğer sanayi sektörlerinde bu tutar sırasıyla 100 milyon 2022ABD\$/yıl ve 180 milyon 2022ABD\$/yıl olarak gerçekleşmektedir. Ortalama yıllık emisyon tasarruflarında, kömür tüketiminin yüksek karbon yoğunluğu ve ikame miktarı çerçevesinde çelik sektörü 540 milyon 2022ABD\$/yıl ile ilk sırada yer almaktadır. Bunu sırasıyla diğer sanayi sektörleri (300 milyon 2022ABD\$/yıl) ve karayolu ulaşımı (280 milyon 2022ABD\$/yıl) izlemektedir. Havacılık ve denizcilikte toplam ithalat ve emisyon tasarrufu faydası yıllık ortalama 330 milyon 2022ABD\$ seviyesinde gerçekleşmektedir. 2050 yılına kadar kümülatif 56,6 milyar 2022ABD\$ faydanın yaklaşık %90'ı ulaşım ve sanayi sektörlerinde sağlanmaktadır (Binalar ve elektrik sektörü yaklaşık %10). (Şekil 1.11). AB'ye ihracat ile sağlanabilecek ekonomik fayda ise yıllık ortalama 1,3 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmakta, 2050 yılında yıllık ortalama fayda 4,4 milyar 2022ABD\$a çıkmaktadır. AB'ye ihracat, 2050 yılına kadar üretimin %30'una karşılık gelirken toplam ekonomik faydanın yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır.

Şekil 1.11. Sektörler Bazında İthalat ve Emisyon Tasarruflarından Yıllık Ortalama Kazanımlar (2023-2050, Milyar 2022ABD\$/yıl)



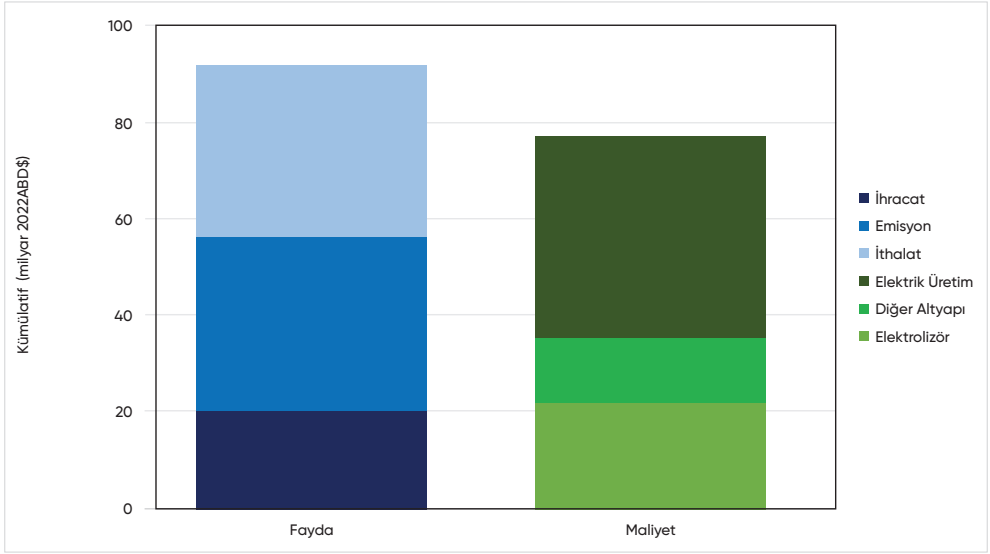
2050 yılına kadar yıllık ortalama yaklaşık 3,0 milyar 2022ABD\$ yatırım gereksiniminin yaklaşık yarısını elektrik üretimi yatırımları oluşturmakta (1,6 milyar 2022ABD\$), elektrolizör kurulumları için 0,8 milyar 2022ABD\$ ve diğer altyapılar için 0,6 milyar 2022ABD\$ yatırım hesaplanmaktadır. Teknolojilerinde gelişim beklentileri ile sağlanacak birim maliyet düşüşleri, 2050 yılına kadar olan dönemde toplam elektrolizör maliyetlerinde önemli iyileşmeler sağlarken, altyapıda gelişimin hızı ve optimizasyonu toplam maliyet seviyeleri bakımından kritik olmaktadır. Dönemsel elektrik talebinin üzerinde kesintili elektrik üretimi durumunda kapasitelerde elektrik talebi üzerinde üretim imkanının yeşil hidrojen üretim için değerlendirilebileceği bir arz-talep gelişim senaryosunda, hidrojen üretimine özel kurulu güç gelişim ihtiyacında düşüş, toplam maliyet seviyelerini azaltabilecektir.

2050 yılına kadar olan dönemde yıllık ortalama 3,0 milyar 2022ABD\$ yatırım karşılığında 3,5 milyar 2022ABD\$ enerji ithalatı, emisyon ve yeşil hidrojen ihracatı faydası elde edilmektedir. Bu dönemde kümülatif fayda 91,7 milyar 2022ABD\$, kümülatif maliyet ise 77,2 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmaktadır. Orta ve uzun dönemde maliyetlerin üzerinde kazanımlar sağlanmakta, 2050 yılında 12,3 milyar 2022ABD\$ fayda, 5,2 milyar 2022ABD\$ maliyet ile gerçekleşmektedir.

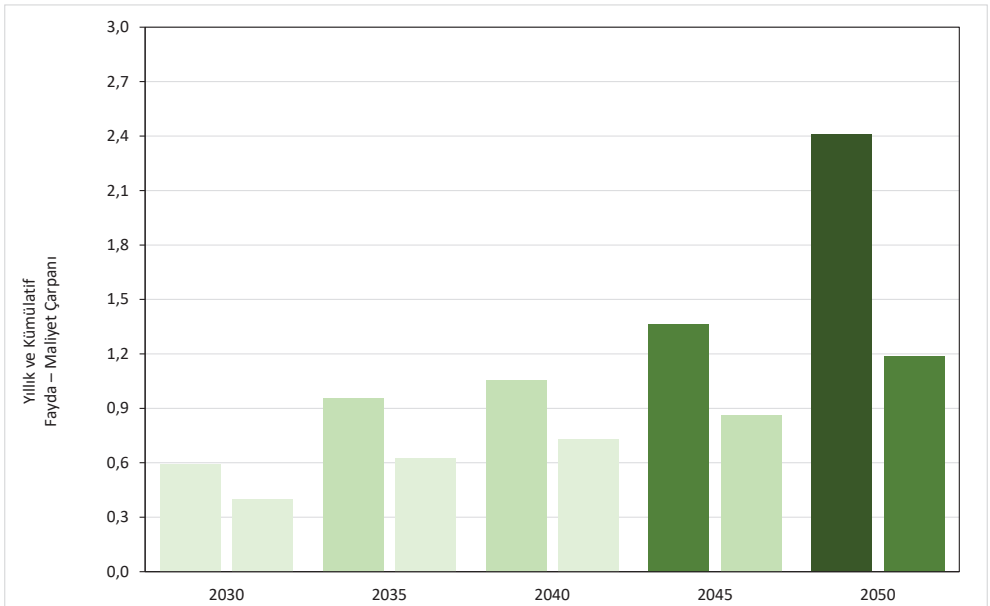
Fayda-maliyet çarpanı 2035 yılında 1'e ulaşmakta, 2045 yılında 1,5'e yaklaşmakta ve 2050 yılında 2,4'e ulaşmaktadır. Kümülatif olarak fayda-maliyet çarpanı 2040 yılına doğru 1'e yaklaşmakta, maliyetlerin üzerinde fayda sağlanması 2045 civarında gerçekleşmektedir 2050 yılına kadar olan dönemde kümülatif fayda-maliyet çarpanı 1,2 olmaktadır (Şekil 1.12 ve Şekil 1.13).

Yeşil hidrojenin geleneksel, fosil yakıtlara dayalı alternatiflerle maliyet bazında tam rekabetçi konuma gelmesinin zamanlamasıyla da uyum gösteren analizler, gelişimin önemli faydalarından birisinin enerji arzında yerleşme ve çeşitlendirme yoluyla enerji güvenliğinin desteklenmesi olacağını göstermektedir. Yeşil hidrojen 2050 yılında enerji talebinin ulaşımında %11'ine, sanayide ise %8'ine yükselmektedir. 2050 yılında nihai enerji talebinin %6'si yeşil hidrojenden sağlanabilmektedir (Dünya ortalaması IEA APS Senaryosunda %3 ve IEA NZE Senaryosunda %8).

Şekil 1.12. Kümülatif Fayda-Maliyet Gelişimi (2023-2050, Milyar 2022ABD\$)



Şekil 1.13. Yıllık ve Kümülatif Fayda-Maliyet Çarpanı Gelişimi (2023-2050)

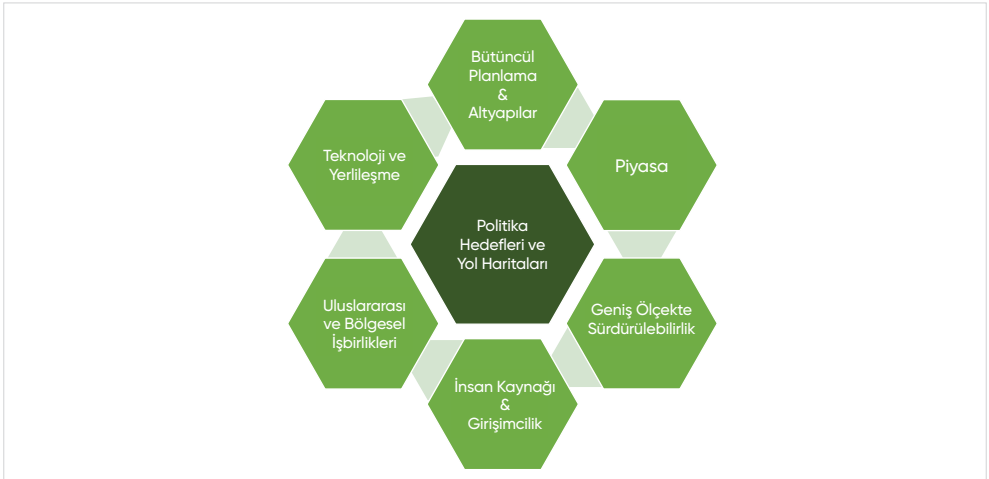


1.6. Yeşil Hidrojenle Çok Yönlü Faydalar için Gelişim Alanları Neler ?

Sunulan gelişim patikası enerjide yerleşme yoluyla enerji güvenliği ve karbon yoğunluğunda sürdürülebilir azalma sayesinde temiz enerji dönüşümünü desteklemektedir. Temiz elektrifikasyon, doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil hidrojenin toplam nihai enerji talebine son dönemde %10-%15 seviyesinde gerçekleşen katkısı 2050-2053 yıllarına kadar %70-75'e çıkabilmektedir. Türkiye'nin yeşil hidrojenle stratejik önceliklerinin hayata geçirilmesi, yüksek büyüme ve gelişim potansiyelinin sürdürülebilir koşullarda değerlendirilebilmesi için önemli gelişim alanları bulunmaktadır. Bu çalışmada sunulan analizler, enerji güvenliği, teknoloji-odaklı enerji dönüşümü ve net-sıfır hedeflerine katkı bakımından çok yönlü faydaları göstermektedir. Tüm bu kazanımlar, kamu, özel sektör, akademi iş birlikleri içerisinde, uzun vadeli hedefleri destekleyen yol haritaları, sistem seviyesinde verimliliği ve güvenliği gözetilen teknik ve düzenleyici altyapılarda gelişim, bütüncül planlama ile desteklenen piyasa gelişimi ve yatırım ortamı, geleceğin teknolojilerinde Ar-Ge, yerleşme ve imalat yetkinlikleri, uluslararası iş birlikleri, yetkin insan kaynağı, yenilikçi iş modelleri, su tüketimi ve kritik malzemelerin tedarik zincirlerinin güvenliği yoluyla sürdürülebilirlik gibi kritik gelişim alanlarında, önemli adımlar ile hayata geçirilebilecektir.

Yeşil hidrojen değer zincirinde, üretime, talebe ve altyapılara yönelik olarak, enerji sektörünün ve ilişkili sektörlerin öncelikli ihtiyaçları ve yeşil hidrojen üretimini destekleyecek enerji kaynakları ve teknolojileri potansiyelleri ile uyumlu, ulaşılabilir kısa, orta ve uzun dönem hedeflerinin belirlenmesi güvenli, teknoloji-odaklı enerji geleceğine ve kapsayıcı enerji dönüşümüne çok boyutlu katkıların gerçekleşmesi için en önemli itici unsuru oluşturacaktır. Optimal kaynak kullanımını ve öngörülebilirliği temin edecek şekilde, sektörel ve bölgesel önceliklerin ve bunlara ilişkin yol haritalarının belirlenmesi, fayda-maliyet çarpanını artıracaktır (Şekil 1.14).

Şekil 1.14. Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği Çalışmasında Belirlenen Gelişim Alanları



1.7. Çalışmanın İçeriği

Çalışma 5 Bölümden oluşmaktadır.

- Bölüm 2’de dünyada öne çıkan enerji, iklim ve sanayi dinamikleri ile yeşil hidrojenle mevcut durum, büyümeyi destekleyen faktörler ve gelecek beklentileri, hidrojen teknolojilerine ilişkin bilgiler ile birlikte sunulmaktadır.
- Bölüm 3’te Türkiye enerji sektörüne bütüncül bir bakış çerçevesinde, enerji arzında ve talebinde gerçekleştirmeler, güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerji geleceği hedefleri ve iyileşme alanları ile birlikte analiz edilmektedir. Son dönemde hidrojene yönelik politikalarda ve hidrojen ekosisteminde öne çıkan gelişmeler sunulmaktadır.
- Bölüm 4’te Türkiye’de yeşil hidrojen üretimi ve talebinin uzun vadeli gelişim perspektifi analiz edilerek, enerji güvenliğini ve net-sıfır hedeflerini esas alan enerji dönüşümü için çok boyutlu faydalar, bütüncül fayda-maliyet yaklaşımları çerçevesinde sunulmaktadır.
- Bölüm 5’te yeşil hidrojenle gelişim alanları irdelenerek, sürdürülebilir büyümeyi ve çok boyutlu faydaları sağlayacak iyileşme fırsatları ve IJCEC önerileri sunulmaktadır.

BÖLÜM 2:

Hidrojene Küresel &
Bölgesel Bakış

2.1. Küresel Enerji ve İklim Dinamikleri

Enerji maliyetlerinde 2021'den itibaren özellikle jeopolitik etkenler ile yaşanan yüksek artış trendi, enerji fiyatları, tüm enerji piyasaları ve genel makro-ekonomik dengeler üzerinde etkisini korumaktadır (IEA, 2023a; IMF, 2023; WB, 2023). 2022 yılında çok hızlı yükselen enerji fiyatlarının 2023 yılında kısmi düşüşler ile birlikte Covid-19 pandemisi öncesi seviyelere yaklaşmasına karşın, yakın ve orta dönem fiyat dinamiklerine ilişkin arz talep ve jeopolitiğe bağlı belirsizlikler sürmektedir (Şekil 2.1). Son dönemde petrol ve doğal gaz başta olmak üzere fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalara ek olarak, elektrifikasyonda güçlü büyümeyi destekleyecek elektrik sistemlerinin güvenliğinin ve esnekliğinin sağlanması, gelişmekte olan temiz enerji teknolojilerinin tedarik zincirlerinin güçlendirilmesi gibi faktörler neticesinde enerji güvenliği paradigması geçmişe göre daha karmaşık ve çok katmanlı bir nitelik kazanmaktadır. Güvenli ve sürekli enerji tedariki için arz güvenliğine ilişkin risklerin yönetilmesi, özellikle birincil enerji kaynakları bakımından ithalatçı olan ülkeleri kendi kaynaklarını daha yüksek oranda kullanmaya, ithal enerji portföyünde çeşitlendirmeye ve teknolojilerde yerleşme arayışlarına yönlendirmektedir.

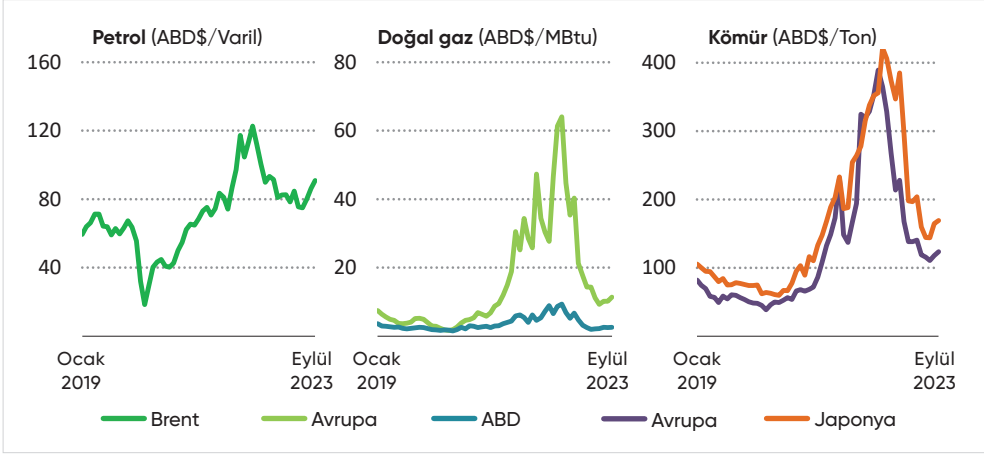
Enerji dinamikleri bakımından diğer bir kritik bir öncelik ise iklim değişikliği ile mücadele, hızla artan iklim risklerinin yönetilebilmesi, bunun için de enerji sektörünün net-sıfır emisyon patikasında ilerlemesinin sağlanabilmesidir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından yayımlanan en son raporda, insan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklı sera gazı emisyonlarının, iklim değişikliğinin tartışmasız şekilde nedeni olduğu detaylı bilimsel analizlerle ortaya konulmaktadır. Gözlemleri ve gelecek senaryolarını baz alan analizlerde, sıcaklıklardaki artışların devam etmesi durumunda aşırı iklim olaylarının daha sık ve şiddetli duruma geleceği, bunun sonucunda da ekonomik kayıplardan sağlık etkilerine, yaşam alanlarında ve biyoçeşitlilikte bozulmaya kadar, dünyanın sürdürülebilirliğini tehdit eden çok sayıda olumsuz etkinin tüm bölgelerde hızla yaygınlaşacağı belirtilmektedir (IPCC, 2023).

Küresel sıcaklığın sanayileşme öncesi döneme (1850-1900) kıyasla 1,2 °C arttığı tespit edildiği analizler, iklim değişikliği ile mücadele bakımından kritik olan 1,5 °C hedefini karşılayabilmek için zamanın daraldığını göstermektedir. Enerji sektörünün karbondan arındırılabilmesi için güçlü ve sürekli ilerlemelere, iklim-odaklı bir gelişim perspektifine ihtiyaç bulunmaktadır (IPCC, 2023). Enerjiden kaynaklı CO₂ emisyonları 2022 yılında pandemi-öncesi seviyeleri aşarak yeni bir rekor göstermiştir (37 Gt CO₂). 2019-2022 döneminde enerji sektöründen kaynaklı 140 Gt CO₂ salımı gerçekleşmiştir (Şekil 2.2). Temiz enerji teknolojilerinin gelişimi ve yayılımı yoluyla enerji değer zincirinde fosil yakıtlar ve emisyon yoğunluklarının azaltılması, iklim değişikliği ile mücadelenin en temel bileşenidir (IEA, 2023b; IEA, 2023c; IPCC, 2023).

Enerji sektörü yatırımlarının son dönemdeki gelişimi incelendiğinde, temiz enerji yatırımlarında 2020 yılından itibaren güçlü bir büyüme sağlandığı, bu büyümede iklim hedeflerinin yanı sıra, ülkelerin enerji güvenliğini güçlendirmek üzere yerli temiz enerji kaynaklarına ve teknolojilerine odaklanan stratejilerin de önemli rol oynadığı görülmektedir. Temiz enerji yatırımlarının toplam enerji yatırımlarından aldığı pay 2018 yılında %50 civarındayken, 2023 yılında yaklaşık 1,8 trilyon 2022ABD\$ ile üçte-ikiye ulaşmıştır (IEA, 2023a).

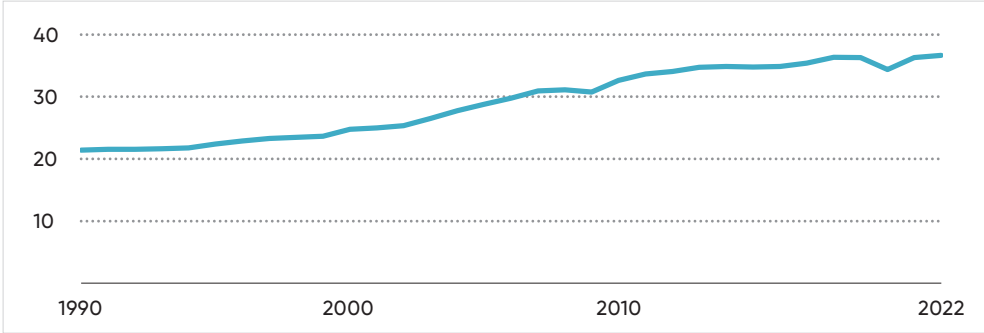
¹ IPCC

Şekil 2.1. Enerji Emtia Fiyatlarının Gelişimi
(ABD\$/v, ABD\$/MBtu, ABD\$/t, Ocak 2019– Eylül 2023)



Kaynak: IEA, 2023a

Şekil 2.2. Enerjiden Kaynaklı Küresel CO₂ Emisyonlarının Gelişimi (1990 – 2022, Gt)



Kaynak: IEA, 2023a

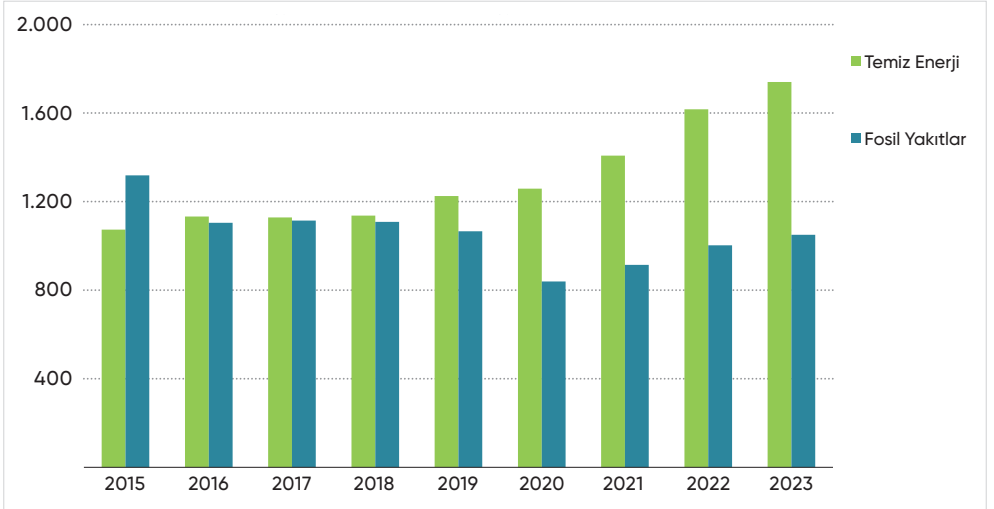
Son beş yıl içerisinde dünya genelinde enerji yatırımlarında artışın çok büyük bölümünün güneş başta olmak üzere yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, elektrikli araçlar ve diğer temiz elektrifikasyon alanları gibi, enerji ve iklim güvenliğine eş zamanlı katkı sağlayan segmentlerde gerçekleştiği görülmektedir. (IEA, 2023a; IEA, 2023d) (Şekil 2.3) (Detaylar için lütfen Bölüm 2.4'e bakınız). Daha geniş bir ölçekten bakıldığında, sürdürülebilirlik kavramının dünya genelinde önemini artırdığı, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları ile enerjinin pek çok sürdürülebilir kalkınma hedefi² ile doğrudan veya dolaylı olarak yakından ilişkili olduğu görülmektedir (UN, 2023).

² Sustainable Development Goals

Modern ve temiz enerjiye erişimin gelişimi ve iklim eylemi, düşük karbonlu enerji arz ve talep seçeneklerini öne çıkarmaktadır. Hava kalitesinden, adil dönüşüme ve nitelikli istihdama, kentleşme ve ulaşım stratejileri ile entegre sürdürülebilirlik perspektiflerine kadar BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını tanımlayan pek çok alanda, daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerjinin önemi artmaktadır (IICEC, 2022).

Enerji ve iklim dinamikleri ile yakından ilişkili diğer bir gelişim alanı ise teknoloji ve sürdürülebilirlik odaklı yeni sanayi paradigması ve bunun etrafında geliştirilen yeni stratejiler, destekler ve yenilikçi iş modelleridir. İklim duyarlı, sürdürülebilir gelecek perspektifini temel alan bu yönelimler, aynı zamanda enerji güvenliği önceliklerini de destekleyecek şekilde kurgulanmaktadır. Temiz enerji ve iklim konularında, yenilikçi ve büyüme potansiyeli yüksek teknolojilerde yerli üretim imkanlarının, daha esnek, aynı zamanda yerlilik oranı yüksek tedarik zincirlerinin, yetkin insan kaynağının ve istihdamın, geniş ölçekte rekabetçi bir ekosistemin gelişimine destek sağlayan bu tür stratejilerin önemi jeopolitik etkenlerle de pekişmektedir. Özellikle büyük ekonomiler son dönemde bu doğrultuda yeni açılımlar geliştirmektedir (Şekil 2.4). Örneğin ABD Enflasyonu Düşürme Yasası³ temiz enerji teknolojilerine 370 milyar ABD\$ kaynak sunmakta, AB de politika hedefleri ve çeşitli destekleme yöntemleri yoluyla enerji arzında ve temiz enerji büyümesinde kendine yeterliliği artırmaya yönelik adımlar atmaktadır (European Commission, 2022; US White House 2022; European Commission, 2023a; European Commission, 2023b; European Commission, 2023c; METI 2023).

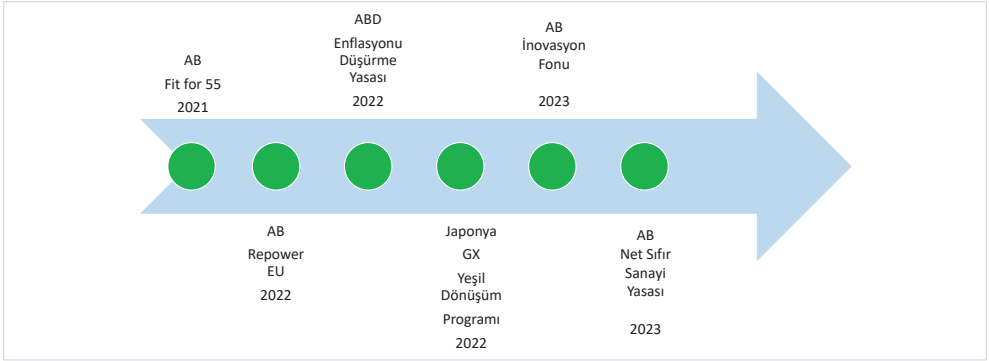
Şekil 2.3. Enerji Sektörü Yatırımlarının Küresel Gelişimi (2015–2023, milyar 2022ABD\$)



Kaynak: IEA, 2023d

³ US Inflation Reduction Act

Şekil 2.4. Son Dönemde Temiz Enerji, Teknoloji, İnovasyon, Sanayi Dönüşümü ve Yerleşme Odaklı Politika Belgelerine Örnekler



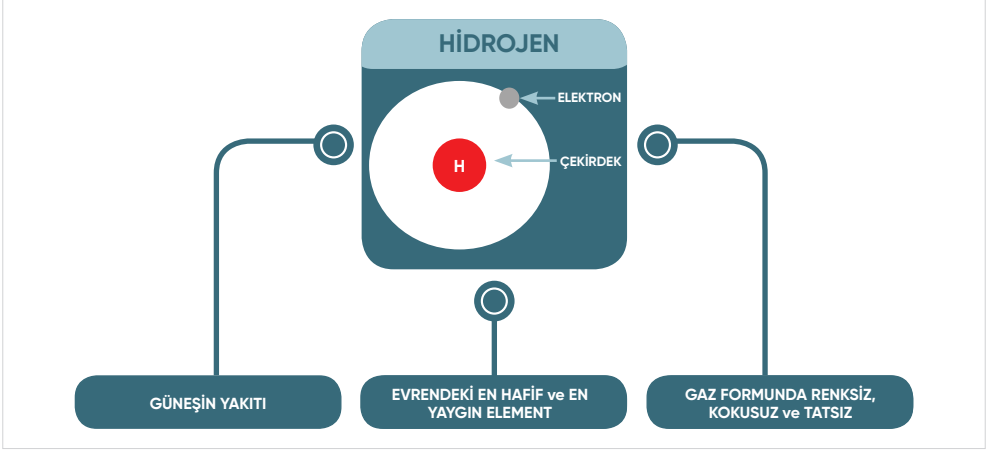
2.2. Hidrojenin Temelleri ve Temiz Hidrojen Gelişimini Destekleyen Faktörler

Hidrojen doğada en yaygın bulunan ve en hafif elementtir. Atom numarası 1 olan hidrojen, periyodik cetvelin ilk elementi, evrenin temel yapı taşı ve güneşin enerjisinin de kaynağıdır. Hidrojenin tarihçesi oldukça eskilere dayanmaktadır. 1961 yılında Robert Boyle, demir ve seyreltik asit tepkimeleriyle açığa yarıcı bir gaz çıktığını keşfetmiştir. 1766 yılında Henry Cavendish, asitlerle metallerin tepkimeleri sırasında açığa çıkan bu gazın ayrı element olduğunu belirlemiştir. Sonrasında Antoine Lavoisier, oksijenle tepkimeye girerek su oluşturduğunu gösterdiği gaz halindeki bu elemente hidrojen adını vermiştir. Bu gelişme aynı zamanda elementler arasındaki kimyasal tepkimelerin daha iyi anlaşılmasına da katkı sağlamıştır.

- Hidrojen doğal haliyle, renksiz, kokusuz ve tatsız gaz formunda olup, insan sağlığı ve çevre için zehirli bir gaz değildir.
- Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz. Genellikle su ve hidrokarbon formunda oksijen veya karbon ile birleşmiş halde bulunur.
- Hidrojenin erime noktası $-259,2^{\circ}\text{C}$, kaynama noktası ise $-252,9^{\circ}\text{C}$ 'dir. Düşük sıcaklıklarda ve atmosferik basınçta hidrojen gaz fazından sıvı fazına geçmektedir.
- Hidrojenin bir diğer önemli karakteristiği, küçük atom yarıçapı ve moleküler kütlesi nedeniyle ortamda hızla yayılma göstermesidir. Hidrojen, yüksek yanıcılığı nedeniyle, hava ve oksijen varlığında alev, kıvılcım veya diğer ateşleyici etkenlerle temas ettiğinde ani patlama özelliğine sahiptir⁴. Bu nedenlerle, hidrojenin üretiminde, depolanmasında, taşınmasında ve tüketiminde güvenlik prensiplerinin, sistem perspektifi içerisinde ve titizlikle uygulanması gerekmektedir (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6) (Gökalp, 2020; Royal Society of Chemistry, 2023; US EIA 2023).

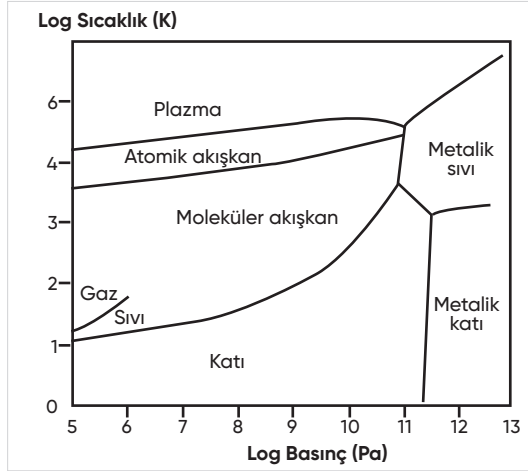
⁴ Detaylar için lütfen Bölüm 2.5.6'ya bakınız.

Şekil 2.5. Hidrojen ve Temel Özellikleri



Royal Society of Chemistry, 2023'ten uyarlanmıştır.

Şekil 2.6. Hidrojenin Faz Diyagramı (Pa, K, eksenler logaritmik ölçektedir.)



Kaynak: Cole & Silvera, 2009

Hidrojenin diğer enerji vektörlerine kıyasla enerji yoğunluğu, bazı avantajları ve dezavantajları beraberinde getirmekte, kullanım şeklini de belirlemektedir. Hidrojen kütle bazında⁵ oldukça yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (yaklaşık 120 MJ/kg⁶ veya benzinin yaklaşık 3, doğal gazın yaklaşık 2,5 katı).

⁵ Gravimetrik enerji yoğunluğu

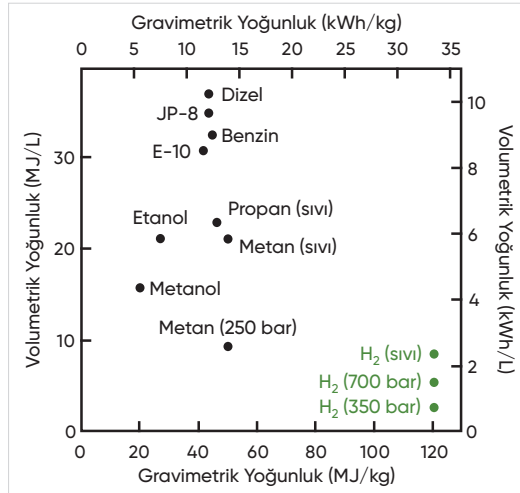
⁶ 33,3 kWh/kg

Bu özellik hidrojeni özellikle ağırlığın kritik faktör olduğu alanlarda öne çıkarmaktadır. Diğer taraftan, hidrojenin hacim bazında enerji yoğunluğu⁷, benzinin en az dörtte-biri ve sıvı formda doğal gazın üç ila beşte biri seviyesindedir (sıvı hidrojen 8 MJ/L⁸, gaz hidrojen 5 MJ/L civarı⁹, sıvılaştırılmış doğal gaz 24 MJ/L) (Şekil 2.7). Depolama, iletim ve dağıtım bakımından önemli kısıtlar oluşturan bu özelliğine rağmen sıkıştırma, sıvılaştırma ve daha yenilikçi teknolojiler yoluyla depolama seçeneklerindeki gelişim hidrojeninde büyümeyi desteklemektedir (US DOE, 2023a; IEA 2023e) (Detaylar için Bölüm 2.5.4'e ve enerji cinsinden diğer karşılaştırmalar için lütfen EKLER'e bakınız).

Hidrojenin üretiminden tüketimine değer zincirinde öne çıkan uygulamalara ilişkin bazı önemli kimyasal tepkimeler aşağıdaki gibidir:

- Su elektrolizi tabanlı hidrojen üretimi $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$
- Hidrojen yanma $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
- Hidrojenden amonyak üretimi $3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$
- Hidrojenden metanol üretimi $3H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$
- Metal oksitlerin hidrojen ile indirgenmesi $H_2 + FeO \rightarrow H_2O + Fe^{10}$

Şekil 2.7. Yakıtların ve Enerji Taşıyıcıların Yoğunluk Karşılaştırması
(kWh/kg, MJ/kg, kWh/l, MJ/l) ¹¹



Kaynak: US DOE, 2023a

⁷ Volumetrik enerji yoğunluğu

⁸ -253 °C'de 71 kg/m³

⁹ Atmosferik basınçta 0,09 kg/m³, 350 bar basınçta 26,1 kg/m³ ve 700 bar basınçta 42 kg/m³

¹⁰ Çelik üretiminde demirin indirgenmesi örneği

¹¹ LHV (Lower Heating Value)

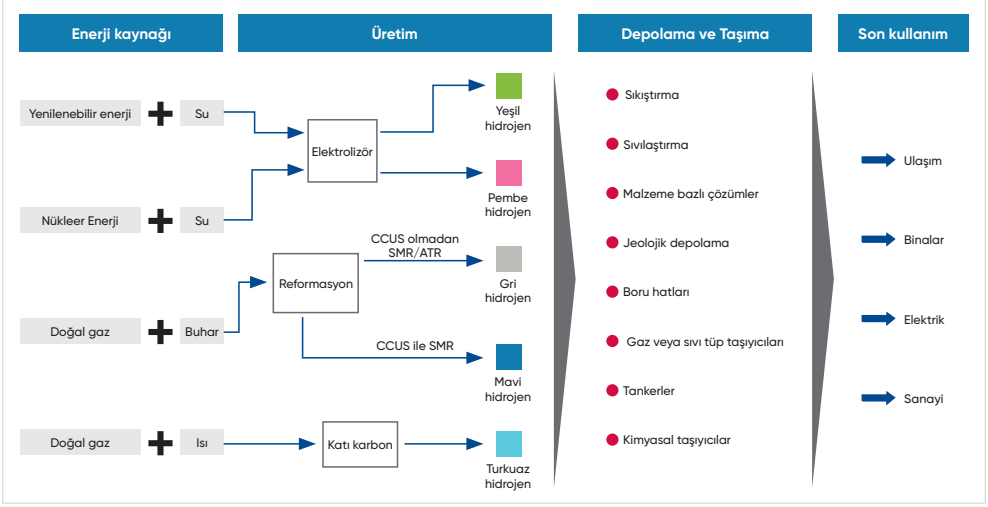
- Temiz hidrojen, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye ve nükleer enerjiye kadar çok farklı birincil enerji kaynaklarından, farklı teknolojiler yoluyla üretilmektedir.
- Enerji yoğunluğu özelliklerine bağlı olarak, temiz hidrojen farklı formlarda depolanabilmekte, taşınabilmekte ve kullanılabilir.
- Temiz hidrojen kullanımı günümüzde ağırlıklı olarak geleneksel tüketici olan birkaç sektörle sınırlıdır. Bununla birlikte temiz hidrojen, özellikle temiz elektrifikasyon yoluyla karbondan arındırılması güç olan sektörlerde az sayıda çözümden biri olarak hızla yaygınlaşma potansiyeline sahiptir.

Temiz hidrojenin çok yönlü karakteristikleri, bütüncül enerji sisteminde hem yakıt hem de esnek bir enerji taşıyıcısı olarak, güvenli ve temiz gelecek çözümleri bakımından rolünü desteklemektedir (Şekil 2.8, Şekil 2.9) (IEA 2023b; US EERE, 2023).

Günümüzde kırkın üzerinde ülke, hidrojen stratejilerini ve yol haritalarını açıklamıştır. IICEC analizlerinde, hidrojen stratejilerinde tespit edilen öncelikler ve itici faktörler aşağıda özetlenmektedir:

- Hidrojende büyüme perspektifini ve gelişim hedeflerini belirleyen stratejiler ve yol haritalarında temel öncelik, temiz hidrojenin karbondan arındırılması zor sektörlerde kullanımı yoluyla net-sıfır hedeflerinin ve temiz enerji dönüşümünün desteklenmesidir.
- Enerji arz güvenliğinin de son dönemin jeopolitik gelişmeleri ekseninde temiz hidrojende büyümeyi destekleyen kritik bir faktör konumuna geldiği görülmektedir.
- Özellikle sanayileri ve genel olarak enerji ekonomileri birincil enerji kaynakları ithalatına bağlı olan ülkelerde, ekonomide sürdürülebilir büyüme ve enerji güvenliği hedefleri bakımından hidrojene yönelim güçlenmektedir.
- Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bölgeler ise, rekabetçi yeşil hidrojenin hem üretimi hem de talep potansiyeli yüksek pazarlara ihracatı bakımından avantajlarına göre konumlanmaktadır. Geleneksel fosil yakıt ihracatçısı olan bazı bölgelerde ise gerek ihracat kanallarında çeşitlendirme, gerekse yeni gelişen bir pazarda konumlanma hedefleri ekseninde temiz hidrojen stratejileri gelişmektedir.
- Bölüm 2.1'de belirtilen, geniş ölçekte sürdürülebilirliği ve teknoloji-odaklı yeni sanayi stratejilerini şekillendiren dinamiklerin de temiz hidrojende büyüme ve değer zincirinde yerleşme fırsatlarını önceliklendiren kritik bir unsur olduğu görülmektedir. Bu çerçevede, büyüme potansiyeli yüksek bir teknoloji alanında kendine yeterlilik ve rekabetçilik hedeflerinin, hidrojen yol haritalarında teknolojik gelişim önceliklerini ve hedeflerini öne çıkaran, ortak bir vizyon olduğu görülmektedir (Şekil 2.10) (CGEP, 2023; IEA, 2023f; IEA, 2023g; IRENA, 2023).

Şekil 2.8. Temiz Hidrojen Değer Zincirine Genel Bakış



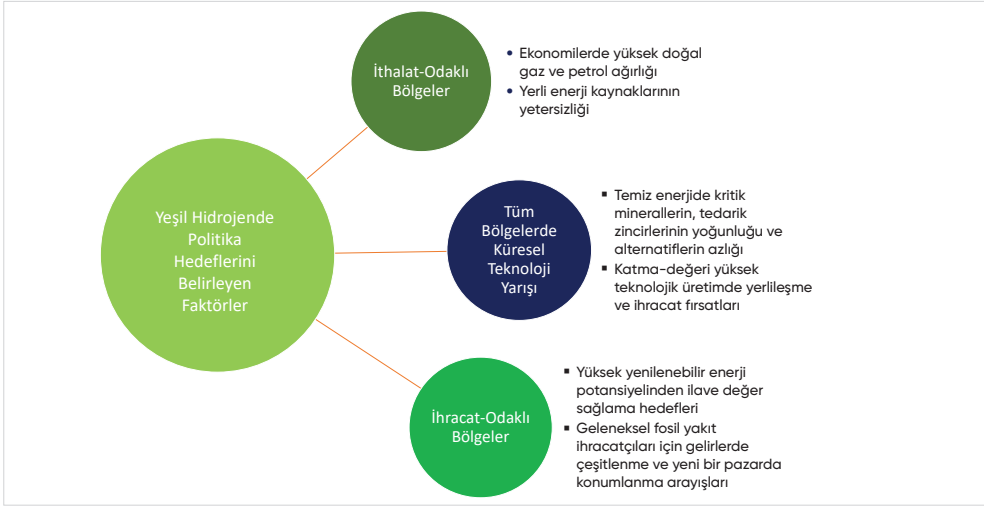
Deloitte, 2023'ten uyarlanmıştır.

Şekil 2.9. Yeşil Hidrojen Gelişimini Destekleyen Faktörler



IICEC analizleri

Şekil 2.10. Hidrojen Stratejileri ve Yol Haritalarında Öncelikler



IICEC analizleri

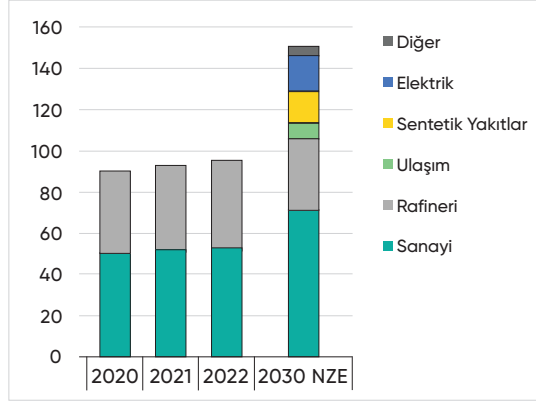
2.3. Hidrojen Üretimi ve Tüketiminde Mevcut Durum

2.3.1. Hidrojen Talebi

2022 yılında hidrojen talebi 2021 yılına göre %3 artışla 95 Mt'a ulaşmıştır. Avrupa dışında tüm bölgelerde tüketim artışı kaydedilirken, Avrupa'da 2022 yılında enerji fiyatlarında yüksek artışların sanayi üretimine etkisi hidrojen talebinde büyümeyi de yavaşlatmıştır. Günümüzde hidrojen talebinin %1'den az bölümü düşük emisyonlu hidrojen teknolojilerine dayanmaktadır. Son dönemde hidrojen talebindeki büyümenin, Bölüm 2.1'de sunulan emtia fiyatlarında gelişmeler, enerji güvenliğini güçlendirme arayışları ve temiz enerji dönüşümü gibi, küresel enerji ve iklim dinamiklerinin yansıması olduğu görülmektedir. Hidrojen özelinde gelişmekte olan politikalar ve stratejiler, henüz talep fonksiyonunda ana belirleyici duruma gelmemiştir (IEA, 2023f). Hidrojene olan talep, ağırlıklı olarak geleneksel hidrojen tüketicisi olan bazı sanayi kollarında ve rafineri sektöründe şekillenmeye devam etmektedir (Şekil 2.11). Hidrojenin toplam enerji sisteminde ve nihai enerji talebinde payı halen ihmal edilebilir seviyelerdedir (IEA, 2023a). 2022 yılında rafinerilerde 41 Mt hidrojen tüketimi gerçekleşmiştir (toplam talebin %43'ü). Sanayi ve ilişkili diğer sektörlerde ise 2022 yılında 53 Mt hidrojen tüketilmiştir (toplam talebin %56'sı). Söz konusu tüketim içerisinde yaklaşık %60'lık pay ile amonyak üretimi öne çıkarken, önemli sanayi bileşenleri olan metanol ve demir-çelik üretimi sırasıyla yaklaşık %30 ve %10 paya sahiptir.

Karayolu taşımacılığında hidrojen kullanımı mobilite ekosisteminde ve otomotiv endüstrisinde bazı yönelimlerin etkisiyle 2022 yılında kaydedilen %45'lik artışa karşın halen rafineri ve sanayi sektörlerine kıyasla oldukça düşük bir seviyededir (33 kt). Binalarda ve elektrik üretiminde hidrojen tüketimi ise henüz az sayıda ülkede ve ilk uygulamalar aşamasında olup, dünya hidrojen tüketiminin %1'den azına karşılık gelmektedir (IEA, 2023b; IEA, 2023f).

Şekil 2.11. Hidrojen Talebinin Sektörel Gelişimi (2020–2022, 2030¹², Mt)



Kaynak: IEA, 2023f

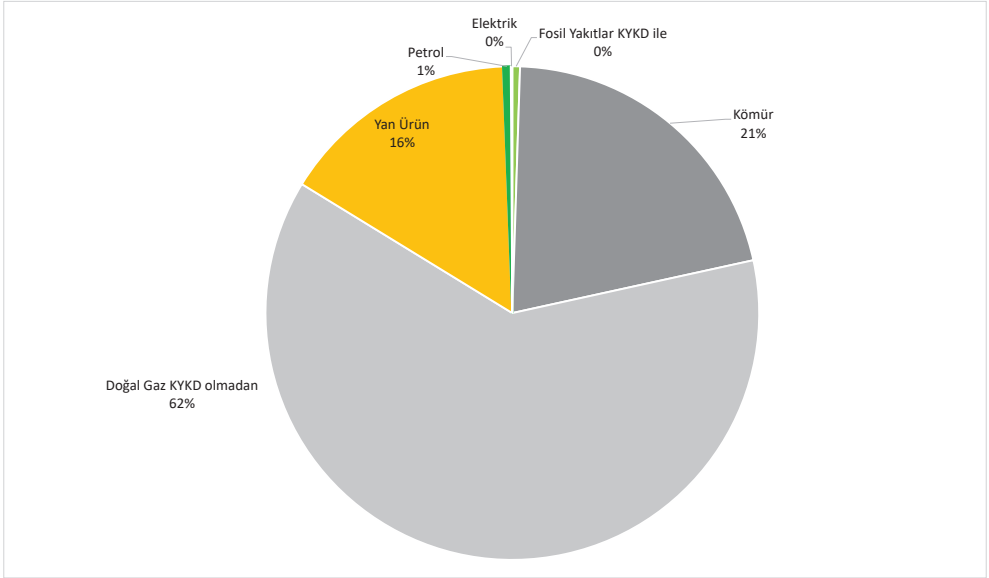
2.3.2. Hidrojen Üretimi

Küresel hidrojen üretiminde fosil yakıtların yüksek ağırlığı devam etmektedir. Doğal gazdan ve kömürden Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (KYKD¹³) olmaksızın hidrojen üretimi (gri hidrojen), dünya toplam üretiminin sırasıyla %62 ve %21'ini oluşturmaktadır. Rafinerilerde ve petrokimya tesislerinde nafta dönüştürme, hidrokraking, desülfürizasyon gibi süreçlerde oluşan hidrojen ise, toplam tedarikin yaklaşık altıda-birine karşılık gelmektedir. Düşük emisyonlu hidrojenin toplam üretime katkısı ise son dönemde enerji politikalarında önceliklerin ve endüstriyel yönelimlerin etkisiyle büyümede sağlanan artışa karşın, henüz %1'in altındadır (1 Mt). Düşük emisyonlu hidrojen üretiminin ağırlıklı bölümünü KYKD ile entegre fosil yakıt teknolojileri oluşturmaktadır. Elektroliz tabanlı hidrojen üretimi 2022 yılında sadece 0,1 Mt olarak gerçekleşmiştir (Şekil 2.12). Hidrojen üretiminin yüksek emisyon-yoğunluğu nedeniyle, mevcut enerji dengeleri içerisinde hidrojen iklim değişikliği çözümü olmaktan ziyade iklim değişikliğinin nedenleri arasında yer almaktadır. Hidrojen üretiminden kaynaklı emisyonlar 2022 yılında 900 Mt CO₂ olarak gerçekleşmiştir (2022 yılında dünyada enerjiden kaynaklı toplam CO₂ emisyonlarında %2,4 pay) (IEA, 2023a; IEA, 2023c).

¹² IEA NZE Senaryosunda

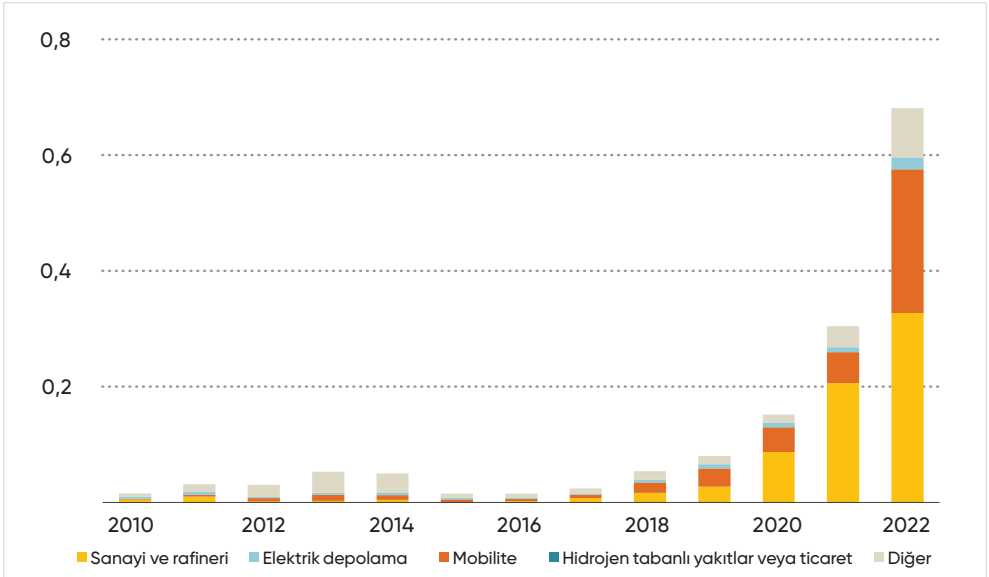
¹³ Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)

Şekil 2.12. Hidrojen Üretiminin Kaynaklara ve Teknolojilere Göre Kırılımı (2022, %)



Kaynak: IEA, 2023f

Şekil 2.13. Elektrolizör Yatırımlarının Sektörel Uygulama Alanlarına Göre Gelişimi (2010-2022, milyar 2022ABD\$)



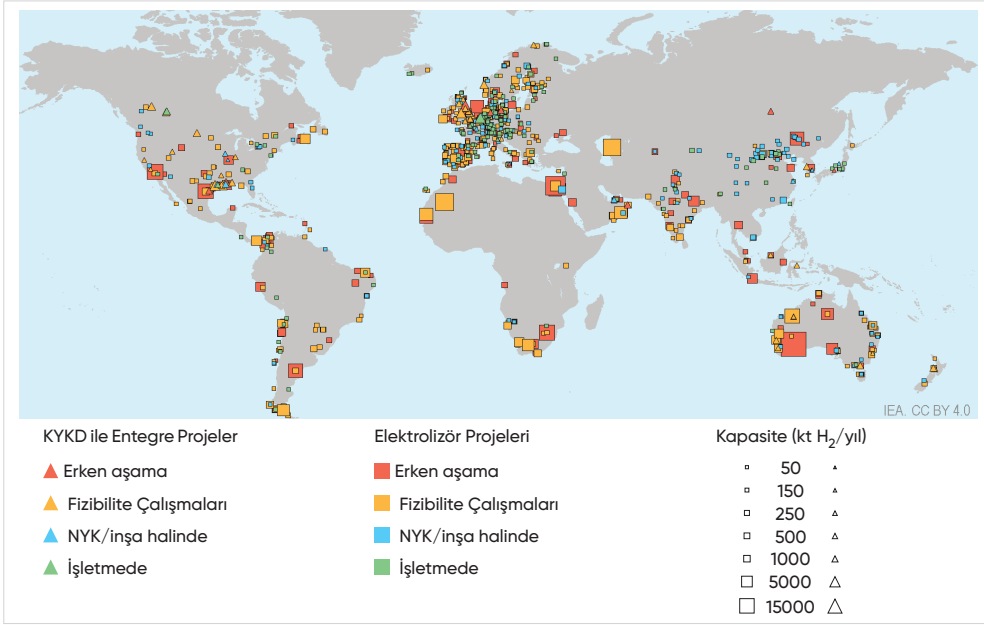
Kaynak: IEA, 2023d

Hidrojen üretiminde elektrolizör teknolojilerine yönelim hızla artmaktadır. Elektrolizör kurulu kapasitesi 2022 yılında 700 MW olarak gerçekleşmiştir (yıllık %20 artış). 2023 sonu itibarıyla kurulu kapasitenin 3 GW seviyesine ulaşacağı öngörülmektedir (IEA, 2023f). Elektrolizör yatırımlarında güçlü bir büyüme ivmesi gözlenmektedir. 2022 yılında yatırımlar 2021 yılına göre iki-katın, 2020 yılına göre ise beş-katın üzerinde artmıştır. Talep gelişimi ile benzer şekilde, söz konusu yatırımların odağında geleneksel sanayi ve rafineri sektörleri öne çıkmakta, mobilite uygulamaları ve çelik sektörü de son dönemde yatırımlardan artan oranlarda pay almaktadır (IEA, 2023d) (Şekil 2.13). İzin, onay gibi süreçlere bağlı değişimle birlikte, GW ölçeğinde elektrolizör imalat tesisleri iki ila üç yılda devreye alınabilmekte, elektrolizör kurulumları da bir ila iki yıl içerisinde gerçekleşmektedir. Son dönemde elektrolizör kurulum taleplerinde gelişen artış sonucunda sektör satıcı piyasası niteliği kazanmaktadır.

Düşük emisyonlu hidrojene yönelimin hızlanması sonucunda proje envanterinin hızla büyüdüğü, aynı zamanda bölgesel yaygınlığın ve çeşitliliğin de arttığı görülmektedir (IEA, 2023f; IEA, 2023h) (Şekil 2.14). Söz konusu projelerin tamamının gerçekleşmesi durumunda toplam üretimin 2030 yılında 38 Mt'a ulaşacağı hesaplanmaktadır (Elektrolizör tabanlı 27 Mt ve fosil yakıtlara entegre KYKD ile 11 Mt). Bununla birlikte, nihai yatırım kararı alınmış olan projelerin payı sadece %4 seviyesindedir (toplam 2 Mt). Bu durum, yatırımlara ilişkin çeşitli belirsizliklerin sürmekte olduğuna ve sürdürülebilir arz talep dengesi için risklere işaret etmektedir (IEA, 2023f) (Detaylar için lütfen Bölüm 2.5.3'e bakınız). Temiz hidrojen dahil düşük emisyonlu yakıtların toplam temiz enerji yatırımları içerisindeki payı halen oldukça düşük seviyelerdedir (Şekil 2.15). Önümüzdeki dönemde hidrojen net-sıfır hedeflerine uyumlu, güçlü ve sürdürülebilir büyümenin sağlanabilmesi durumunda, temiz hidrojen değer zinciri yatırımlarının da temiz enerji yatırımları içerisinde daha görünür bir hacme ulaşması beklenmektedir (IEA, 2023b; IEA, 2023d; IEA, 2023f) (Detaylar için lütfen Bölüm 2.5.2'ye bakınız). Hidrojen henüz elektrik veya doğal gaz gibi bir emtia niteliği kazanmamıştır. Avrupa'da hidrojen için fiyat sinyalleri oluşturulmasına yönelik ilk fiyat endeksi girişimi EEX bünyesinde 2023 yılında faaliyete geçmiştir (EEX, 2023).

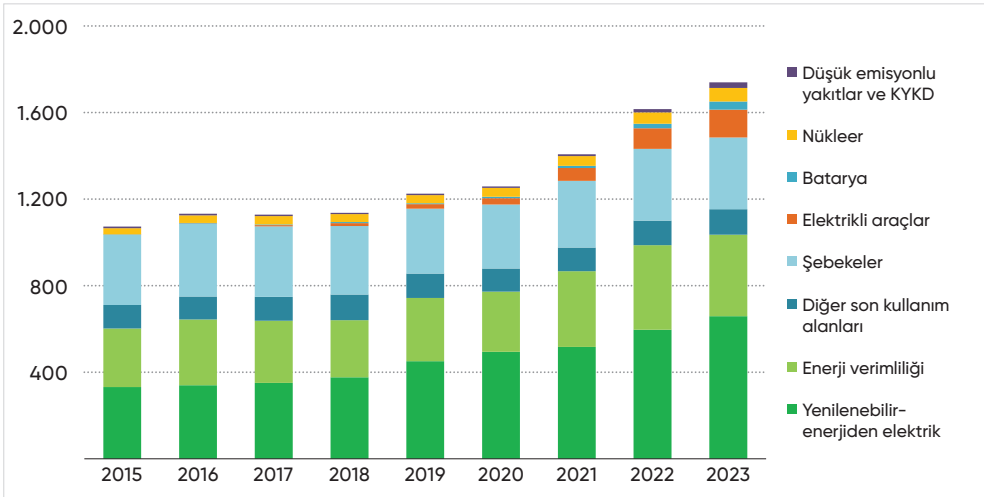
Dünya hidrojen üretiminin ve tüketiminin ağırlıklı bölümünü büyük ekonomiler oluşturmaktadır. Çin toplam üretimin yaklaşık %30'unu gerçekleştirmektedir. Çin'i sırasıyla Kuzey Amerika (%17), Ortadoğu (%13), Hindistan (%9) ve Avrupa (%8) izlemektedir. Mevcut üretimin yaklaşık dörtte-üçü bu beş bölgede gerçekleşmektedir (IEA, 2023f) (Şekil 2.16). Elektrolizör kurulu kapasitesinde 2020 yılında %10 olan payını 2022 sonu itibarıyla %30'a çıkan Çin, 260 MW kurulu kapasiteye sahip en büyük elektrolizöre de sahiptir (IEA, 2023a). 2023 sonu itibarıyla toplam elektrolizör kurulumlarının yarısının Çin'de gerçekleşmesi beklenmektedir. Nihai yatırım kararı almış olan toplam proje portföyünün %40'lık bölümü de Çin'de yer almaktadır (IEA, 2023f). Elektrolizör projelerine ilişkin toplam yatırımlarda da Çin öne çıkarken, Avrupa ve ABD'de de ilgili yatırım portföyleri son dönemde gelişen politikalar ile desteklenerek büyümektedir (Şekil 2.17). Kapsamlı politika çerçeveleri, yol haritaları ve geliştirilen büyük ölçekli finansman mekanizmaları ve iş modellerinin, önümüzdeki dönemde ekosistemin gelişimi için itici unsurlar olacağı değerlendirilmektedir (Detaylar için lütfen Bölüm 5'e bakınız).

Şekil 2.14. Türkiye Dışındaki Ülkelerde Açıklanan Düşük Emisyonlu Hidrojen Projeleri¹⁴



Kaynak: IEA, 2023f

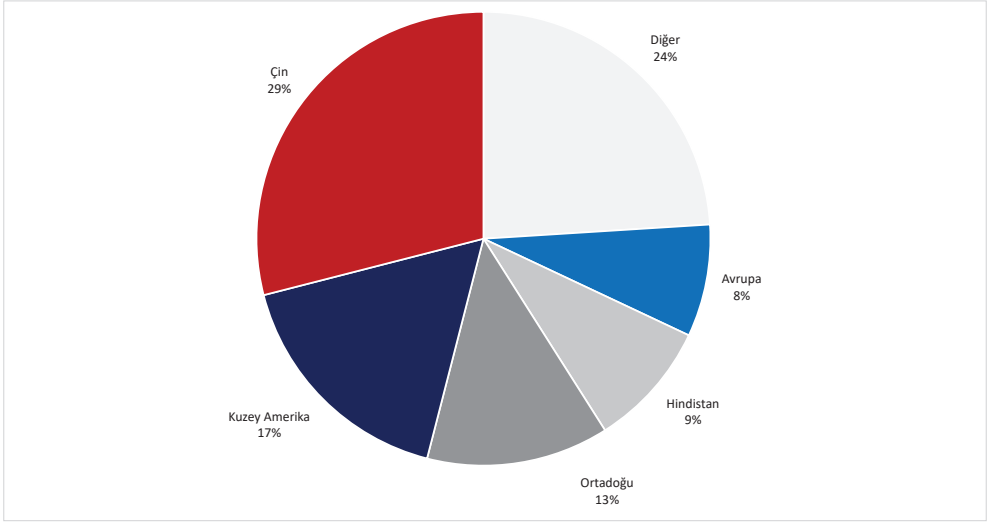
Şekil 2.15. Temiz Enerji Yatırımlarının Sektörlere Göre Yıllık Gelişimi (2015-2022, milyar 2022ABD\$)



Kaynak: IEA, 2023d

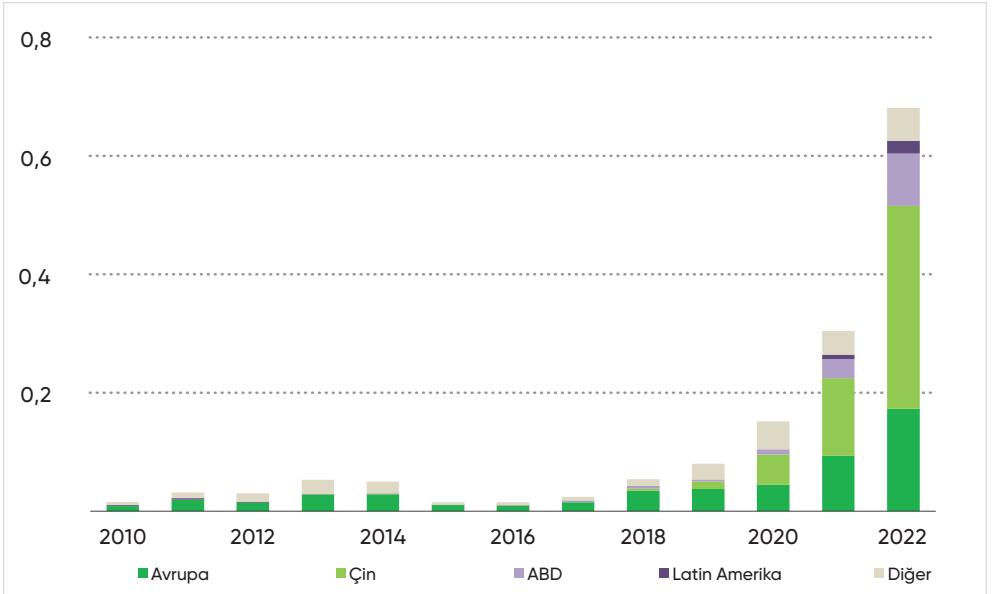
¹⁴ Türkiye'de düşük emisyonlu hidrojen gelişiminde son dönemde öne çıkan girişimler ve gelişmeler Bölüm 3'te sunulmaktadır.

Şekil 2.16. Hidrojen Üretiminin Bölgesel Dağılımı (2022, %)



Kaynak: IEA, 2023f

Şekil 2.17. Elektrolizör Yatırımlarının Bölgesel Gelişimi (2010-2022, milyar 2022ABD\$)



Kaynak: IEA, 2023d

2.4. Net-Sıfır Emisyon Hedeflerinde Hidrojen Gelişimi

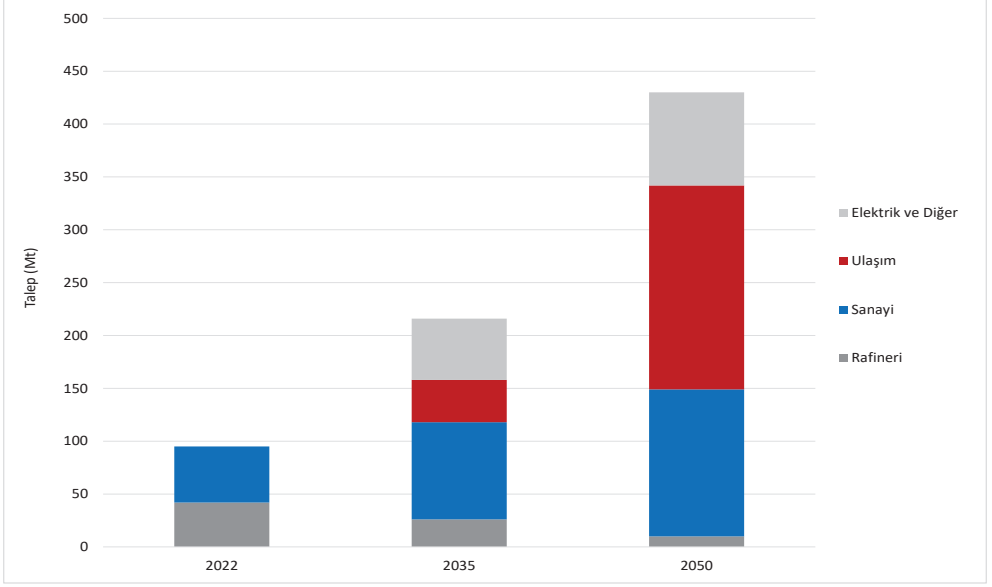
2.4.1. Net-Sıfır Patikasında Hidrojen Talebi Perspektifi

Bölüm 2.1'de sunulan 2050 net-sıfır perspektifi, düşük emisyonlu hidrojen talebinde hızlı büyüme öngörmektedir. Bu çerçevede, 2030 yılında toplam hidrojen talebinin 150 Mt'a, temiz hidrojen talebinin ise 70 Mt'a ulaşması gerekmektedir. Bu büyüme, 2030 yılına kadar olan dönemde 14 kat artışa karşılık gelmektedir. Bu gelişim patikasında 2050 yılında öngörülen 430 Mt hidrojen talebinin tamamına yakınına ise düşük emisyonlu hidrojen oluşturmaktadır (420 Mt ve 2030-2050 döneminde 70 kat artış) (IEA, 2023b; IEA, 2023f).

Net-sıfır hedefleri ile uyumlu bir gelecek perspektifinde, yeşil hidrojen talebinde geleneksel tüketici sektörlerin payı azalırken, üretimde büyüme, piyasa ve teknoloji gelişmeleri ile desteklenen talep dinamikleri neticesinde tüketimin yapısı sektörel olarak daha çeşitlendirilmiş bir nitelik kazanmaktadır:

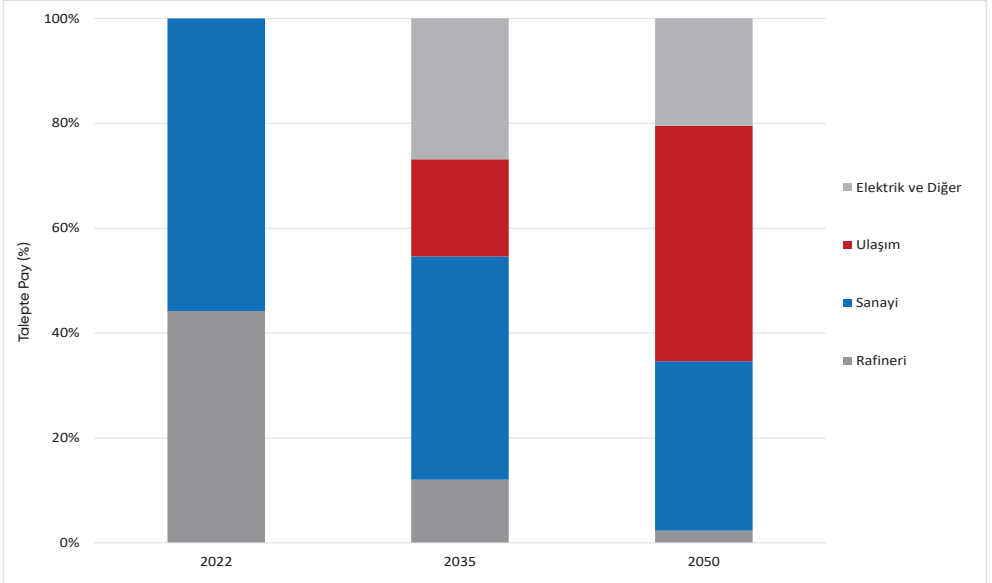
- Yeni talep alanlarının 2030 yılında toplam hidrojen talebinin %80'ini oluşturması beklenmektedir.
- Özellikle ulaştırma sektörü ve demir-çelik üretimi, 2030 sonrası dönemin talep dinamikleri içerisinde yüksek büyüme potansiyeline sahip tüketim alanları olarak öne çıkmaktadır.
- Karayolunda ağır ticari araçlarda kullanımda yaygınlaşma, havacılık ve denizcilikte de gelişmekte olan iklim ve teknoloji-odaklı politikalar ve uygulamalar ile birlikte, ulaştırma sektörünün orta ve uzun dönemde en büyük nihai talep sektörü konumuna gelmesi öngörülmektedir.
- Rafinerilerde hidrojen tüketiminin geleceğinde, enerji sektöründe karbonsuzlaşma odaklı genel stratejilerin ve petrol ürünlerinin ikamesinde gelişimin belirleyici faktörler olacağı değerlendirilmektedir.
- 2050 yılında toplam hidrojen talebinin yaklaşık %80'inin rafineriler dahil sanayi kollarında ve ulaşımda gerçekleşeceği öngörülmektedir (Şekil 2.18 ve Şekil 2.19) (IEA, 2023b).

Şekil 2.18. Hidrojen Talebinin Sektörel Gelişimi (2022 – 2050, Mt)



Kaynak: IEA, 2023b

Şekil 2.19. Hidrojen Talebinin Sektörel Gelişimi (2022 – 2050, %)



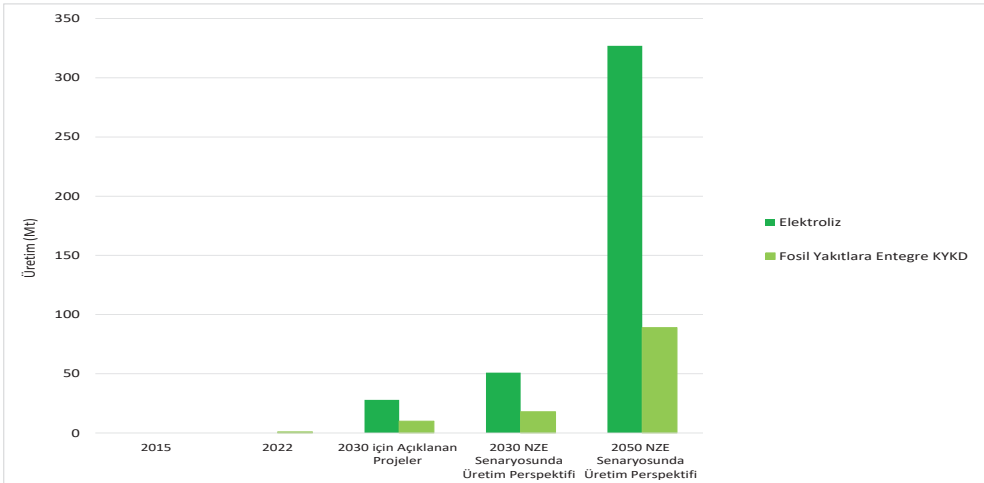
Kaynak: IEA, 2023b

2.4.2. Net-Sıfır Patikasında Hidrojen Üretimi ve Altyapı Gelişimi Perspektifi

Açıklanan düşük emisyonlu hidrojen projeleri (38 Mt), NZE senaryosunda 2030 için öngörülen seviyenin (69 Mt) yaklaşık yarısına karşılık gelmektedir (%55) (Şekil 2.20). Hidrojende büyümenin küresel iklim hedefleri ile uyumlu gerçekleşebilmesine yönelik analizlerde, elektrolize dayalı temiz hidrojen üretiminin, düşük emisyonlu üretim içerisinde payının 2030 yılında %70'in üzerine çıkması, 2050 yılına doğru ise %80'e yaklaşması beklenmektedir (IEA, 2023b). Diğer bir ifadeyle, elektrolize dayalı hidrojen üretiminin 2030 yılında yaklaşık 50 Mt'a yükselmesi, henüz birkaç GW seviyesinde olan toplam elektrolizör kapasitesinin ise 2030 yılında yaklaşık 600 GW ve 2050 yılında 3300 GW seviyelerine ulaşması öngörülmektedir (2050 yılına kadar iki bin katın üzerinde artış).

Söz konusu iddialı büyüme patikası, yeni gelişecek bir piyasanın ve değer zincirinin oluşumu bakımından önemli değişimleri beraberinde getirecektir. Örneğin, elektrolizör kurulumlarında büyüme neticesinde temiz elektrik girdisi gereksinimini de hızla artacaktır. 2050 yılında elektrolizör kapasitelerini beslemek için gerekli elektrik enerjisi hacmi 15000 TW-saat olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, dünya mevcut elektrik talebinin yarısından fazlasına, 2050 yılı için öngörülen elektrik talebinin ise %20'sine eşdeğerdir¹⁵ (IEA, 2023b). Elektrik üretim maliyetlerinin gelişimi, yeşil hidrojenin toplam ekonomisinde en kritik faktörlerden birisi olacaktır (detaylar için lütfen Bölüm 2.5.1'e bakınız). Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları bakımından avantajlı ülkelerin rekabetçi yeşil hidrojen üretiminde ve ticaretinde öne çıkmaları beklenmektedir.

Şekil 2.20. Düşük Emisyonlu Hidrojen Üretimi Gelişim Perspektifi (2015-2030, Mt)



Kaynak: IEA, 2023b

¹⁵ IEA NZE Senaryosunda 2050 yılında nihai enerji talebinin %53'ü elektrik enerjisi formunda gerçekleşmektedir.

Emre-amade elektrolizör imalat kapasitesi 14 GW/y olmakla birlikte, gerçekleşen üretim 1 GW/y seviyesindedir. Elektrolizör imalat verileri incelendiğinde, 2030 yılına kadar yıllık üretim kapasitesinde on-katın üzerinde büyüme hedefi tespit edilmiştir (155 GW/y). Ancak, kapasite artışına konu projelerin onda-birinden azının nihai yatırım kararı aldığı görülmektedir (IEA, 2023b). Açıklanan projelerin tamamının gerçekleşmesi durumunda kümülatif elektrolizör kapasitesi 400 GW'ın üzerine çıkabilecektir. Bu büyüklükte bir gelişme ise NZE hedefinin yaklaşık %80'ini karşılayabilecektir. Elektrolizör kapasitesinde büyümenin sürdürülebilir gelişiminde, özellikle talep tarafında öngörülebilir büyüme sinyallerinin belirleyici olacağı değerlendirilmektedir¹⁶ (IEA, 2023b; IEA, 2023f). Elektrolizör teknolojileri gelişimi ve imalatı, küresel ve bölgesel rekabetin en yoğun yaşandığı alanların başında gelmektedir. Kritik minerallerden malzeme tedarik zincirlerine ve emtia fiyatlarına kadar jeopolitik faktörler bu rekabeti giderek daha fazla güçlendirmektedir.

ABD Enflasyonu Düşürme Yasası, Avrupa'da ortak çıkara hizmet eden önemli projelere destek veren genel çerçeve¹⁷ gibi sanayide yeşil dönüşümde yerleşme için kapsamlı ve destekleyici mekanizmaların, sadece üretim hacimlerine ve talep tarafı odaklı piyasa ilerlemelerine değil aynı zamanda imalat kapasitelerinde gelişime ve yerleşmeyi güçlendirmeye de odaklandığı görülmektedir.

Günümüzde hidrojen, ağırlıklı olarak üretimin olduğu yerde tüketilmektedir. Talepte yüksek büyüme perspektifi, talep sektörlerinin ulaştırma ve farklı sanayi sektörlerinde çeşitlenmesi ve coğrafi yaygınlığın artması ile birlikte, üretim-tüketim dengesinin sürdürülebilir koşullarda sağlanabilmesi bakımından altyapılarda gelişimin önemi artacaktır. Örneğin, yenilenebilir enerji potansiyeli bakımından zengin bölgelerde maliyet-etkin çözümlerle gelişecek üretimin, talep merkezlerine uygun koşullarda tedarik edilebilmesi uzun dönemli altyapı planlamalarını ve buna uygun yatırım alternatiflerini gerektirecektir. Bu çerçevede, hidrojen depolama tesisleri, boru hatları, dolun istasyonları ve hidrojenin daha uzun mesafelerde taşınmasını mümkün kılan, sıvılaştırma ve hidrojen türevlerine dönüşüm gibi seçenekler de hızla yaygınlık kazanacaktır.

NZE Senaryosunda günümüzde 5000 km olan toplam hidrojen boru hattı uzunluğunun 2030 yılına kadar dört kat artması, 2050 yılında ise 209.000 bin km'ye ulaşması beklenmektedir. Hidrojen yer altı depolama kapasitesinde de değer zincirinde büyümeyi destekleyecek ölçekte gelişim öngörülmektedir (0,5 TW-saat'ten 2030 yılında 70 TW-saat ve 2050 yılında 1200 TW-saat'e) (IEA, 2023b).

¹⁶ Doğal gaz kaynaklarına dayalı entegre KYKD teknolojileri ile üretimde ise, özellikle ABD'de son dönemde bazı gelişmeler kaydedilmekle birlikte, net-sıfır hedefleri ile uyumlu gelişim için dünya genelinde çok kuvvetli bir büyüme ivmesi sağlanabilmesini gerekmektedir. (IEA, 2023b).

¹⁷ EU Important Projects of Common European Interest

2.5. Yeşil Hidrojen Geleceğinde Güçlü ve Sürdürülebilir Büyüme için Kritik Zorluklar ve Fırsatlar

Temiz hidrojenin geleceğin daha güvenli, temiz, rekabetçi ve sürdürülebilir enerji sisteminde öngörülen seviyelerde rol oynayabilmesi için, yeşil hidrojen üretim maliyetlerinden değer zincirinin toplam ekonomisine ve büyümeyi sürdürülebilir koşullarda sağlayacak yatırımlara ve piyasa gelişimine, güvenlik ve sertifikasyon gibi hidrojen üzerinde titizlikle yönetilmesi gereken kritik başlıklardan daha yaygın ve etkin uluslararası iş birliklerine kadar çok sayıda alanda önemli zorluklar ve fırsatlar bulunmaktadır (Şekil 2.21):

- Yeşil Hidrojen Üretim Alternatifleri ile Rekabetçi Konuma Gelmesi Hangi Faktörlere Bağlı Olacak ?
- Piyasanın Büyüme Potansiyeli Yüksek Bileşenleri Yakın ve Orta Dönemde Nasıl Gelişebilir ?
- Arz ve Talepte Hem Yüksek Büyüme Hem de Sürdürülebilir Denge Sağlanabilecek mi ?
- İnovasyon ve Teknolojik Gelişimde Hangi Önemli Fırsatlar Var ?
- Hidrojen Vadileri ve Hub'ları Neden Önemli ?
- Düzenlemeler ve Güvenlik Perspektifi Sürdürülebilir Büyüme için Neden Kritik ?
- Destekleyici Finansal Mekanizmalarda Hangi Modeller Öne Çıkıyor ?

Şekil 2.21. Yeşil Hidrojen Geleceğinde Kritik Zorluklar ve Fırsatlar



Kaynak: IICEC analizleri

2.5.1. Yeşil Hidrojen Üretimine Alternatifler ile Daha Rekabetçi Konuma Gelmesi Hangi Faktörlere Bağlı Olacak ?

Hidrojen üretim maliyetinde temel belirleyiciler, kullanılan teknolojinin, enerjinin ve sermayenin maliyetidir. Günümüzde elektrolizör esaslı hidrojen üretiminin maliyeti, elektrik ve yatırım maliyetlerinde bölgeler bazında görülen önemli farklılıklar çerçevesinde 3,4 ila 12 ABD\$/kg seviyelerindedir. Yeşil hidrojen üretiminin ekonomisinde öne çıkan unsurlar aşağıda özetlenmektedir:

- **Seviyelendirilmiş Hidrojen Üretim Maliyeti, SHÜM (LCOH¹⁸):** Birim hidrojen üretimi başına proje kapsamında yapılan tüm harcamaların bugüne indirgenmiş değeridir. Marjinal üretim maliyetinden farklı olup, yatırım giderlerinin tamamını kapsamaktadır. Bu nedenle, maliyet analizleri ve karşılaştırmaları için bu gösterge kritiktir.
- **Elektrolizör maliyetleri:** Dünya genelinde raporlanan elektrolizör kurulum maliyetleri¹⁹ alkalın ve PEM elektrolizörler için 1700–2000 ABD\$/kW seviyesindedir. Çin, sahip olduğu rekabetçi avantajlar nedeniyle, alkalın elektrolizörlerde 750–1300 ABD\$/kW aralığında kurulum gerçekleştirebilmektedir. Elektrolizör maliyetlerinde teknolojik ilerlemeler ve ölçeklenme sayesinde yaklaşık üçte-iki oranında azalma öngörülmekte olup, bu gelişimin ve teknik performansta iyileşmelerin hidrojen üretiminin ekonomisini güçlendirmesi beklenmektedir²⁰ (detaylar için lütfen Bölüm 2.5.4'e bakınız).
- **Elektrik maliyetleri:** Elektrik girdi maliyeti, elektrolizör hidrojen ekonomisinin en önemli bileşenini oluşturmaktadır. Örneğin mevcut teknolojilerle, yatırım ve işletim giderleri hariç tutulduğunda dahi 1 ABD\$/kg seviyesinde hidrojen üretim maliyeti ancak 20 ABD\$/MW-saat elektrik girdi maliyeti ile sağlanabilmektedir (IEA, 2023f). Dolayısıyla, gerçek maliyetin literatürde yaygın olarak görülen, 2050 için 1 ABD\$/kg hedefleri civarında seviyelere düşürebilmesi için teknolojik gelişim hızına ek olarak oldukça düşük elektrik girdi maliyetleri gerekmektedir (10–15 ABD\$/MW-saat).
- **Sermayenin Ağırlıklı Ortalama Maliyeti, SAOM (WACC²¹):** Hidrojen projeleri sermaye-yoğun niteliğe sahiptir. Bu nedenle, özellikle finansman maliyeti üretimin ekonomisinde ve değer zincirinin genelinde oldukça etkili olmaktadır. SAOM'inde 3 puan artış durumunda, temiz hidrojen üretimine ilişkin toplam proje maliyetlerinde üçte-bir oranında artış gerçekleşmektedir. Buna ek olarak, yenilenebilir elektrik girdisi için gerekli yatırımların sermaye yoğunluğunun yüksek olması da hidrojen üretiminin toplam ekonomisi bakımından dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

¹⁸ Levelized Cost of Hydrogen. Detaylı bilgi için <https://www.lazard.com/media/12qcx11j/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-vf.pdf>

¹⁹ EPC maliyetleri

²⁰ PEM ve Alkaline elektrolizörlerin ortalaması olarak 2023 yılında 1500–2000 ABD\$/kW ve 2050 NZE Senaryosuna göre 2030 yılında 600 ABD\$/kW

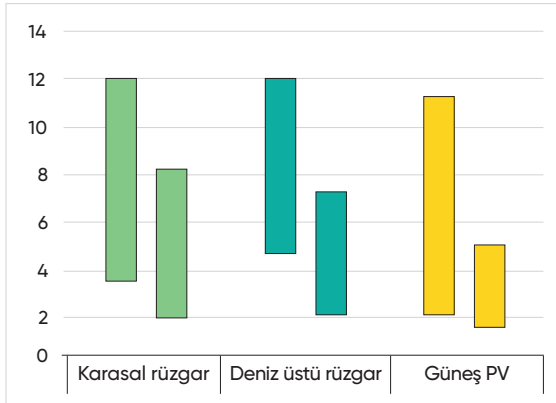
²¹ WACC, Weighted Average Cost of Capital

Yapılan çalışmalara göre, SAOM'inin %5'den %10'a çıkması hidrojen üretim maliyetini %40 artırmaktadır. Gelişmekte olan ekonomilerde sermaye maliyetlerinin, gelişmiş pazarlara göre daha yüksek olması, hidrojen ekonomisinin iyileştirilmesi bakımından önemli bir gelişim alanı durumundadır (IEA, 2023f).

- **Doğal gaz fiyat dinamikleri ve karbon maliyeti:** Doğal gaz fiyatlarının gelişimi, yeşil hidrojen maliyetlerinin rekabetçiliği üzerinde belirleyici olan bir diğer önemli unsurdur. Doğal gaz maliyetlerinde 2022 yılına göre kaydedilen kısmi düşüşün etkisiyle, yeşil hidrojenin maliyet farkı büyümektedir. Rusya-Ukrayna savaşı öncesinde doğal gazdan üretimin maliyeti (gri hidrojen) 1-3 ABD\$/kg olarak gerçekleşirken, 2022 yılında gaz fiyatlarında artışın neticesinde 2 - 6 ABD\$ seviyesine yükselmiş ve 2023 yılında ise tekrar 2021 seviyelerine yaklaşmıştır. Günümüzde doğal gazdan KYKD ile entegre üretim maliyeti (mavi hidrojen) 1,5-3,6 ABD\$/kg seviyesindedir. (IEA, 2023f). Karbon maliyetlerinde artış ise yeşil hidrojenin geleneksel alternatiflere karşı rekabetçiliğini güçlendirmektedir.

Net-sıfır patikası ile uyumlu, ölçeklenmenin hızlı gelişebildiği bir büyüme senaryosunda 2030 yılında güneş ve rüzgardan yeşil hidrojen üretim maliyetinin, bölgeler arasında yenilenebilir enerji potansiyelinde ve sermaye maliyetlerindeki farklılıklar çerçevesinde 2-7 ABD\$/kg aralığına düşebileceği tahmin edilmektedir (Şekil 2.22). Güçlü yenilenebilir enerji potansiyelleri çerçevesinde, Afrika, Orta Doğu, Şili ve Avustralya gibi güneş ışınımı yüksek bölgelerde ve rüzgar kapasite faktörü bakımından avantajlı olan, kuzey-batı Avrupa gibi bölgelerde üretim maliyetinin 2 ABD\$/kg civarı seviyelere inebileceği öngörülmektedir (IEA, 2023f).

Şekil 2.22. Yeşil Hidrojen Üretim Maliyeti (2022, 2030²², ABD\$/kg)



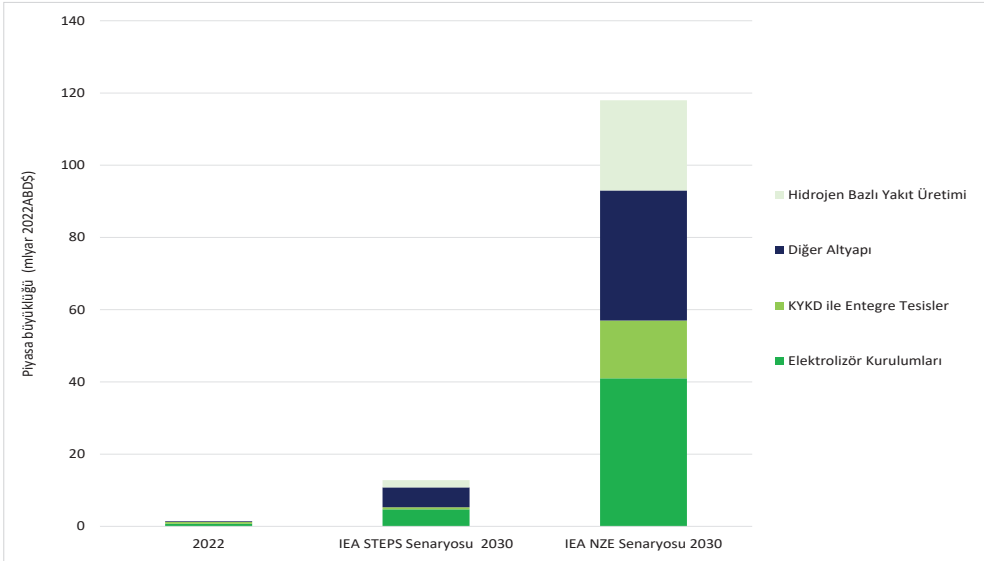
Kaynak: IEA, 2023f

²² IEA NZE Senaryosu

2.5.2. Piyasanın Büyüme Potansiyeli Yüksek Bileşenleri Yakın ve Orta Dönemde Nasıl Gelişebilir ?

Bölüm 2.4'te sunulan, 1,5 °C hedefi ile uyumlu orta ve uzun dönem perspektifinde, hidrojenin nihai enerji tüketiminde henüz ihmal edilebilir seviyede olan payı 2050 yılında %8'e ulaşmaktadır (IEA, 2023b). Bunu sağlayacak üretim, talep ve altyapı gelişim dinamikleri ise hidrojen ekosisteminde hızlı ve sürdürülebilir büyümenin gerçekleşebilmesine bağlıdır. Temiz hidrojende yüksek büyüme potansiyeli, güçlü bir değer zinciri ve büyük bir piyasa için önemli bir zemin oluşturmaktadır. 2022 yılında 1,4 milyar ABD\$ büyüklüğe sahip olduğu hesaplanan düşük emisyonlu hidrojen pazarının, IEA NZE senaryosunda 2030 yılına kadar 117 milyar 2022ABD\$'ına ulaşması beklenmektedir²³ (Şekil 2.23). Elektrolizör kurulumları yatırımları 2022 yılında 600 milyon ABD\$ olarak gerçekleşmiştir (2021 yılına göre iki kat artış). Hızla büyümesi beklenen düşük-emisyonlu hidrojen pazarının toplam büyüklüğünde elektrolizörlerin ağırlığının devam etmesi öngörülmektedir. Net-sıfır patikasında 2030 itibariyle elektrolizör kurulum pazarı 41 milyar 2022ABD\$'ına çıkmaktadır (2030 yılına kadar olan dönemde yıllık %70 artış) (IEA, 2023f). Elektrik girdisini temin edecek düşük karbonlu elektrik üretim yatırımları, söz konusu pazar büyüklüklerini artıracaktır²⁴.

Şekil 2.23. Temiz Hidrojen Piyasasının Gelişimi Perspektifi (2022, 2030, Milyar 2022ABD\$)



Kaynak: IEA, 2023f

²³ IEA STEPS Senaryosunda, mevcut ve açıklanan politikalarının devam etmesi durumunda 12 milyar 2022ABD\$

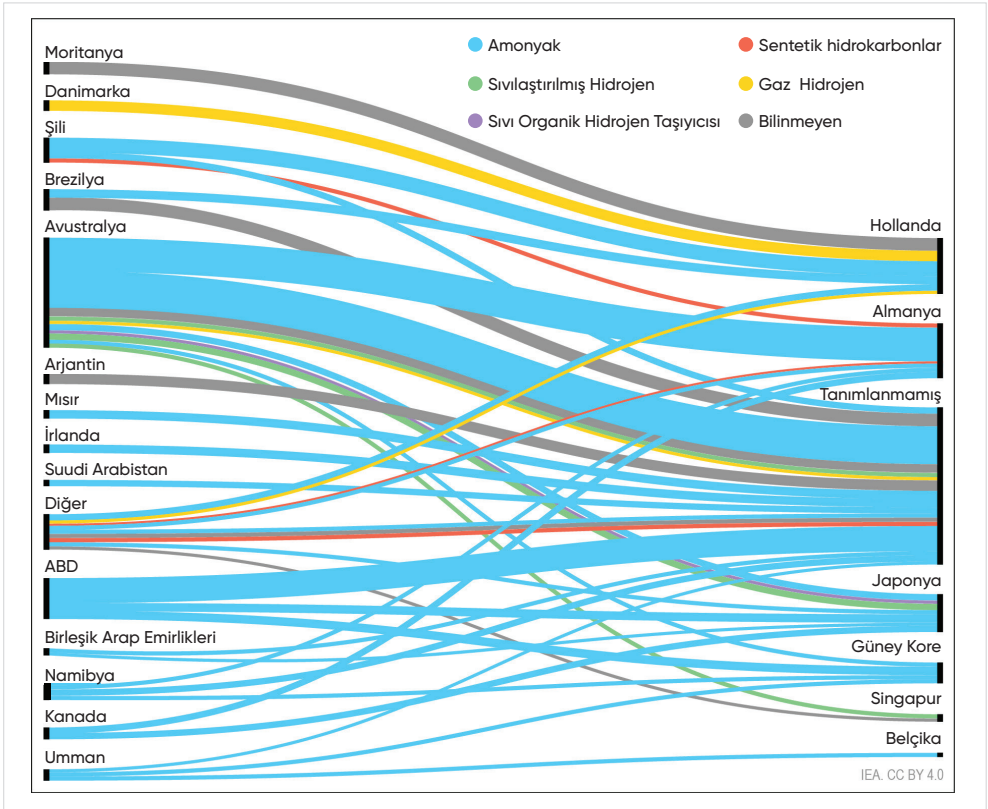
²⁴ IEA NZE Senaryosunda 2030 yılına kadar temiz hidrojen gelişimini temin edecek yenilenebilir elektrik üretimi yatırım miktarı asgari 150 milyar 2022ABD\$ olarak öngörülmektedir.

2.5.3. Arz ve Talepte Hem Yüksek Büyüme Hem de Sürdürülebilir Denge Sağlanabilecek mi ?

Hidrojen üretimine, talebine ve ticaretine ilişkin politika hedefleri ve gelişen proje stoğu incelendiğinde,

- Açıklanan üretim hedefleri, 2050 net-sıfır patikası için öngörülen 2030 seviyelerinin sadece beşte-birine karşılık gelmektedir.
- Politika ve stratejilerin son dönemde daha çok üretim tarafı hedeflerine odaklı geliştiği görülmektedir. Somut olarak açıklanmış 27-35 Mt üretim hedefine karşın, talep politika hedeflerinde büyüme perspektifi bunun yarısından azdır (14 Mt). Bu nedenle, arz ve talepte büyüme dinamiklerinin, iklim politikalarını ve ilgili hedefleri destekleyici yönde gelişmesi gerekmektedir.
- Üretime ve talebe ilişkin resmi nitelikte hedefler arasındaki farkın büyüklüğü, talepte güçlü büyüme sinyalleri olmaksızın hidrojen ekosisteminin dengeli ve sürdürülebilir arz talep dinamikleri ile gelişimi bakımından bir risk olabileceğine işaret etmektedir.
- 2030 yılı için planlanan üretim kapasitesinin sadece %10'u için alım sözleşmeleri mevcut olup, kontrata bağlanmış hacimlerin ise sadece %13'ü henüz yasal yönden bağlayıcı niteliktedir.
- Ticaretin ilk örnekleri gelişmeye başlamıştır (Şekil 2.24). İthalatçı tarafında yaklaşık 12 Mt resmi olarak açıklanmış hedef bulunmaktadır (AB 10 Mt ve Güney Kore yaklaşık 2 Mt) İhracat tarafında, çok sayıda ülke konumlanmaya başlamakla birlikte ilk gelişim aşamasındaki projelerin tamamı dikkate alındığında dahi resmi ithalat hedeflerinin yarısından azını karşılayabilecek bir proje bazının geliştiği görülmektedir. Ticaretin gelişiminde politika hedeflerinin yanı sıra, düzenleyici çerçeveler ve üretimden taşımaya altyapılarda gelişimin belirleyici olacağı değerlendirilmektedir (BNEF, 2023; IEA, 2023a; IEA, 2023b; IEA, 2023f).

Şekil 2.24. Temiz Hidrojen Ticaretinin Bölgesel Gelişimi Perspektifi (2030)



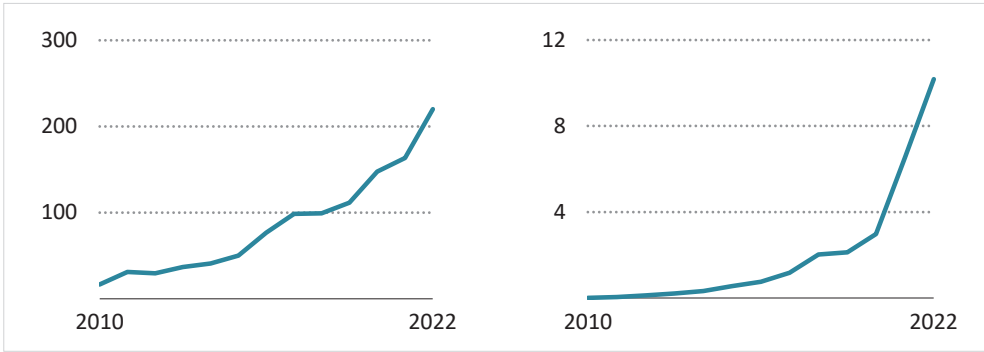
Kaynak: IEA, 2023f

2.5.4. İnovasyonda ve Teknolojik Gelişimde Hangi Önemli Fırsatlar Var ?

Temiz enerjide son dönemde çok yüksek büyümenin gerçekleştiği iki alan, güneş PV teknolojilerinin üretiminde, kurulumlarında ve elektrikli mobilitadaki hızlı yükseliştir (Şekil 2.25). 2010 yılından bu yana güneşte yıllık kapasite artışı 17 GW/y seviyesinden 200 GW/y'ün üzerine çıkmış, güneşin toplam kurulu güç içerisindeki payı %1'in altından %12'ye yükselmiştir. Güneşin 2030 yılına kadar olan dönemde de elektrik kurulu gücü içerisinde payını en hızlı artan teknoloji olması, 2050 yılında güneşten elektrik üretiminin dünya elektrik arzının en ağırlıklı bileşenini oluşturması öngörülmektedir (IEA, 2023b). Elektrikli araç satışlarının yıllık performansı da aynı dönem içerisinde ihmal edilebilir seviyelerden 10 milyonun üzerine çıkmıştır. Satışların 2023 yılında 15 milyona ulaşması beklenmektedir. Analizler, 2030 yılına doğru satılan her iki arabadan birinin elektrikli olacağına işaret etmektedir (2018 yılında %1, 2020 yılında %4, 2022 yılında %14 ve 2023 yılında yaklaşık %20). 2050 yılında karayolu araç parkının ağırlıklı bölümünü elektrifikasyon çözümlerinin oluşturması beklenmektedir (IEA, 2023b; IEA, 2023i).

İthal fosil yakıt ağırlığını azaltmaya ve enerji güvenliğine ilişkin stratejiler son dönemin temiz enerji dönüşümünde etkili olan teknolojilerin hızlı yayılımını destekleyen en önemli faktörlerdir. Büyümenin itici güçleri, inovasyon ve Ar-Ge ile desteklenen teknolojilerin gelişim hızı, pazarlarda ölçeklenme ve ilgili altyapılarda ilerlemeler ile sağlanan maliyet düşüşleri, dolayısıyla rekabet avantajlarıdır. Bu iki teknolojide deneyimlenen çarpıcı hızda pazar gelişiminin bir benzerinin hidrojen ekosisteminde tekrarlanabilmesi bakımından teknolojik gelişimde sağlanabilecek ivmenin kritik olacağı değerlendirilmektedir.

Şekil 2.25. Yıllık Güneş Kapasite Artışı ve Elektrikli Araba Satışları (2010-2022, GW/y, milyon araç/y)



Kaynak: IEA, 2023b

Hidrojen ekosisteminin bugününü ve geleceğini belirleyecek teknolojilerin gelişim seviyeleri IEA TRL²⁵ skalası kapsamında incelendiğinde:

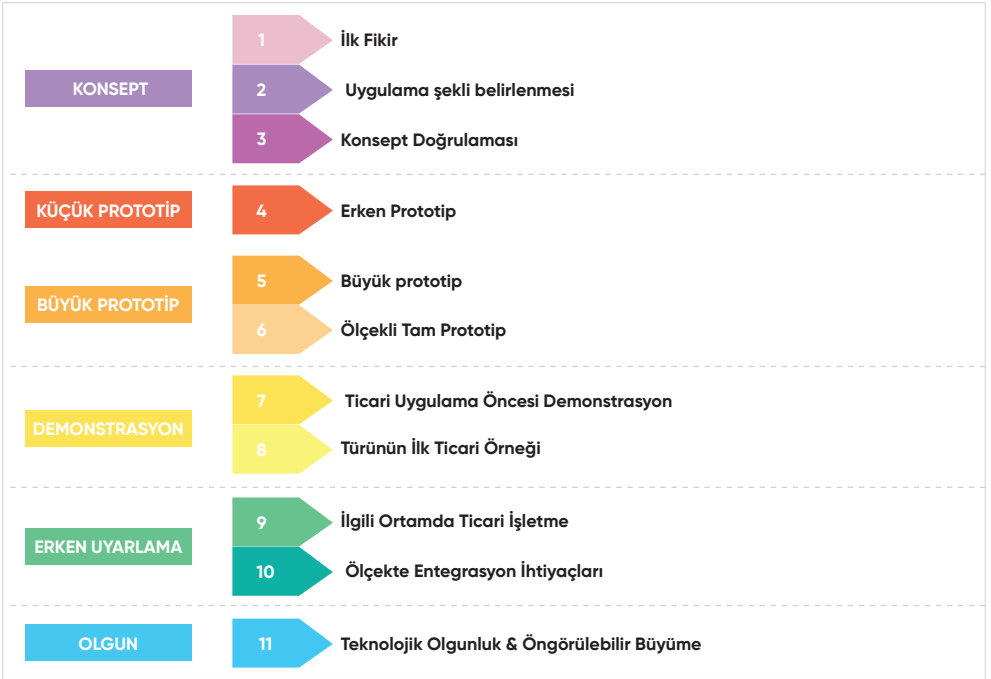
- Elektrolizör alanında, öne çıkan dört teknolojidен ikisinin ticarileşme sürecine girdiği (TRL 9), teknik ve maliyet performansını güçlendirmesi hedeflenen iki teknoloji türünün demonstrasyon ve hemen sonrasında yaygın ticarileşmeye geçiş sürecinde olduğu (TRL 6 ve 7) görülmektedir.
- Fiziksel depolamaya, dağıtımına, dönüşüme ve taşımaya yönelik olarak, tüpler ve tanklar gibi çözümler, yıllar içerisinde konvansiyonel hidrojen çözümlerinde kullanım neticesinde, genellikle teknolojik olgunluğa ve ölçeklenmeye ulaşmıştır (TRL 11). Kamyonlar, amonyak ve sıvı organik hidrojen tankerleri gibi taşıma teknolojilerinin de ölçeklenmeyi tamamladığı (TRL 11), hidrojene özel boru hatlarının ve tuz mağaralarında depolamanın enerji sisteminin diğer bileşenleri ile entegrasyon aşamasında olduğu (TRL 10) görülmektedir. Hidrojen sıvılaştırma teknolojileri ticarileşme aşamasına gelmiştir (TRL 9).

²⁵ Technology Readiness Level

Hidrojenin doğal gazla karışımı, sıvı hidrojen tankerleri gibi teknolojiler ise genelde ticarileşme öncesi demonstrasyon süreçlerindedir (TRL 7). Gelecekte önemli rol oynayabileceği değerlendirilen, kullanılmış doğal gaz üretim sahalarına depolama, amonyağın kriting yoluyla hidrojene verimli dönüşümü gibi alanların ilk gelişim aşamasında ilerlediği (TRL 4) görülmektedir. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklı kısıtlar içerisinde depolamada teknik performansı iyileştirecek çok farklı teknolojiler üzerinde iyileştirmeler sürmektedir (Çoğunlukla TRL 2-5).

- Yakıt hücrelerinde ise olgunluk seviyesinde teknolojilerde büyümeye ek olarak yenilikçi yöntemlere dayalı çalışmalar devam etmektedir (TRL 6-9²⁶) (Şekil 2.26 ve Şekil 2.27) (IEA, 2023e; IEA, 2023f; IEA, 2023j).

Şekil 2.26. Teknoloji Hazırlık Seviyeleri (TRL²⁷)



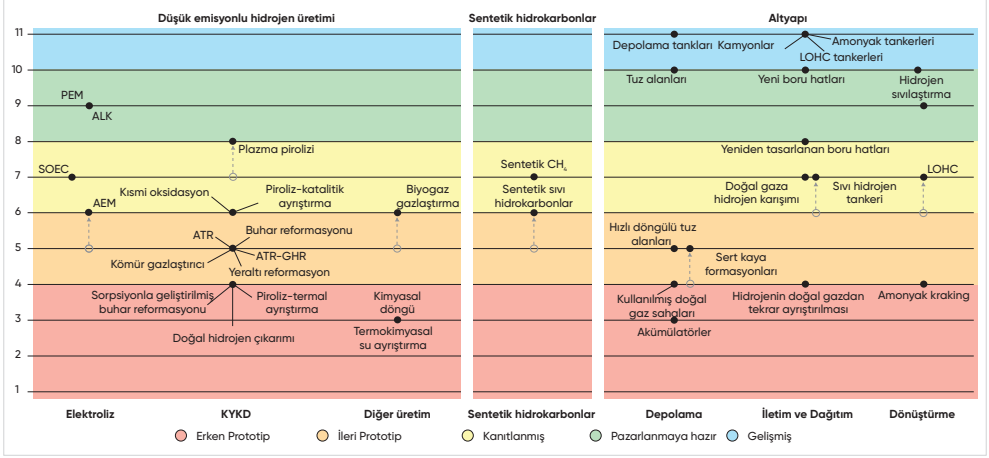
Kaynak: IEA, 2023

²⁶ Günümüzde ağır ticari karayolu araçlarındaki gelişmeler ticarileşmiş yakıt hücresi uygulamalarında başı çekmektedir.

²⁷ Daha fazla bilgi için

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>

Şekil 2.27. Temiz Hidrojen Teknolojilerinde Hazırlık Seviyelerine Genel Bakış (2023)



Kaynak: IEA, 2023f

Elektrolizör teknolojilerinde gelişim ne hedefliyor ?

Elektrolizörler klor-alkalin endüstrisinde, alkalin teknolojiler yoluyla çok uzun süreden beri kullanılmaktadır (2022 yılında 20 GW kurulu kapasite). Hidrojen üretimi için elektrolizör kullanımı ise özellikle 2010'ların sonlarında hız kazanmıştır. Bölüm 2.3.2'de belirtildiği gibi 2023 yılı sonunda 3 GW seviyesine ulaşması beklenen hidrojen üretimi-odaklı elektrolizör kurulumlarında ticarileşme sürecine geçmiş iki teknoloji öne çıkmaktadır: Alkalin elektrolizörler (ALK) ve Polimer Elektrolit Membran elektrolizörler (PEM) (2023 sonu itibarıyla sırasıyla 1,2 GW ve 0,9 GW). Son dönemde katı-oksit elektrolizör (SOEC) ve anyon değişim membran elektrolizör (AEM) teknolojilerine yönelim de artmaktadır (Toplam kapasitenin 2019 yılında %5'i ve 2023 yılında yaklaşık %30'u) (Şekil 2.28). Elektrolizörlerde en önemli fırsat bileşenleri, maliyetlerde düşüş, verim artışı²⁸ ve işletme performansında gelişim potansiyelidir. 2050 yılına kadar olan dönemde PEM ve ALK maliyetlerin ortalama üçte-iki oranında düşmesi ve ortalama verimin de önemli oranda artması beklenmektedir (IEA, 2023b; IEA, 2023f). SOEC²⁹ ve AEM³⁰ teknolojilerinde sağlanabilecek ilerlemeler performansı daha ileriye taşıyabilmektedir³¹.

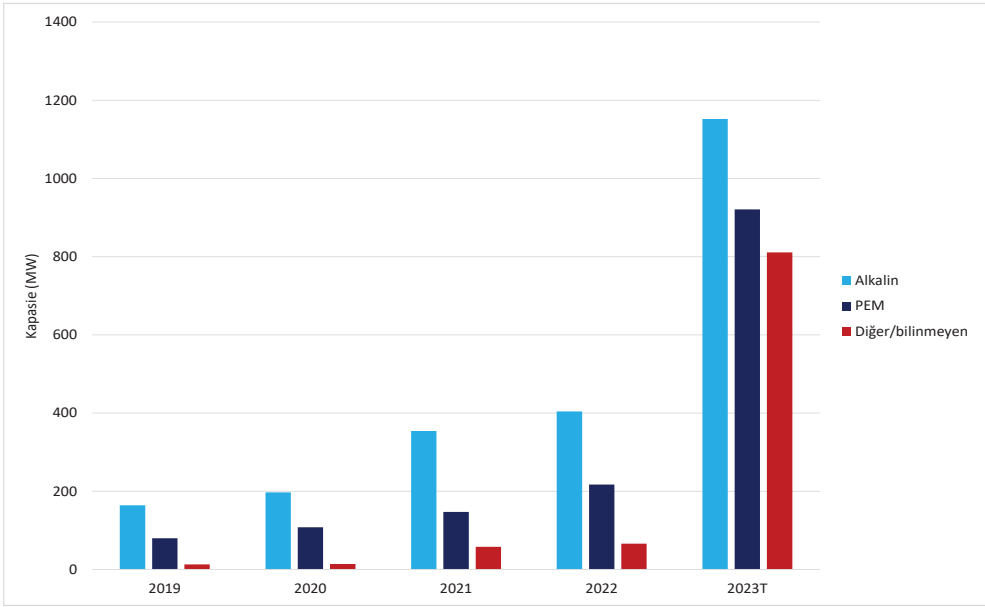
²⁸ Elektrolizör verimi, birim elektrik girdisinden üretilen hidrojenin ısı değeri olarak ölçülmektedir. Detaylar için EKLER'e bakınız.

²⁹ Solid-oxide

³⁰ Anion Exchange Membrane

³¹ Elektrolizör teknolojilerine ilişkin daha fazla bilgi için <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>

Şekil 2.28. Hidrojen Elektrolizör Kapasitesinin Teknolojilere Göre Gelişimi (2019–2023T, MW)



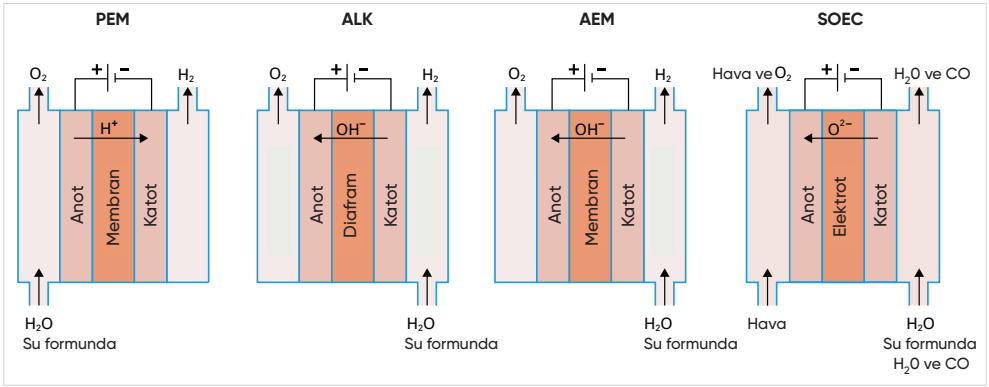
Kaynak: IEA, 2023h

Elektrolizörler, elektrik enerjisi ve su kullanılarak, elektrolitlerde gerçekleşen redoks tepkimeleriyle suyu hidrojene ve oksijene dönüştüren sistemlerdir (Şekil 2.29). Alkaline teknolojiye bu amaçla alkaline bir çözelti (konsantre KOH veya NaOH) kullanılmaktadır. Alkaline teknolojisi en eski yöntem olarak günümüzde verim ve maliyet avantajları bakımından önemini sürdürmektedir. Platin, iridyum gibi görece maliyetli katalizör malzemelerinin kullanımı nedeniyle halen alkaline teknolojisine göre daha maliyetli olan PEM elektrolizörler, maliyetlerde düşüş potansiyeli, daha yüksek basınçlarda çalışabilme özelliği, dolayısıyla daha düşük sıkıştırma ihtiyacı, üretilen hidrojenin yüksek saflıkta olması, yüksek esneklik ve birim çıktı başına daha düşük yüzey alanı gereksinimi gibi avantajları ile öne çıkmaktadır. Son dönemde proje stoğunda PEM teknolojisi çok daha fazla yaygınlaşmaktadır (IEA, 2023h).

Gelişim aşamasındaki SOEC (TRL7), seramik tabanlı membran teknolojisi kullanılmaktadır. Katotta oluşan oksijenin hidrojenle birlikte anoda iletildiği bu teknoloji günümüzde en yüksek verim performansını sağlamaktadır. Bununla birlikte, SOEC teknolojisi PEM elektrolizörler ile kıyaslandığında daha sınırlı esneklik kabiliyetine sahiptir. Bu teknolojiler yüksek sıcaklıklarda çalışmakta ve atık ısı, biyoyakıt veya nükleer enerji gibi ısı kaynakları ile beslenebilmekte, diğer endüstriyel proseslere entegre şekilde gelişim yönünde bir perspektif de sunmaktadır. Bu teknolojiye de maliyet düşüş ve verim artış potansiyelinin yüksek olduğu, özellikle orta ve uzun vadede daha yüksek gelişim potansiyel varlığı tespit edilmektedir (IEA, 2023j).

Diğer üç teknolojiye kıyasla teknolojik gelişim bakımından erken aşamalarda olan AEM teknolojisi (TRL 6) ise alkalın ve PEM elektrolizörlerin bazı avantajlarını birleştirerek öne çıkmaktadır. PEM teknolojisinde olduğu gibi bu elektrolizörlerde de polimer membranlar elektrolit olarak kullanılmakta ve böylelikle alkalın elektrolizörlerde yaşanan korozyon benzeri sorunların önüne geçilebilmektedir. Bu teknolojiye malzeme performansı avantajlarına ek olarak maliyet düşüşü, yüksek esneklik ve verimlilik bakımından önemli bir potansiyel olduğu değerlendirilmektedir. PEM elektrolizörlere göre platin, iridyum gibi görece maliyetli kritik minerallere bağımlılığın düşük olması da önümüzdeki dönemde AEM teknolojisini daha fazla öne çıkarabilecek kritik faktörlerdir (IEA, 2023j; Sbh4, 2023).

Şekil 2.29. Elektrolizör Teknolojilerine Genel Bakış



Kaynak: Sbh4'ten uyarlanmıştır.

Hidrojen depolamada zorluklar ve fırsatlar neler ?

Hidrojen ekosisteminde güçlü ve sürdürülebilir büyüme bakımından diğer bir kritik teknoloji gelişim alanı depolamadır. Hidrojenin sıkıştırılmasına ve sıvılaştırılmasına dayalı fiziksel yöntemlerden, malzeme-bazlı olarak, fiziksel ve kimyasal etkileşimler kullanan yenilikçi depolama teknolojilere kadar geniş bir spektrumda önemli iyileşme fırsatları bulunmaktadır (Şekil 2.30).

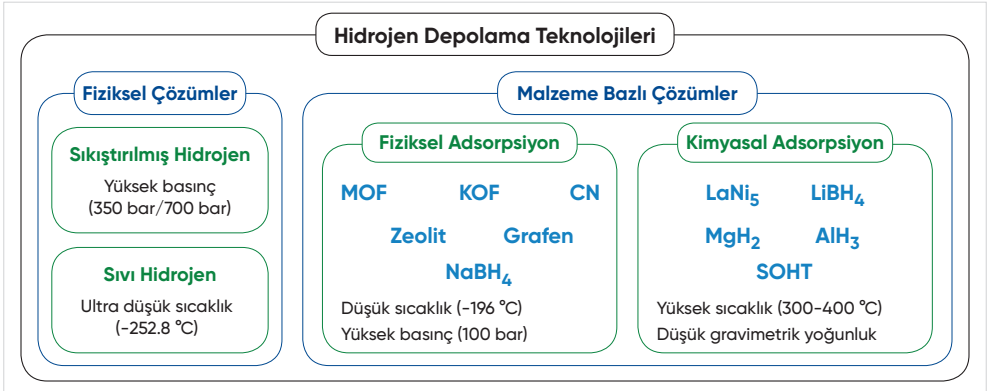
Hidrojeni gaz formunda yüksek basınçlara sıkıştırmak (genellikle 350-700 bar), hacimsel enerji yoğunluğunu büyük oranda artırmakta olup, basınçlı tanklar en yaygın depolama yöntemlerinden birisi durumundadır (TRL 11). Tankın basınç seviyesi ve hacmi depolanabilecek hidrojen miktarını belirlemektedir. Bu teknoloji günümüzde dört kategoride sınıflandırılmakta olup, tümüyle kompozit malzeme kullanan tanklar üzerinde de çalışmalar sürmektedir³².

³² Tip I: genelde çelik; Tip II: fiber-reçine kompozit ile sarılmış kalın metalik astar kasnağından yapılmış kap; Tip III: fiber-reçine kompozit ile tamamen sarılmış metalik bir astardan yapılmış kap; Tip IV: fiber-reçine kompozit ile tamamen sarılmış polimer astardan yapılmış kap. Tip III ve Tip IV sistemlerde gravimetrik kapasiteler çeliğe göre dört katın üzerinde artmakta, daha yüksek basınçlara dayanıklılık sağlanmaktadır.

Hidrojen, Bölüm 2.2'de belirtildiği gibi, oldukça düşük sıcaklıklara (-253°C) soğutularak sıvı fazına geçilebilmektedir. Sıvı hidrojenin gaz halindeki hidrojene göre hacimsel enerji yoğunluğu önemli ölçüde yükselmekle birlikte, bu seviyede sıcaklıkları korumak için enerji-yoğun kriyojenik sistemlere ve iyi yalıtılmış depolama tanklarına ihtiyaç bulunmaktadır (TRL 8-9). Tasarımda inovasyon süreçleri genellikle tank boyutlarının artırılmasına odaklanmaktadır. Hidrojenin amonyak formunda depolanması da oldukça yaygın ve bilinen çözümlerden biridir³³ (TRL 11).

Malzeme odaklı gelişim alanlarında inovasyon süreçleri, kütle ve hacim bazında enerji yoğunluğunu yükseltmeyi hedeflemekte, hızlı kinetik özellikler, yüksek güvenlik performansı, maliyetlerde düşüş, makul sıcaklık ve basınç koşullarında operasyonun sağlanabilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Hidrojeni katı metal bileşiklerin içerisinde³⁴ depolamak hacimsel enerji yoğunluğunu artıran önemli bir çözüm olarak gelişmektedir. Bu çerçevede hafif elementlerin hidrür formları (bor ve alüminyum gibi) ve bazı geçiş elementleri (demir, kobalt ve nikel gibi) öne çıkmaktadır. Son dönem çalışmaları nano-malzemelere de odaklanmaktadır. Bu tür malzemeler, hidrojeni geri dönüşümlü kimyasal bir tepkimeyle depolamaktadır. Hidrojen, poroz nitelikte malzemelerin yüzeyinde adsorbe edilerek de depolanabilmektedir (TRL 2-3). Aktif karbonlar, metal-organik ve kovalent-organik bazlı malzemeler (MOF ve COF) büyük yüzey alanı özellikleriyle çalışılmaktadır. Bu teknolojilerde, atmosferik basınç ve sıcaklık koşullarında hidrojen tutma kapasitesi düşük olup, hedeflenen performans seviyeleri düşük sıcaklıklarda (-200°C civarı) ve yüksek basınç altında sağlanabilmektedir (Liu & Shui, 2022; IEA, 2023j).

Şekil 2.30. Hidrojen Depolama Teknolojilerine Genel Bakış



Kaynak: Liu & Shiu,2022'den uyarlanmıştır.

³³ Endüstriyel ölçekte amonyak üretiminin geçmişi yaklaşık yüz yıl öncesine dayanmaktadır.

³⁴ Metal hidrür

³⁵ Depolama teknolojilerine ilişkin daha fazla bilgi için <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>

Hidrojen kullanımında hangi teknolojik gelişmeler öne çıkıyor ?

Son dönemde otomotivde hidrojen uygulamalarının, elektrifikasyon çözümlerinin batarya ağırlıklarına ve menzile ilişkin çeşitli zorlukları nedeniyle özellikle ağır ticari araçlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Yakıt hücreli kamyon parkı 2022 yılında 7000'in üzerine ulaşmıştır (yıllık %60 üzeri büyüme). Satışların büyük çoğunluğu, küresel araç parkının %95'den fazlasına ev sahipliği yapan Çin'de gerçekleşmektedir. Yakıt hücreli otobüs parkı ise özellikle kentsel ulaşım uygulamaları yoluyla büyümektedir (2022 yılında yaklaşık %40 artış). 2023 yılının ilk yarısında dünya genelinde hidrojene dayalı otobüs parkı 7.000'e ulaşmıştır. Söz konusu parkın yaklaşık %85'i Çin'de bulunmakta olup, hidrojenli otobüslerde Avrupa ikinci en büyük araç parkına sahiptir. Güney Kore ve ABD de pazarın geliştiği bölgelerdir. Haziran 2023 itibarıyla dünya genelinde yaklaşık 1100 hidrojen dolum istasyonu (HRS³⁶) faaliyettedir (European Commission, 2023d; IEA, 2023f).

Karayolu araç parkında, özellikle ağır ticari araçlarda yakıt hücresi uygulamalarında yaygınlaşmayla birlikte hidrojenli araçların payının özellikle 2040 sonrasında artarak 2050 yılında %16'ya ulaşması beklenmektedir (IEA, 2023b). Yakıt hücresi teknolojilerinde gelinen önemli aşama ve performansı daha fazla geliştirebilecek yenilikçi teknolojilerde ilerleme fırsatları, hidrojenin nihai enerji tüketim sektörlerinde büyümesinin en önemli destekçilerinden birisi olacaktır (TRL 6-9)³⁷ (IEA, 2023j). İçten yanmalı motorlarda doğrudan hidrojen yanması yoluyla dönüşümü sağlayacak teknolojiler üzerinde çalışmalar da devam etmektedir.

Havacılık ve denizcilikte temiz hidrojen kullanımını sağlayacak teknolojilerde de önemli gelişmeler sağlanmaktadır. Havayolu taşımacılığında hidrojen yakıtlı uçak tasarımları geliştirmekte, sürdürülebilir havacılık yakıtlarına ilişkin gelişmeler çerçevesinde hidrojen tabanlı sentetik yakıtlara yönelim güçlenmektedir (2023; IATA, 2023). Denizcilikte metanol çözümleri uygulamaya geçmeye başlarken, amonyak kullanan gemi teknolojilerine yönelim de son dönemde güçlenmektedir (Global Maritime Forum). Sektörde ilkler olarak, ABD ve Norveç'te yakıt hücreli deniz araçları küçük ölçeklerde faaliyete geçmiştir (H2-VIEW, 2023; IEA, 2023b; IEA, 2023f; Offshore Energy, 2023). Denizcilikte temiz enerjiye geçiş hedefleri içerisinde amonyak ve hidrojen yakıtlı deniz taşıtlarının 2030'a kadar olan dönemde ticari kullanımının yaygınlaşması öngörülmekte, sürdürülebilir havacılık yakıtlarında gelişim perspektifi 2035-2040 arası dönemde ticarileşme fırsatlarına işaret etmektedir (Şekil 2.31). Havacılıkta sentetik hidrojen tabanlı yakıtların toplam enerji tüketiminde payının 2035 yılında %4'e ve 2050 yılında üçte-birin üzerine ulaşması beklenirken, hidrojen ve türevlerinin denizcilik sektöründe 2035 yılında toplam enerji tüketiminin %20-25'ini ve 2050 yılında da yaklaşık üçte-kisini karşılayabileceği öngörülmektedir.

³⁶ HRS, Hydrogen Refueling Station

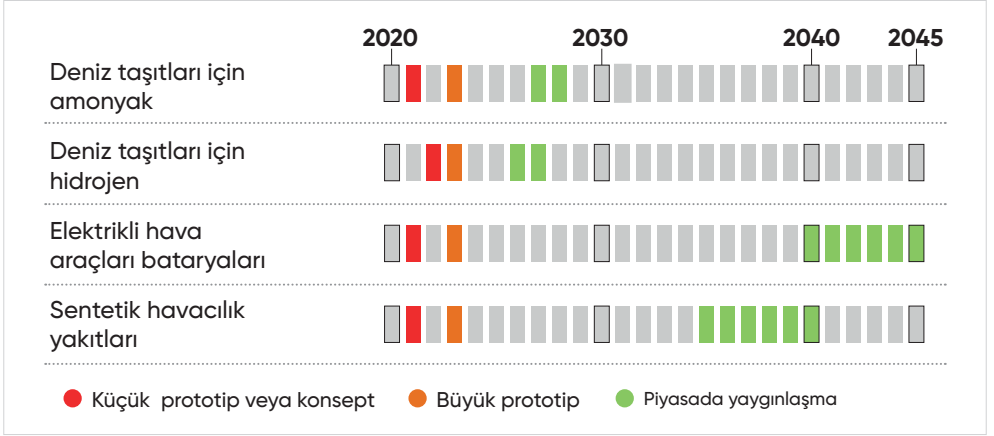
³⁷Yakıt hücresi teknolojilerine ilişkin detaylı bilgi için

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>

Sanayi sektöründe temiz hidrojen uygulama örnekleri de karbon-nötr hedefler ve çok boyutlu sürdürülebilirlik öncelikleri kapsamında gelişmektedir. Örneğin, Avrupa'da yüksek ölçekli bir destek ile faaliyete geçirilen HYBRIT projesi, tamamı elektrolize dayalı hidrojen yoluyla DRI³⁸ teknolojisini çelik üretiminde yaygınlaştırmayı, böylelikle emisyon-yoğunluğu yüksek olan sektörde karbon-nötr üretim yöntemlerinin gelişmesini hedeflemektedir (Şekil 2.32) (European Commission, 2023e; HYBRIT websitesi, 2023). Yeşil hidrojende en büyük talep segmentlerinden birini oluşturması beklenen çelik üretiminin 2035 yılında %15 ve 2050 yılında yaklaşık %45'inin elektroliz-tabanlı hidrojen yoluyla gerçekleştirilmesi beklenmektedir (IEA, 2023b).

Elektrik üretiminde hidrojen kullanımının da uzun vadede fosil yakıt tüketiminin devam edeceği beklenen bazı bölgelerde, elektrik sektörünün net-sıfır patikasını destekleyeceği öngörülmektedir. Hidrojenin elektrifikasyon oranı hızla büyüyen genel enerji sistemi içerisinde önemli katma değeri esnek ve uzun dönemli depolama yetkinlikleri oluşturacaktır. Hidrojenin binalarda kullanımının, elektrifikasyon hızlı büyüme ve verimli ısı pompası çözümlerinde ticarileşme neticesinde büyük talep segmentlerinden birini oluşturmayacağı değerlendirilmektedir (NZE patikasında 2050 yılında binalarda enerji talebi içerisinde elektrik enerjisinin payı %66 ve hidrojenin payı sıfıra yakın) (IEA, 2023b).

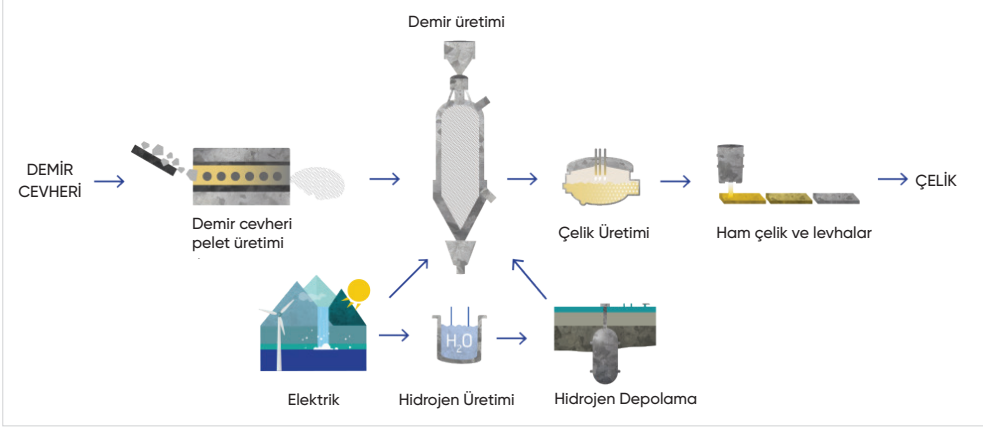
Şekil 2.31. Havaçılık ve Denizcilikte Kritik Temiz Enerji Teknolojilerinde Gelişim Perspektifi



Kaynak: IEA, 2023b

³⁸ ERI, Direct Reduced Iron

Şekil 2.32. Çelik Üretiminde Elektrolizör Tabanlı Hidrojen Kullanımı (HYBRIT Örneği)



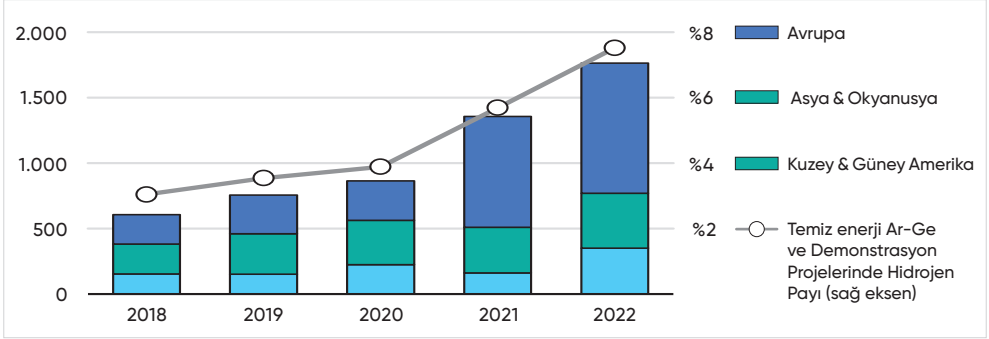
Kaynak: HYBRIT web sayfasından uyarlanmıştır.

Kamu ve sanayide Ar-Ge ve inovasyon açılımları ne gösteriyor ?

Son dönemde hükümetler tarafından temiz enerjiye yönelik Ar-Ge ve demonstrasyon harcamaları da hızla yükselmektedir. Bu yönelim, hidrojen teknolojilerinde de kendini göstermektedir. Kamunun hidrojen teknolojilerine yönelik harcamaları 2020-2022 yılında iki kat, 2018-2022 döneminde ise üç katın üzerinde artış göstermiştir (2022 yılında yaklaşık 2 milyar ABD\$). Aynı dönemde hidrojenin toplam temiz enerji harcamaları portföyü içerisindeki payı %3'ten yaklaşık %8'e yükselmiştir (IEA, 2023f) (Şekil 2.33).

Hidrojende inovasyon geniş bir perspektiften irdelendiğinde, patent aktivitesinde de güçlü bir artış görülmektedir. 2011-2020 döneminde uluslararası hidrojen patentlerinin yaklaşık yarısının üretime odaklı alanlarda, diğer yarısının ise depolama, taşıma, dönüşüm ve nihai kullanım sektörlerinde gerçekleştiğini göstermektedir. Aynı dönemde üniversiteler ve kamu araştırma kurumlarının patent portföyündeki payı %13 olarak gerçekleşmiştir. Elektrolizör teknolojilerinde patent portföyleri, enerji ve iklim önceliklerini ve son dönemdeki pazar gelişmelerini yansıtarak büyümektedir. Kimya sektörü gibi geleneksel hidrojen tüketicilerinin yanı sıra otomotiv ve lojistik uygulamalarına yönelik patentlerde son yıllarda artış görülmektedir. Talep beklentilerine paralel olarak çelik gibi potansiyel tüketim alanlarına ilişkili çözümlere yönelim de hızlanmaktadır (IEA, 2023f; IEA, 2023k). Temiz, sürdürülebilir enerji ve iklim teknolojilerine girişim sermayesi ilgisi hızla artarken, hidrojende yenilikçi çözümler yeni bir fırsat alanı olarak gelişmektedir.

Şekil 2.33. Hidrojende Ar-Ge ve Demonstrasyon Projelerine Odaklı Kamu Harcamalarının Gelişimi (2018-2022, milyar 2022ABD\$)



Kaynak: IEA, 2023f

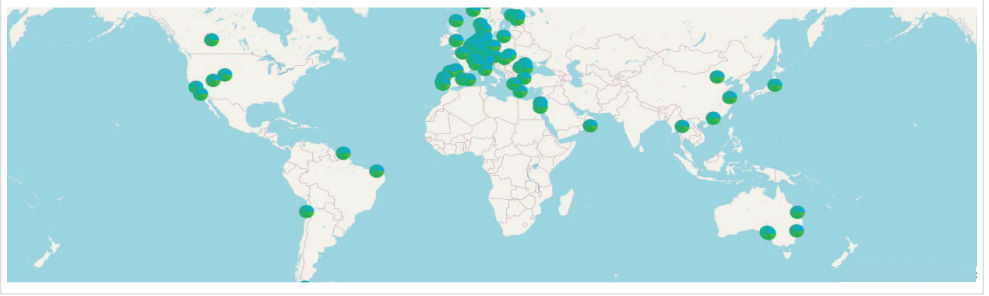
2.5.5. Hidrojen Vadileri ve Hub'ları Neden Önemli ?

Hidrojen kümelenme yaklaşımları, vadi ve hub konsepti, hidrojenin ilk gelişim aşamalarında iyi uygulama örnekleri olarak önemini artırmaktadır. Hidrojen değer zincirinde bölgesel bir yaklaşım ekseninde yeşil hidrojen üretiminin ve tüketiminin entegre eden hidrojen vadileri, farklı sanayi sektörlerinden mobiliteye kadar geniş bir spektrumda gelişmektedir. Hidrojen depolama ve taşıma altyapılarında planlama ve yatırımlar da söz konusu vadilerin kritik bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Vadiler bölgesel ölçekte değer zincirleri oluşturarak, ölçeklendirme için baz yaratmaktadır.

Günümüzde otuz dört ülkede, farklı büyüklüklerde, toplamda seksenin üzerinde hidrojen vadisinin gelişim aşamasında olduğu bilinmektedir (European Commission, 2023f)³⁹. 2030 itibariyle toplamda yüz vadi kurulması planlanmaktadır. Toplam yatırım portföyü, önemli bir bölümü kamu kaynakları tarafından desteklenmek üzere, 126,7 milyar ABD\$'a ulaşmıştır. Vadi konsepti, AB'nin temiz hidrojen gelişimini destekleyen stratejilerinin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Dünya genelinde hidrojen vadilerinin yaklaşık üçte-ikisi Avrupa'da bulunmaktadır (Şekil 2.34) (European Commission, 2023f; European Commission, 2023g). ABD de son dönemde temiz hidrojen hedeflerini bölgesel hub yaklaşımlarıyla desteklemektedir. H2Hubs Projesi, ülke genelinde temiz hidrojen vadilerine 7 milyar ABD\$ kaynak aktarmaktadır (US DOE, 2023b; US DOE, 2023c).

³⁹ Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen vadisi (HY SouthMarmara) Güney Marmara bölgesinde geliştirilmektedir. Detaylı bilgi için lütfen Bölüm 3'e bakınız.

Şekil 2.34. Hidrojen Vadilerine Bölgesel Bakış (2023)



Kaynak: European Comission, 2023h

2.5.6. Düzenlemeler ve Güvenlik Sürdürülebilir Büyüme için Neden Kritik ?

Düzenleyici çerçevedeki gelişmeler ve değer zincirinde büyümenin ne tür bir piyasa kurgusu içerisinde şekilleneceği de temiz hidrojenin geleceği bakımından kritik öneme sahiptir. Elektrolizde gelişim, elektrik ve yenilenebilir enerji sektörler ile hidrojende gelişimin entegre yaklaşımlarla planlanmasını gerektirecektir. Doğal gazla karışım veya boru hatları ile taşıma gibi seçenekler ise hidrojene enerji şebekeleri içerisinde yeni bir enerji taşıyıcısı niteliği kazandıracığından doğal gaz piyasaları ile etkileşimler de önümüzdeki dönemde daha belirgin duruma gelebilecektir.

Hidrojenin elektrik sistemlerinin esnekliğini güçlendirmede enerji depolama işlevinin yaygınlaşmasının da yine elektrik piyasaları kurgusu ve işleyişi ile önemli bir kesişim alanı olarak öne çıkması beklenmektedir. Hidrojenin farklı formlarda taşınması, depolanması gibi değer zinciri bileşenleri, dolun istasyonlarının ölçeklenmesi gibi alanlarda da doğal gaz ve akaryakıt piyasaları örnekleri ile benzer dinamikler söz konusu olabilecektir. Hidrojenin enerji sistemine entegrasyonun düzenlenmesi ve piyasa işleyişi ile entegrasyonu bakımından bir diğer kritik unsur, ekosistemin gelişim aksının hangi ölçüde dağıtık ve merkezi şekilleneceğidir. Zaman içerisinde arz ve talepte ilk gelişim aşamaları sonrasında hidrojene ilişkin fiyat sinyallerinin oluşumu bakımından enerji borsalarına entegrasyonun sağlanması da önemli bir gelişim ve fırsat alanı olabilecektir.

Hidrojen piyasasının oluşumu ve büyümesi için mutlaka gelişim sağlanması gereken bir diğer önemli başlık ise sertifikasyon sistemlerinin tasarımı ve uygulanması olacaktır (IEA, 2022; IEA, 2023f; IEA, 2023l). İkili anlaşmalara dayalı ticaret için ortak tanımların ve sertifikasyon çerçevelerinin geliştirilmesi ihtiyacına ek olarak, orta ve uzun vadede bölgesel ve küresel hidrojen piyasalarının gelişiminde rekabetçiliğin ve sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için sertifikasyon alanında işbirliklerinin ve ortak tanımlara ve kurallara dayalı modellerin önemi artacaktır.

Hidrojenin özellikleri ve hidrojen teknolojileri, kömür, petrol ve doğal gaz gibi geleneksel enerji formları ve ilgili teknolojilerden önemli farklılıklar içermektedir. Bu itibarla, temiz hidrojenin gelişiminin, enerji, iklim, teknoloji ve sanayi için sağlayacağı çok yönlü faydaların değerlendirilebilmesi için planlamalar, yatırımlar ve operasyonel süreçlerin tamamında güvenliğe ilişkin boyutların kapsamlı ve derinlikli olarak düzenlenmesi ve uygulanması gerekmektedir. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri ve yanma karakteristikleri, kontrolsüz durumlarda önemli potansiyel riskleri beraberinde getirmektedir:

- Hidrojenin yayılma katsayısının yüksek olması, yüksek ısı gücü ve kolay tutuşma özellikleri nedeniyle, istenmeyen yanma dinamiklerinin gelişme riski yüksektir.
- Alev sıcaklığı metandan daha yüksek (Hidrojen 2045 °C ve metan 1875 °C), alev yanma hızı ise metanın dokuz katıdır.
- Doğal gaza kıyasla tutuşması çok daha kolay hidrojenin alevin geri tepme riski de yüksektir.
- Ayrıca, hidrojenin depolanması, taşınması ve kullanımı sırasında malzemeler üzerinde etkileri de kaçak risklerini artırmaktadır (Gökalp, 2020).

Tüm bu nedenlerle, üretimden tüketime değer zincirinin tüm aşamalarında hidrojenin güvenli kullanımı için özel güvenlik standartlarına ve etkin düzenlemelere ihtiyaç bulunmaktadır. Bütüncül risk yönetimi ve özel tedbirler güvenlik felsefesinin ve buna yönelik düzenleyici çerçevenin kritik bileşenlerini oluşturmalıdır (Gökalp, 2019; OECD, 2023). Hidrojenin farklı özellikleri, potansiyel riskleri ve güvenlik önlemleri hakkında endüstride ve kamuoyu genelinde farkındalık artırılmalıdır. Güvenli hidrojen uygulamaları bakımından, eğitimin ve iyi uygulama örneklerinde paylaşımın da önemli gelişim ve fırsat alanı olduğu tespit edilmektedir.

2.5.7. Destekleyici Finansal Mekanizmalarda Hangi Modeller Öne Çıkıyor ?

Hidrojenin güvenli ve temiz enerji geleceğinin kritik bileşenleri arasında konumlandırılması, bu alana önemli finansal kaynakların aktarımını ilk gelişim aşamasında büyümeyi destekleyecek yeni mekanizmaların tasarlanmasını ve uygulanmasını da beraberinde getirmektedir. Yeşil hidrojenin enerji güvenliği ve enerji dönüşümü bakımından stratejik ve jeopolitik önemi artarken, pek çok ekonomi tarafından, ilk gelişim aşamasında büyümeyi sağlayarak yatırımları kolaylaştıran ve rekabetçi hidrojen geleceğinin temellerini atan çeşitli destekleme modelleri hayata geçirilmektedir. Bu destekler, yeşil hidrojen üretimini teşvik etmek, talep sektörlerinde gelişimi hızlandırmak, yeşil hidrojenin çok yönlü ekonomi, enerji, iklim ve sanayi fırsatlarını değerlendirmek üzerine odaklanmaktadır.

Kamu teşvikleri ve hibeler, yeşil hidrojen projelerini de finanse etmek üzere en yaygın kullanılan destekleme modelleri arasındadır. Bu teşvikler genellikle ilk projelerde yatırım maliyetini azaltırken, uygulanabilirliği güçlendirmektedir. Hibeler aynı zamanda Ar-Ge ekosistemini güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Fiyat garantileri ve uzun vadeli alım sözleşmeleri odaklı modeller, projelerin mevcut ekonomik koşullarda fizibiliteğini iyileştirmek ve finansal açıdan sürdürülebilir proje portfolyoları geliştirmek bakımından önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Vergi indirimi veya muafiyetleri gibi finansal teşvik araçları da genellikle çevresel sürdürülebilirlik başta olmak üzere makro enerji ve iklim hedeflerinde çok yönlü kazanımlarla ilişkilendirmek amacıyla uygulanmaktadır.

Düşük emisyonlu hidrojen politika çerçevelerinde öne çıkan en önemli gelişmelerden birisi, özellikle gelişmiş ve büyük ekonomilerin büyük ölçekli finansal mekanizmalara işlerlik kazandırmaya başlamasıdır. ABD'de Enflasyonu Düşürme Yasası, AB'de Net-Sıfır Sanayi Yasası, İnovasyon Fonu, Hidrojen Bankası gibi büyük oluşumlar, bazı ülkelerde geliştirilmeye başlayan fark sözleşmeleri modellenmiş uygulamalar, hidrojen ekonomisini gerek üretim gerekse de talep bileşenlerinde başlangıç seviyelerinden ölçeklenmeye ilerletecek altyapıların oluşmasını çeşitli finansal modellerle desteklemektedir. Dünya genelinde hidrojen ekosistemine yönelik destekleyici finansal mekanizmalarda öne çıkanlar aşağıda özetlenmektedir (Tablo 2.1):

- **Hibeler, Sübvansiyonlar ve Vergi Teşvikleri:** Üretim ve talep alanlarına yönelik hibe programları pek çok ülkede hızla yaygınlaşmaktadır. Sübvansiyon ve vergi teşvikleri uygulamaları ise bazı ülkelerde özellikle üretimde ilk yatırım maliyetlerini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu konuda en iddialı programa sahip olan ABD, hidrojen üretimine karbon yoğunluğuna bağlı değişimle birlikte 3 \$/kg'a kadar doğrudan destek sunmaktadır (WRI, 2023; ICCT, 2023). Hollanda ve Danimarka da hidrojen üretimi başına sabit ödemeler sağlayan mekanizmalar uygulanmaktadır (IEA, 2023f).
- **Rekabetçi Yarışma Modelleri:** Bu yönde en kapsamlı program, 2023 yılı içerisinde AB tarafından oluşturulan Hidrojen Bankası'dır. İlk yarışma turu için belirlenen bütçe 800 milyon € olup, önümüzdeki dönemde gelişmelere bağlı olarak toplam bütçenin hızla artması beklenmektedir. Son güncellemeler ile birlikte teklifler için tavan primi 4.5€/kg seviyesine yükselmiştir. AB ayrıca, artan talebi çerçevesinde potansiyel ihracatçılara yönelik olarak da benzer bir programa işlerlik kazandırmayı amaçlamaktadır (European Commission, 2023i; European Commission, 2023j). Yenilikçi bir yarışma modeli sunan H2Global İnisyatifi'ne de Almanya ve Hollanda'dan önemli kamu desteği sağlanmıştır (Hydrogen Europe, 2022; IEA, 2023f).

- **Fark Sözleşmeleri:** Bazı bölgelerde enerji sektörünün yenilenebilir elektrik üretimi gibi çeşitli alanlarında daha önce uygulamaya konmuş olan bu modelde, piyasa fiyatı ve beklentisi ile maliyet arasındaki farkı kapatmak üzere, belirlenen fiyat seviyesi ile gerçekleşen fiyat seviyesi arasındaki fark kamu kaynakları yoluyla karşılanmaktadır. Böylelikle ilk gelişim aşamalarında hidrojen üretiminin ekonomisi iyileştirilerek ve talep sektörlerinde kullanımının sağlanması desteklenmektedir. Birleşik Krallık ve Almanya’da uygulamaya geçen bu model üzerinde Japonya ve Kanada da çalışmaktadır (DESNZ, 2023; IEA, 2023f, SP Global, 2023).

Tablo 2.1. Bazı Bölgelerde Hidrojen Gelişimini Başlangıç Aşamasında Destekleyen Modeller (2023⁴⁰)

	Hibeler, Sübvansiyonlar ve Vergi Teşvikleri	Rekabetçi Yarışma programları & Fark Sözleşmeleri
ABD	x	
Almanya	x	x
AB	x	x
Avustralya	x	
Belçika	x	
Birleşik Krallık	x	x
Danimarka		x
Estonya	x	
Fas	x	
Hindistan		x
Hollanda	x	x
İspanya	x	
İtalya	x	
Japonya	x	x
Kanada	x	
Mısır	x	
Umman		
Polonya	x	
Suudi Arabistan	x	
Yeni Zelanda	x	

⁴⁰ Detaylı bilgi için:

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

Referanslar

- Bloomberg New Energy Finance (BNEF) (2023), Hydrogen Offtake is Tiny but Growing
<https://about.bnef.com/blog/hydrogen-offtake-is-tiny-but-growing/>
- Cole, John & Silvera, Isaac. (2009), Metallic Hydrogen Propelled Launch Vehicles for Lunar Missions. AIP Conference Proceedings. 1103. 117-125. 10.1063/1.3115485.
<https://doi.org/10.1063/1.3115485>
- Columbia University The Center on Global Energy Policy (CGEP) (2023), National Hydrogen Strategies and Roadmap Tracker
<https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/national-hydrogen-strategies-and-roadmap-tracker/>
- Deloitte (2023), Assessment of Green Hydrogen for Industrial Heat
<https://www2.deloitte.com/us/en/pages/energy-and-resources/articles/green-hydrogen.html>
- European Commission (2022), REPowerEU
https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en#actions
- European Commission (2023a), The Net-Zero Industry Act: Accelerating the Transition to Climate Neutrality
https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en
- European Commission (2023b), Fit for 55
https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en
- European Commission (2023c), What is the Innovation Fund?
https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en
- European Commission (2023d), Net Zero Industry Act
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_23_1667

- European Commission (2023e), The HYBRIT Story: Unlocking the Secret of Green Steel Production
https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/hybrit-story-unlocking-secret-green-steel-production-2023-06-20_en
- European Commission (2023f), Mission Innovation Hydrogen Valley Platform
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2023-05/20230508_Relaunch%20event_Full%20presentation_vFinal%20II_Update.pdf
- European Commission (2023g), REPowering the EU with Hydrogen Valleys: Clean Hydrogen Partnership Invests EUR 105.4 Million for Funding 9 Hydrogen Valleys Across Europe
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/news/repowering-eu-hydrogen-valleys-clean-hydrogen-partnership-invests-eur-1054-million-funding-9-2023-01-31_en
- European Commission (2023h), Mission Innovation Hydrogen Valley Platform Websites
<https://h2v.eu/>
- European Commission (2023i), Commission Outlines European Hydrogen Bank to Boost Renewable Hydrogen
https://energy.ec.europa.eu/news/commission-outlines-european-hydrogen-bank-boost-renewable-hydrogen-2023-03-16_en
- European Commission (2023j), Competitive Bidding: A New Tool for Funding Innovative Low-Carbon Technologies Under the Innovation Fund
https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/competitive-bidding_en
- European Energy Exchange (EEX) (2023), HYDRIX: First Market Based Index for Hydrogen
https://www.eex.com/fileadmin/EEX/Downloads/Markets/Hydrogen/20230328_HYDRIX_EN.pdf
- Global Maritime Forum (2023), Mapping of Zero-Emission Pilots and Demonstration Projects
https://www.globalmaritimeforum.org/content/2023/05/Getting-to-Zero-Coalition_Mapping-of-Zero-Emission-Pilots-and-Demonstration-Projects_Fourth-edition.pdf

- Gökalp, I. (2019), A Holistic Approach to Promote the Safe Development of Hydrogen as an Energy Vector. In Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (Vol. 2, pp. 1387–1395).
<http://elib.spbstu.ru/dl/2/k19-127.pdf/download/k19-127.pdf>
- Gökalp, I. (2020), Türkiye Müvellidülma İktisadı Üzerine Mülâhazalar
<https://iicec.sabanciuniv.edu/sites/iicec.sabanciuniv.edu/files/2020-11/iskender-gokalp-presentation.pdf>
- H2-VIEW (2023), 'World's First' Liquid Hydrogen-Powered Ferry Sets Sail in Norway
<https://www.h2-view.com/story/worlds-first-liquid-hydrogen-powered-ferry-sets-sail-in-norway/>
- HYBRIT websitesi (2023),
<https://www.hybritdevelopment.se/en/>
- Hydrogen Europe (2022), Germany Launches H2 Global Auctions
<https://hydrogeneurope.eu/germany-launches-h2-global-auctions/>
- International Air Transport Association (IATA) (2023), Aircraft Technology Net Zero Roadmap
<https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/aircraft-technology-net-zero-roadmap.pdf>
- International Council on Clean Transportation (ICCT) (2023), Can the Inflation Reduction Act Unlock a Green Hydrogen Economy?
<https://theicct.org/ira-unlock-green-hydrogen-jan23/>
- International Energy Agency (IEA) (2022), Global Hydrogen Review 2022
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- International Energy Agency (IEA) (2023a), World Energy Outlook 2023
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023b), Net Zero Roadmap 2023
<https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>

- International Energy Agency (IEA) (2023c), The Breakthrough Agenda Report 2023
<https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023d), World Energy Investment 2023
<https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023e), Tracking Clean Energy Progress 2023
<https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023f), Global Hydrogen Review 2023
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023g), Policies Database
<https://www.iea.org/policies>
- International Energy Agency (IEA) (2023h), Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>
- International Energy Agency (IEA) (2023i), Electric Vehicles
<https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>
- International Energy Agency (IEA) (2023j), ETP Clean Energy Technology Guide
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>
- International Energy Agency (IEA) (2023k), Hydrogen Patents for a Clean Energy Future 2023
<https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future>
- International Energy Agency (IEA) (2023l), Towards Hydrogen Definitions Based on Their Emissions Intensity 2023
<https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>
- International Monetary Fund (IMF) (2023), Primary Commodity Prices
<https://www.imf.org/en/Research/commodity-prices>

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023), Climate Change Synthesis Report 2023
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023), Policies for Green Hydrogen
<https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Policies-for-green-hydrogen>
- Japan Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (2023), GX League
https://gx-league.go.jp/aboutgxleague/document/GX_League_Overview.pdf
- Liu, S., & Shui, J. (2022), Mechanism and Properties of Emerging Nanostructured Hydrogen Storage Materials. Battery Energy, 1(4),
<https://doi.org/10.1002/bte2.20220033>
- Offshore Energy (2023), First US Hydrogen-Powered Ferry Gearing Up for Pilot Service
<https://www.offshore-energy.biz/first-us-hydrogen-powered-ferry-gearing-up-for-pilot-service/>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2023), Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen
<https://www.oecd-ilibrary.org/sites/46d2da5e%20en/index.html?itemId=/content/publication/46d2da5e-en>
- Royal Society of Chemistry website (2023),
<https://www.rsc.org/>
- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2022), Türkiye Yenilenebilir Enerji Görünümü
<https://iicec.sabanciuniv.edu/treo>
- Sbh4 Consulting (2023), Electrolysers: AEC, AEM, PEM and SOE for Hydrogen (and Syngas) Production
<https://www.sbh4.de/assets/electrolyser-aec-aem-pem-soe.pdf>
- SP Global (2023), UK Sets out Support Mechanism for Low-carbon Hydrogen Production
<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/natural-gas/081023-uk-sets-out-support-mechanism-for-low-carbon-hydrogen-production>

- United Kingdom The Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) (2023), Hydrogen Strategy Update to the Market: August 2023
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1179651/hydrogen-strategy-update-to-the-market-august-2023.pdf
- United Nations (UN) (2023), The 2030 Agenda for Sustainable Development
<https://sdgs.un.org/goals>
- United States Department of Energy (US DOE) (2023a), Hydrogen Storage
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- United States Department of Energy (US DOE) (2023b), U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap
<https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/us-national-clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>
- United States Department of Energy (US DOE) (2023c), Regional Clean Hydrogen Hubs
<https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>
- United States Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (US EERE) (2023), Hydrogen Fuel Basics
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics>
- United States Energy Information Administration (US EIA) (2023), Hydrogen Explained
<https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/>
- United States Government White House (2023), Inflation Reduction Act Guidebook
<https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/>
- World Bank (2023), Conflict in Middle East Could Bring 'Dual Shock' to Global Commodity Markets
<https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/10/26/commodity-markets-outlook-october-2023-press-release>
- World Resources Institute (WRI) (2023), Unlocking Clean Hydrogen Investments in U.S. Climate Policy
<https://www.wri.org/update/clean-hydrogen-investments-bil-ira>

BÖLÜM 3:

Türkiye Enerji Sektörüne
Genel Bakış & Hidrojen

3.1. Enerji Arz ve Talep Dinamikleri

3.1.1. Enerji Talebi Dinamikleri

Türkiye, dünyanın en dinamik, Avrupa'nın ise en büyük enerji piyasaları arasında yer almaktadır. Nüfus artışı ve genç nüfus gibi demografik etkenler, sanayileşme ve endüstriyel sektörlerin yapısı, kentleşme ve mobilite dinamikleri, enerji talebinde güçlü büyümeyi destekleyen başlıca faktörlerdir. 1990 yılından bu yana Türkiye'nin nüfusu yaklaşık bir-buçuk kat (%54), birincil enerji arzı ve nihai enerji talebi ise yaklaşık üç kat artış göstermiştir. Bu dönemde kişi başına birincil enerji tüketimi yaklaşık 1 tep'den 1,9 tep seviyesine ulaşmıştır (yıllık ortalama %3 artış).

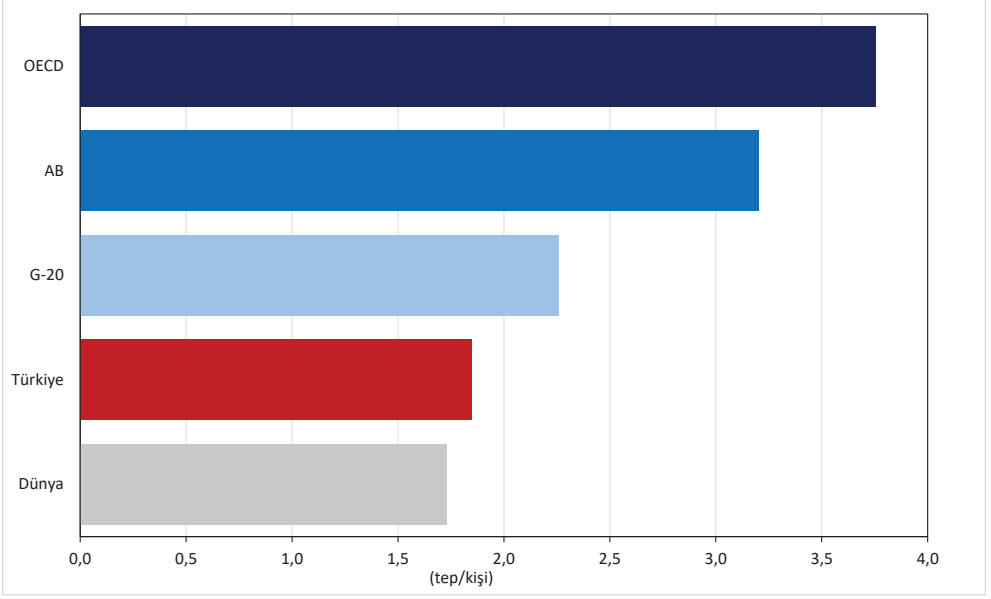
Söz konusu yüksek büyüme geçmişine karşın, Türkiye'nin kişi başına birincil enerji tüketimi halen dünya ortalamasına oldukça yakın olup, diğer büyük ekonomilerle kıyaslandığında düşük seviyededir (AB ortalamasının yaklaşık %60'ı, G-20 ortalamasının yaklaşık %80'i ve OECD ortalamasının ise yaklaşık yarısı) (Şekil 3.1). Türkiye Ulusal Enerji Planı'na (TUEP) göre, birincil enerji talebinin 2020-2053 döneminde yıllık ortalama %1 artış göstermesi ve kişi başına enerji talebinin bu dönemde 2,4 tep düzeyine ulaşması beklenmektedir (%36 artış) (ETKB, 2022).

Nüfus artışı ve kentleşme, enerji talebinde büyümeyi destekleyen önemli faktörlerdir. Ekonomik ve sosyal gelişim enerji talebindeki büyüme ile güçlenmektedir. Nüfusun yaklaşık bir buçuk kat artış gösterdiği 1990-2022 döneminde enerji talebi yaklaşık üç kat büyüme kaydetmiştir (Şekil 3.2). Türkiye, OECD ve G-20 ülkeleri içerisinde en genç nüfusa sahip ülkelerden biridir (Türkiye'de medyan yaş 33, OECD ortalaması 40 ve G-20 ortalaması 39) (Şekil 3.3). Türkiye'nin genç nüfusunun toplam nüfusa oranı %15 seviyesindedir¹.

Kentleşme ve kentsel dönüşüm süreçleri devam etmekte, enerji talebinde büyümeyi desteklemektedir. Kentsel nüfusun toplam nüfusta payı 2022 sonu itibarıyla %77'ye ulaşmıştır (2000 yılında %65). 2022 sonu itibarıyla 85 milyona ulaşan Türkiye nüfusunun yaklaşık dörtte-üçü, 1 milyonun üzerinde nüfusa sahip olan 24 ilde yaşamaktadır (Şekil 3.4) (TÜİK, 2023). Tüm bu dinamikler, özellikle elektrik enerjisi talebinde büyümeyi desteklerken elektrifikasyon oranı yükselmektedir (2020 yılında yaklaşık %20).

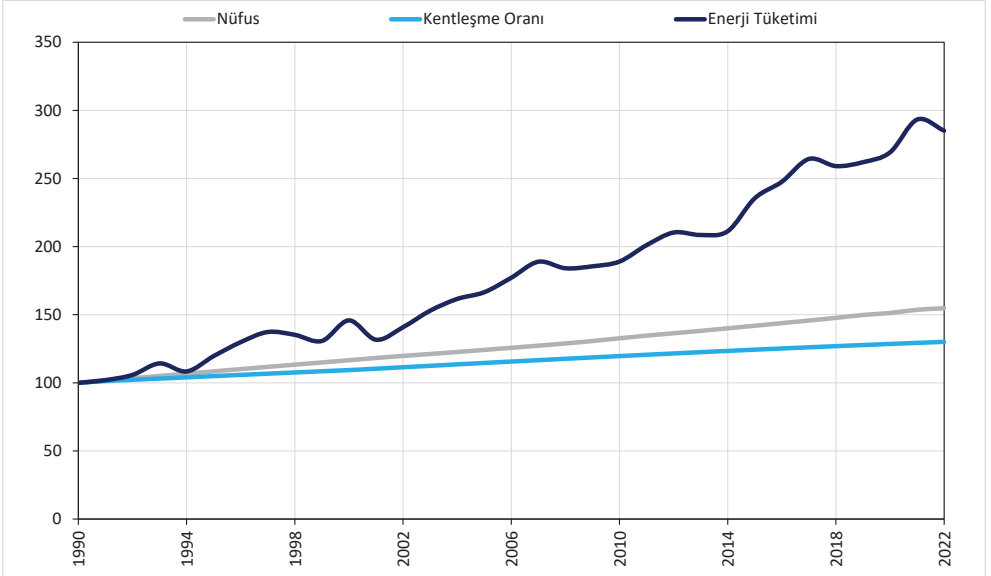
¹ 15 yaş altı nüfus

Şekil 3.1. Kişi Başına Birincil Enerji Tüketimi (tep/kişi)



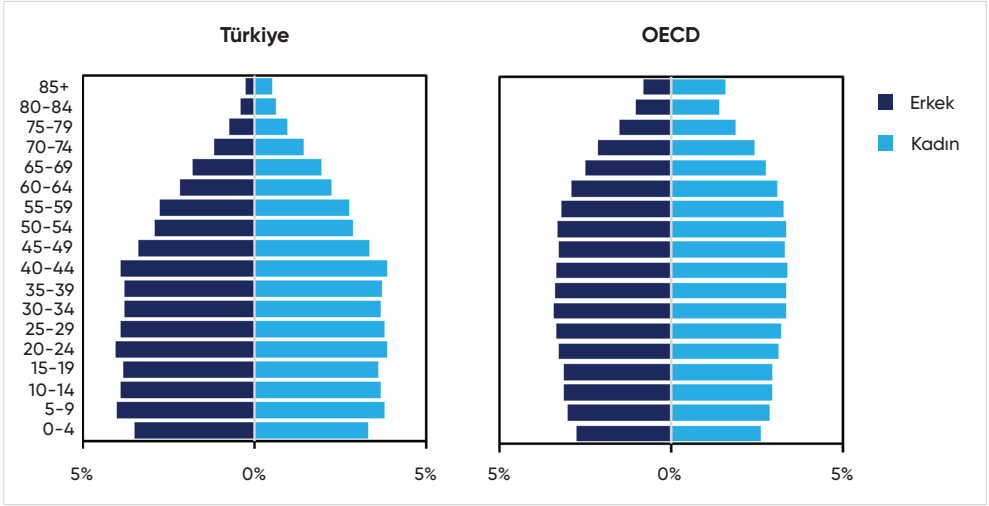
Kaynak: ETKB, OECD

Şekil 3.2. Nüfus Artışı, Kentleşme Oranı ve Enerji Tüketimi Gelişimi (1990-2022, milyon, %, Mtep, 1990=100)



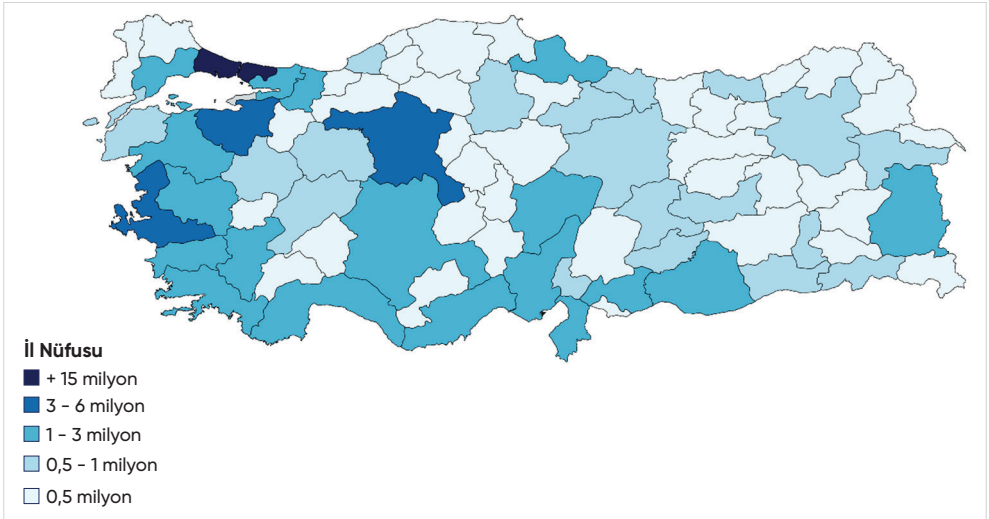
Kaynak: ETKB, TÜİK, WB

Şekil 3.3. Nüfus Piramidi Grafiği (Türkiye ve OECD, 2022)



Kaynak: OECD

Şekil 3.4. İllere göre Nüfus Haritası (2022)

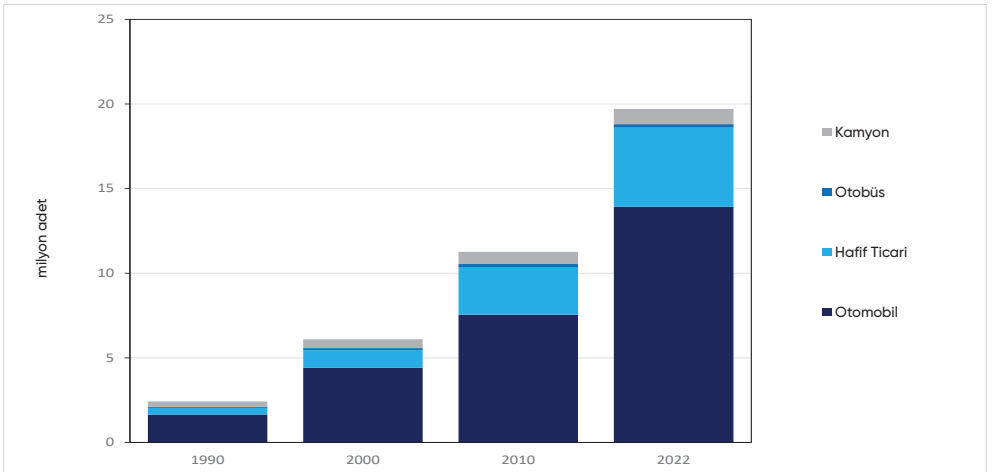


Kaynak: CYO, TÜİK

Mobilite dinamikleri de enerji talebinin gelişiminde önemli belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Kişi başına otomobil sahipliği halen AB ortalamasının üçte-biri seviyesindedir (ACEA, 2023; European Commission, 2023a; OSD, 2023). Sosyal ve ekonomik gelişimin ve artan mobilite ihtiyaçlarının destekleyicisi olan kentsel ulaşımda olduğu gibi, şehirler arası yük ve yolcu trafiğinde de hızlı artış sürmektedir. Motorlu araç parkı 2010 yılından bu yana %70 büyürken şehirler arası karayolu ulaşım aktivitesi %75 artış kaydetmiştir (Şekil 3.5). Aynı dönemde havayolu yolcu taşıma aktivitesi iki kat artmış, denizlerarası yolcu ve yük taşıma aktivitelerinde ise sırasıyla %17 ve %76 büyümeye kaydedilmiştir (KGM, 2023; UAB 2023). Kentleşme ve mobilite yönelimlerinin ve sosyo-ekonomik gelişimin önemli bir yansıması olarak binalarda ve ulaşımda enerji hizmetlerine olan talep hızlı artış göstermektedir.

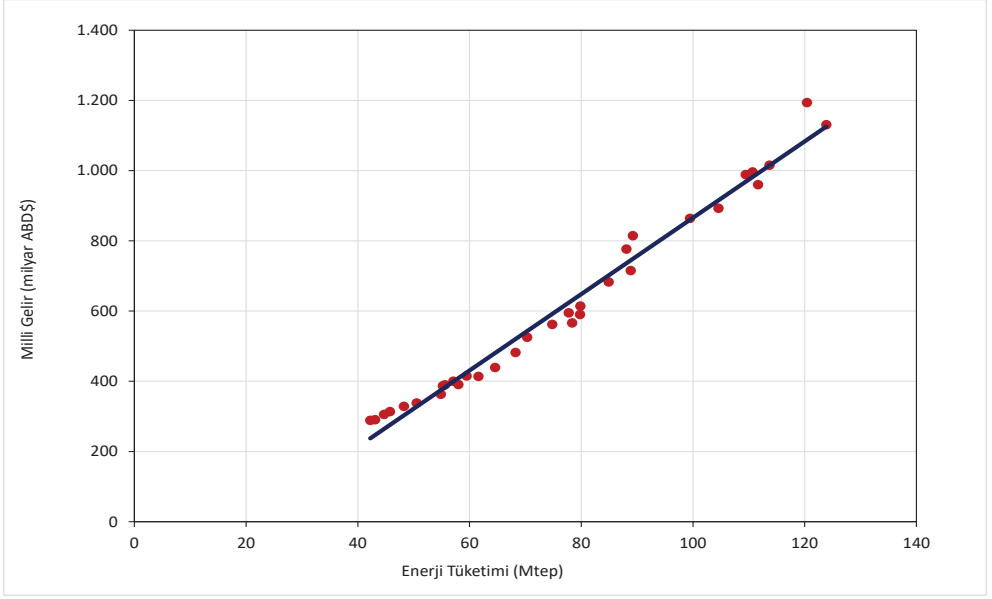
Gelişmekte olan bir ekonomi olarak Türkiye'nin enerji talebinde büyüme ile ekonomik büyüme arasındaki güçlü ilişki, son dönemde kısmen azalmakla birlikte devam etmektedir (Şekil 3.6). Sosyo-ekonomik gelişim dinamiklerini de yansıtan bu etkileşim içerisinde, sanayi sektörünün Türkiye Gayri Safi Yurt İçi Hasılası (GSYİH) içerisindeki ağırlığı ve sanayinin enerji-yoğun yapısı etkili olmaktadır. 2010 yılından bu yana Türkiye ekonomisi yaklaşık 1,1 kat büyürken enerji talebi 1,5 kat artış göstermiştir (Şekil 3.7). Sanayi sektörü GSYİH'nin üçte-birini oluşturmaktadır (1990 yılında %31 ve 2000 yılında %27) (TÜİK, 2023). Sanayi sektöründe enerji-yoğun sektörlerin ağırlığı devam etmektedir. Sanayide enerji tüketiminin çok büyük bölümü çimento, demir-çelik, kimya ve petrokimya, tekstil ve gıda endüstrilerinde gerçekleşmektedir (1990 yılında %76 ve 2022 yılında %71) (Şekil 3.8). Bu yapısal karakteristiğin bir yansıması olarak, enerji verimliliği alanında artan farkındalığın ve yatırımlarda artışların olumlu etkilerine karşın, sanayi sektörünün enerji yoğunluğunda henüz enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki kuvvetli ilişkiyi değiştirecek oranda bir düşüş gerçekleşmemiştir.

Şekil 3.5. Motorlu Taşıt Parkının Gelişimi (2010-2022, milyon adet)



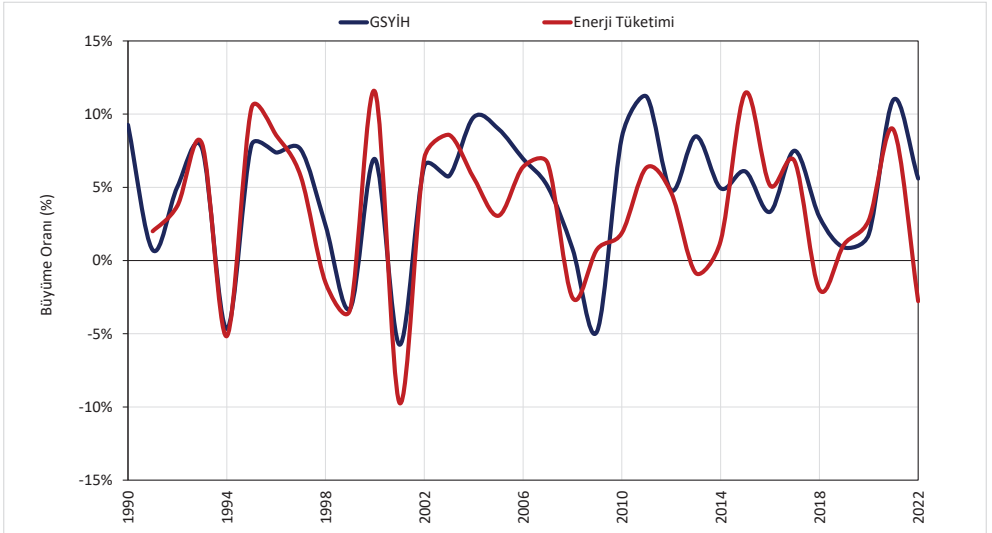
Kaynak: UAB

**Şekil 3.6. Ekonomik Büyüme ve Enerji Tüketimi Gelişimi
(1990 – 2022, milyar ABD\$ ve Mtep)**



Kaynak: ETKB, WB

**Şekil 3.7. Ekonomik Büyümede ve Enerji Tüketiminde Yıllık Büyüme Hızları
(1990 – 2022, %)**



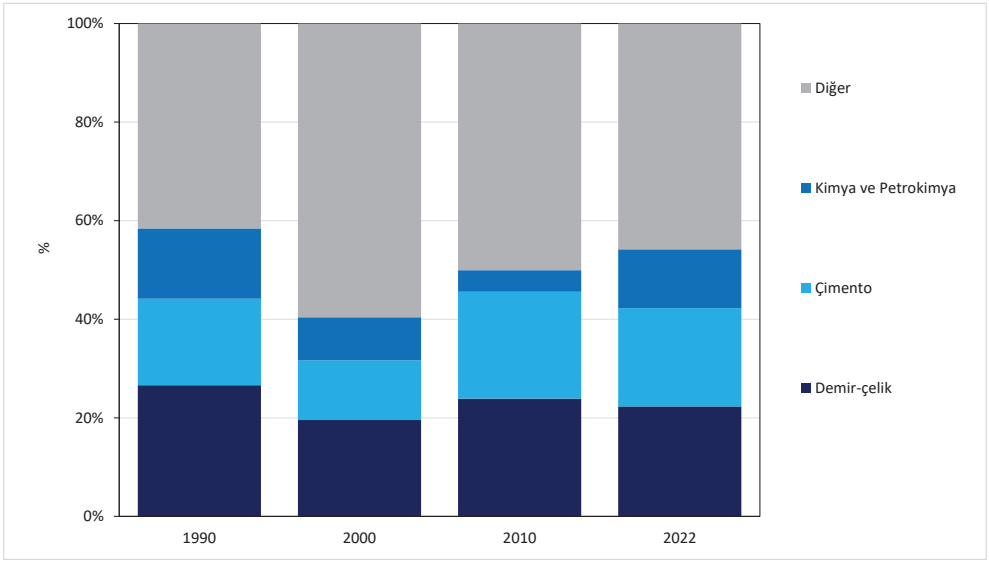
Kaynak: ETKB, WB

3.1.2. Nihai Enerji Talebi Gelişimi

- Türkiye nihai enerji talebi 1990 yılından bu yana yaklaşık iki kat artış göstermiştir (yıllık ortalama %6). 2022 yılında 120,4 Mtep nihai enerji talebinin %33'ü binalarda, %32'si sanayide, %26'sı ise ulaştırma sektöründe gerçekleşmiştir. Tarım, yaklaşık 5 Mtep seviyesinde tüketimiyle toplam nihai enerji talebinin %4'üne karşılık gelmektedir (1990 ve 2010 yıllarında %5). Nihai enerji talebinin sektörel yapısı incelendiğinde son dönemde belirgin bir değişim gözlenmemektedir. Enerji talebindeki temel belirleyiciler binalarda ve sanayide ısıtma ve soğutmaya talep ve ulaşım hizmetleridir (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10).
- Fosil yakıtların nihai talepte 1990 yılında %71 olan payı 2010 yılında %72 ve 2022 yılında %74 olarak kaydedilmiştir (Elektrik %20 ve doğrudan yenilenebilir enerji %6). Enerji talebinin fosil yakıt ağırlığında belirgin bir değişim henüz gerçekleşmemiştir. Bununla birlikte, doğal gaz kullanımında yaygınlaşmanın özellikle binalarda kömürü geniş ölçüde ikame etmesi ile fosil yakıt kompozisyonunda dönüşüm gerçekleşmektedir. Daha güvenli ve temiz enerji geleceği için, Türkiye enerji sektöründe büyümenin, nihai enerji talebinde fosil yakıtların toplam ağırlığında azalma ile birlikte gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu dönüşümde, binalarda ve sanayide elektrifikasyonun yaygınlaşması etkili olmaya devam edecektir. Ulaşım da elektrifikasyon ve teknolojik ilerlemeler, iş modelleri ve piyasa oluşumu ile desteklenerek yeni ve güçlü bir büyüme alanı olarak gelişmektedir. Bu gelişmeler petrol ithalatında ve emisyon envanterinde azaltım fırsatlarını beraberinde getirmektedir (IICEC, 2021; IICEC, 2022).
- Dünyadaki genel yönelimlere benzer şekilde, elektrik enerjisinin önümüzdeki dönemde nihai enerji talebinin en büyük bileşenini oluşturması beklenmektedir². Güvenli ve temiz enerji geleceği bakımından, yenilenebilir enerjinin nihai enerji talebine doğrudan katkısında da önemli bir artış potansiyeli olduğu, bu alanda potansiyelin artan oranda performansla dönüştürülebilmesinin güvenli ve temiz enerji geleceğinin en önemli destekleyicileri arasında olacağı görülmektedir (Şekil 3.11). IICEC analizlerinde güvenli bir yenilenebilir enerji gelişim patikasında 2050 yılında nihai enerji talebinde yenilenebilir enerjinin doğrudan payı %15'e, toplam payı ise %50'nin üzerine çıkabilmektedir (IICEC, 2022).

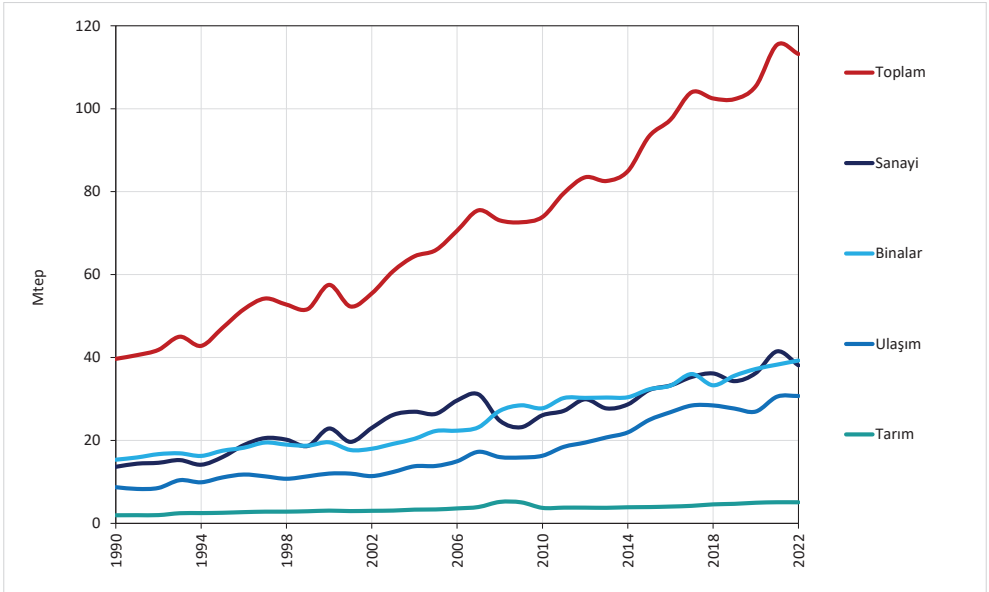
² 2050 yılında IEA NZE Senaryosunda dünya ortalaması %53, Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda 2053 yılında %56.

Şekil 3.8. Sanayide Enerji Tüketiminin Sektörel Kırılımı (2012-2022, %)



Kaynak: ETKB

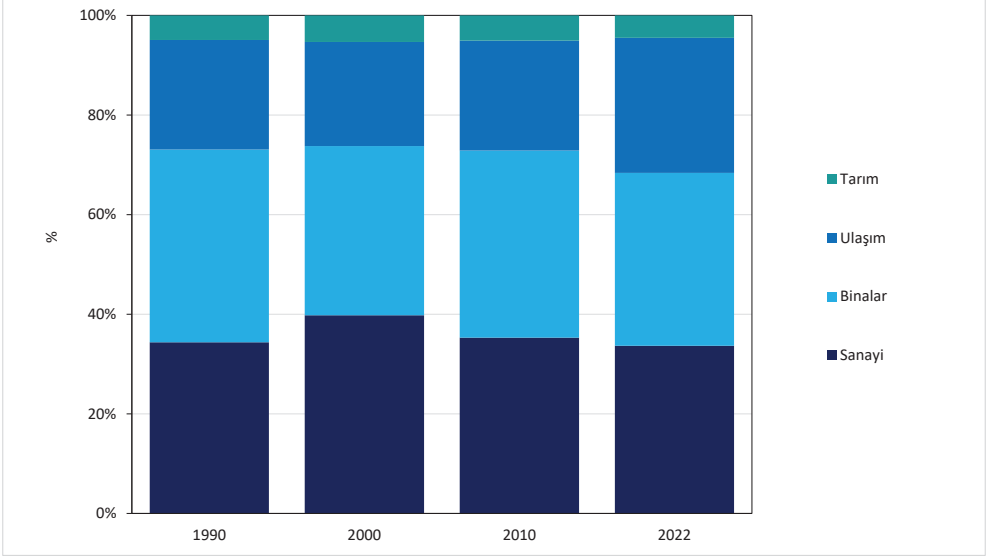
Şekil 3.9. Nihai Enerji Talebinin Sektörel Gelişimi (1990-2022, Mtep³)



Kaynak: ETKB

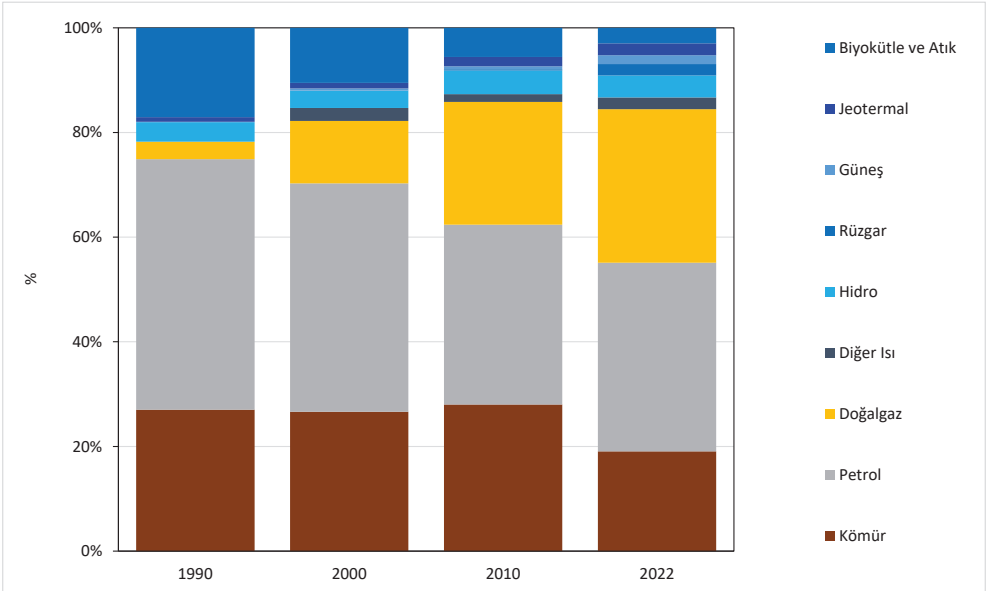
³ Enerji dışı tüketim hariç

Şekil 3.10. Nihai Enerji Talebinin Sektörel Kırılımı (1990-2022, %)



Kaynak: ETKB

Şekil 3.11. Nihai Enerji Talebinin Kaynaklara Göre Dağılımı (1990-2022, %)



Kaynak: ETKB, TEİAŞ

3.1.3. Enerji Arz Dinamikleri

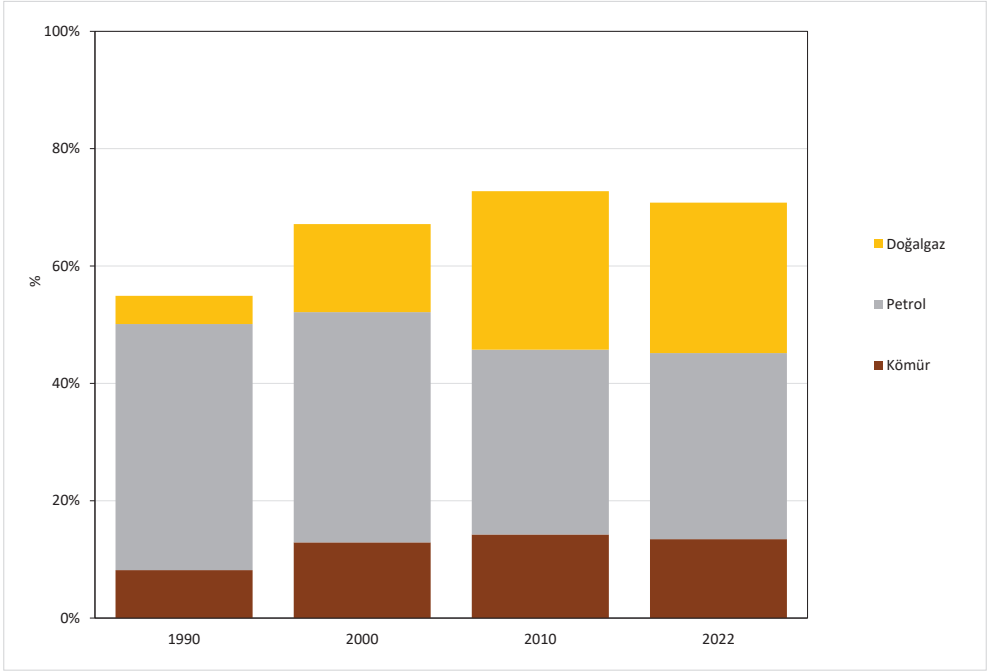
Türkiye'nin 158 milyon tep seviyesine ulaşan birincil enerji arz büyüklüğü içerisinde fosil kaynakların toplam payı yaklaşık %85 seviyesindedir (1990 yılında %82, 2000 yılında %87 ve 2010 yılında %89). Birincil enerji arzının yerli üretim bileşeninde hacimsel olarak önemli bir büyüme gerçekleşmiş olmakla birlikte (1990 yılında yaklaşık 25 Mtep ve 2022 yılında 50,8 Mtep), birincil enerji arzının ithalat yoğunluğunda belirgin bir azalma gerçekleşmemiştir. Birincil enerjide yerli üretimin arzı karşılama oranı kömürde %50'nin ve petrolde %10'un altında olup doğal gazda ise henüz sadece %1'dir⁴. Birincil enerji arzında toplam ithal fosil yakıt ağırlığı %65-%70 seviyesindedir (1990 yılında %55, 2000 yılında %68 ve 2010 yılında %73) (Şekil 3.12). 1990 yılından bu yana toplam fosil yakıt ithalatı içerisinde doğal gazın ağırlığı dört katın üzerinde artarak yaklaşık %40'a çıkmıştır. Son dönemde kömürün ve petrolün toplam fosil yakıt ithalatına katkısı sırasıyla yaklaşık %20 ve yaklaşık %40 olarak gerçekleşmektedir.

İthal fosil-yakıt ağırlıklı birincil enerji arzı yapısının Türkiye enerji sektörünün güvenli, rekabetçi ve sürdürülebilir büyümesi bakımından iki kritik yansıması olmaktadır (IICEC, 2020; IICEC, 2022):

- **Enerji Güvenliği, Enerji İthalat Faturası ve Maliyetler:** Fosil yakıt ithalatının birincil enerji arzındaki ağırlıklı payı, fosil yakıt fiyat değişimlerini yansıtan enerji ithalat faturasında ve dolayısıyla cari işlemler dengesinde kritik etkiye sahiptir. Söz konusu yapısal durum, enerji piyasalarındaki girdi maliyetlerinde ve bunun neticesinde piyasa ve nihai tüketici fiyatlarının gelişiminde de belirleyici olmaktadır. Bu itibarla, Türkiye enerji politikası, gerek birincil enerjide, gerekse de enerjinin geleceğinde belirleyici olarak teknolojilerde kendine yeterliliğinin güçlendirilmesine odaklanmaktadır (Detaylar için lütfen Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.6'ya bakınız).
- **Sera Gazı Emisyonları ve Temiz Enerji Dönüşümü:** Türkiye'nin Paris Anlaşması'na taraf olmasıyla birlikte ortaya konulan "Net-sıfır emisyon" vizyonu, enerji sektöründen kaynaklı emisyonların kapsamlı bir dönüşüm perspektifi içerisinde azaltılmasını gerektirmektedir. Ulusal Katkı Beyanı, 2038 yılına kadar emisyonların tepe noktasına ulaşması hedefini içermektedir (Detaylar için lütfen Bölüm 3.3 ve Bölüm 3.6'ya bakınız). Temiz enerji dönüşümüne yönelik küresel ve bölgesel açılımlar, teknolojik gelişim ve temiz enerji teknolojilerinde gelişen rekabet alanları gibi faktörler dikkate alındığında, birincil enerji arz portföyünün ve nihai enerji tüketiminin yapısında temiz enerji dönüşümünü destekleyecek değişimin gerçekleştirilebilmesi kritiktir. Bu dönüşüm, iklim değişikliği ile mücadeleye ek olarak, Türkiye'nin yerli ve temiz kaynakları ve teknolojileri ile desteklenecek enerji güvenliği, enerji sektörünün ve ilişkili sektörlerin sürdürülebilir rekabetçilikleri perspektiflerinden de büyük önem arz etmektedir.

⁴ Son dönemde doğal gaz ve petrol keşiflerinde sağlanan gelişmelerin yerli üretim bazını büyütürken enerji güvenliğini güçlendirmesi beklenmektedir.

Şekil 3.12. Enerji Sisteminde İthal Fosil Kaynak Ağırlığı (1990-2022, %)



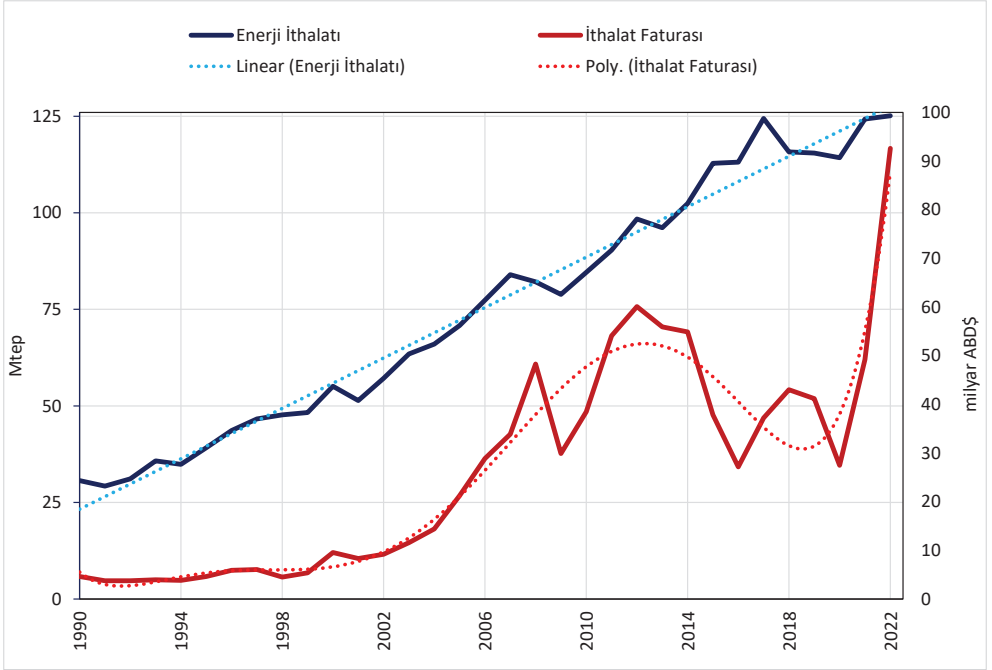
Kaynak: ETKB

3.2. Enerji İthalatı

Son dönemde özellikle jeopolitik gelişmelerin de sonucu olarak emtia fiyatlarında yüksek artış trendi, enerji ithalat faturasında çok hızlı bir büyümeyi beraberinde getirmiştir. 2022 yılında enerji ithalatı 2021 yılına göre yaklaşık iki kat artarak 97 milyar ABD\$'a ulaşmıştır (2010-2021 arası dönemde ortalama 44 milyar ABD\$) (TÜİK, 2023) (Şekil 3.13). Doğal gaz ithalat kompozisyonunda petrol fiyatları ile olan ilişkinin kısmen azalması ve petrol ürünleri marjlarında değişimlerin etkisiyle, enerji ithalat faturası ile Brent petrol göstergesi arasındaki ilişki kısmen zayıflarken, Avrupa doğal gaz fiyatlarının ve doğal gaz piyasalarındaki dinamiklerin etkisi güçlenmiştir. Fosil yakıt fiyatlarında 2022 yılına göre kısmi düşüşün etkisiyle, 2023 yılının ilk 9 aylık döneminde enerji ithalat faturası 2022 yılının aynı dönemine göre yaklaşık %35 azalma göstermiştir. 2023 yılında yaklaşık 70 milyar ABD\$ seviyesinde gerçekleşmesi beklenen enerji ithalatının ağırlıklı bileşenlerini, doğal gazın elektrik üretiminde, binalarda ve sanayide kullanımı, ulaşım sektörü için ham petrol girdisi ve dizel tüketimi, bazı sanayi sektörlerinde ve elektrik üretiminde kömür tüketimi oluşturmaktadır.

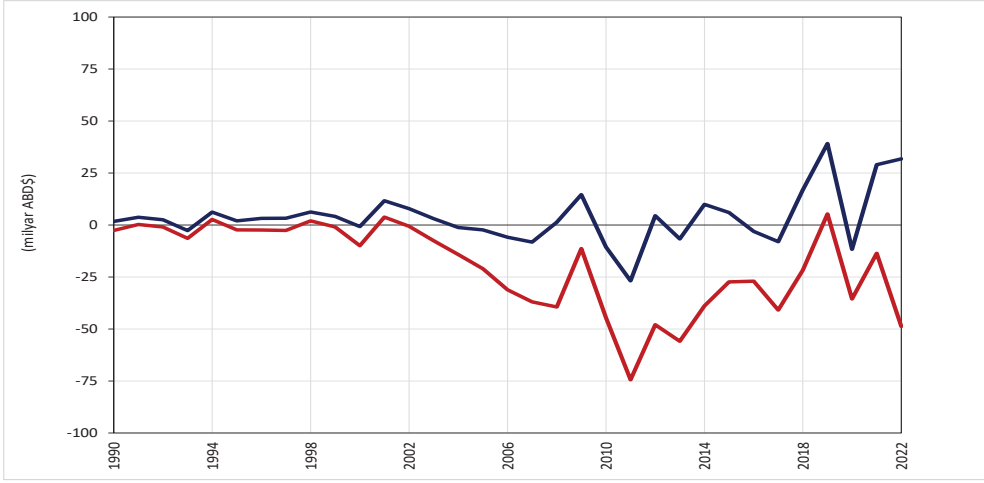
Enerji ithalatı, Türkiye ekonomisinin dış ticaret dengeleri içerisinde önemli paya sahiptir. 1990 yılından bu yana toplam dış ticaret açığının %61'i enerji ithalatından kaynaklanmıştır. 2022 yılında enerji ithalatı, dış ticaret açığı büyüklüğünün %87'sine karşılık gelmiştir (TÜİK, 2023). Cari işlemler dengesi, enerji ithalatı hariç tutulduğunda çoğunlukla pozitif seyrederken, cari açığın büyük bölümünü enerji ithalatının oluşturduğu görülmektedir (Şekil 3.14) (TCMB, 2023a; TCMB, 2023b). Cari işlemler dengesinde yapısal ve sürdürülebilir iyileştirmelerin sağlanabilmesi için enerji kaynakları ithalat miktarlarında sağlanabilecek kalıcı düşüşler yoluyla ithalat faturasının düşürülmesi ve bu gelişmelerin sanayide katma değeri yüksek ve verimli üretim ve tüketim yapılarına dönüşüm ile desteklenmesi kritiktir.

Şekil 3.13. Enerji İthalatının ve Faturasının Gelişimi (1990-2022, Mtep, milyar ABD\$)



Kaynak: ETKB, TCMB, TÜİK

Şekil 3.14. Cari İşlemler Dengesi ve Enerji İthalatı Etkisi (1990–2022, milyar ABD\$)



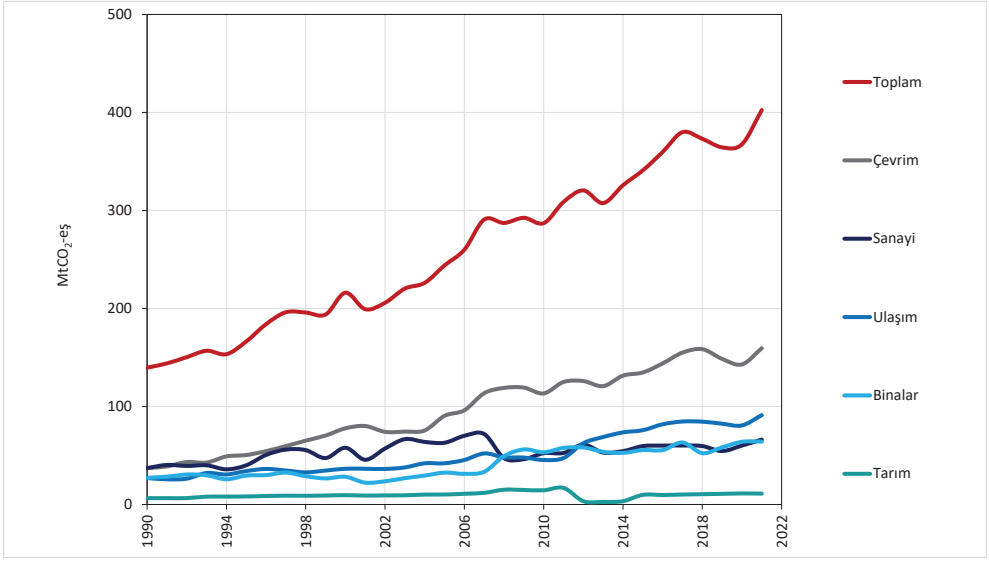
Kaynak: ETKB, TCMB

3.3. Enerji Sektöründen Kaynaklı Emisyonlar

Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %70'lik bölümü enerji sektöründen kaynaklanmaktadır (1990, 2000, 2010 ve 2021 yıllarında sırasıyla %64, %72, %72 ve %71) (UNFCCC, 2023). Enerji sisteminde fosil kaynakların ağırlıklı payı, enerjiden kaynaklı emisyonlarda talepteki büyümeye paralel ve hızlı artışı beraberinde getirmektedir. 1990 yılında 139,6 milyon ton CO₂-eş (MtCO₂e) olan enerji kaynaklı emisyon envanteri, 2021 yılına kadar olan dönemde %188 artışla 402,5 milyon ton CO₂-eş düzeyine ulaşmıştır. Bu dönemde özellikle elektrifikasyonda büyümenin etkisiyle çevrim sektörünün enerjiden kaynaklı sera gazı emisyonu envanteri içerisindeki payı %27'den yaklaşık %40'a çıkmıştır. Tamamına yakını halen petrol ürünlerine dayalı olan ulaştırma sektörü, emisyon büyüklüğü bakımından en büyük ikinci sektör durumundadır (%23). Binalar ve sanayi ise emisyon envanteri içerisinde sırasıyla %17 ve %18 paya sahiptir.

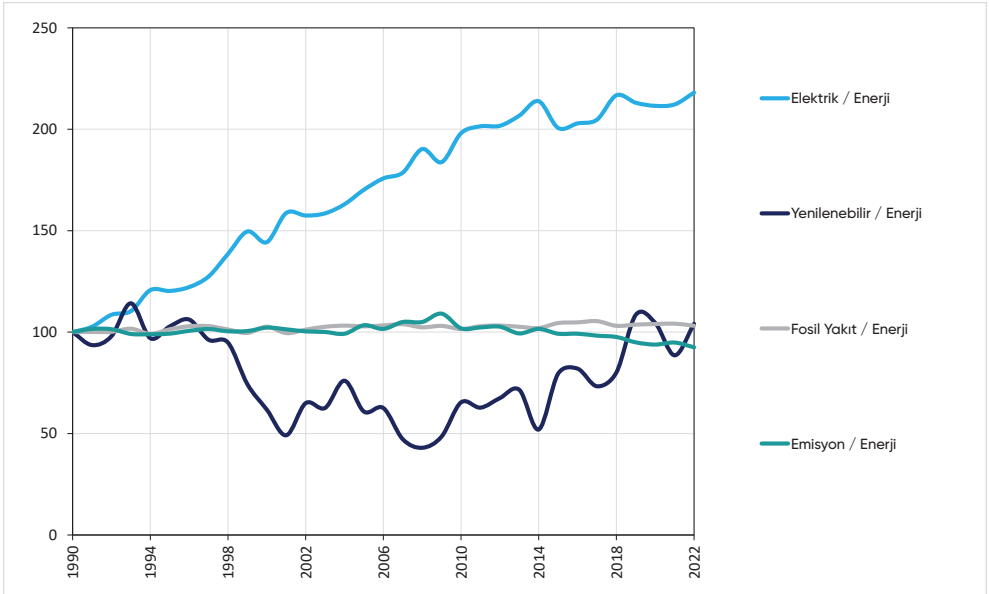
Türkiye, enerji sektörünün toplam karbon yoğunluğunda (birim enerji tüketimi başına karbon salımı), enerji verimliliği, elektrik üretiminde yenilenebilir enerjiye yönelim ve sektörlerde artan oranda elektrifikasyon yoluyla iyileşmeler sağlamaya devam etmektedir. Özellikle elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin artan payı, çevrim sektörü emisyonlarında artış hızını düşürmektedir. Bu gelişim, net-sıfır emisyon perspektifi için önemli bir baz oluşturmaktadır. Bununla birlikte nihai tüketim sektörlerinin fosil yakıt yoğunluğu kaynaklı olarak emisyon büyüklüklerinde büyüme sürmektedir (1990–2021 döneminde nihai enerji tüketiminin karbon yoğunluğu %2 düşüş kaydetmiştir) (Şekil 3.15 ve 3.16). Toplam emisyonların ekonomik büyüme ve birincil enerji arzındaki büyüme ile güçlü ilişkisi sürmektedir. 1990 yılından bu yana emisyonlardaki kümülatif artış oranı, birincil enerji arzındaki toplam büyüme ile benzer seviyede gerçekleşmiştir (yaklaşık iki kat) (Şekil 3.17).

Şekil 3.15. Enerjiden Kaynaklı Sera Gazı Emisyon Envanteri Gelişimi (1990 – 2021, MtCO₂-eş)



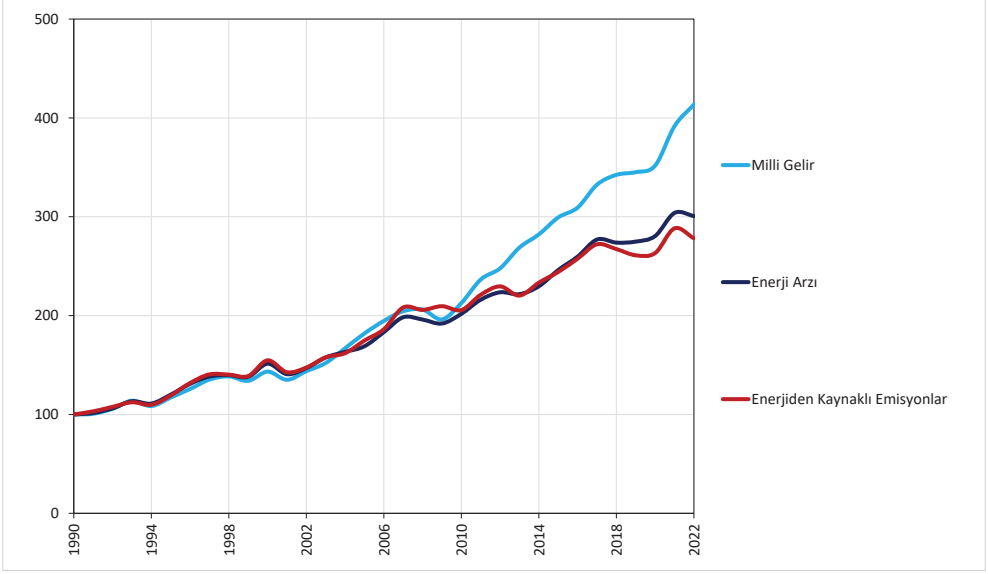
Kaynak: UNFCCC

Şekil 3.16. Nihai Enerji Tüketiminde Karbon Yoğunluğu Dinamikleri ve Gelişimi (1990 – 2022, 1990=100)



Kaynak: ETKB, UNFCCC, WB

Şekil 3.17. Enerjiden Kaynaklı Sera Gazı Emisyonu, Birincil Enerji Arzı ve Ekonomik Büyüme Gelişimi (1990=100)



Kaynak: ETKB, UNFCCC, WB

3.4. Enerji Dinamiklerine Bütüncül Bakış ve Enerjinin Karekodu

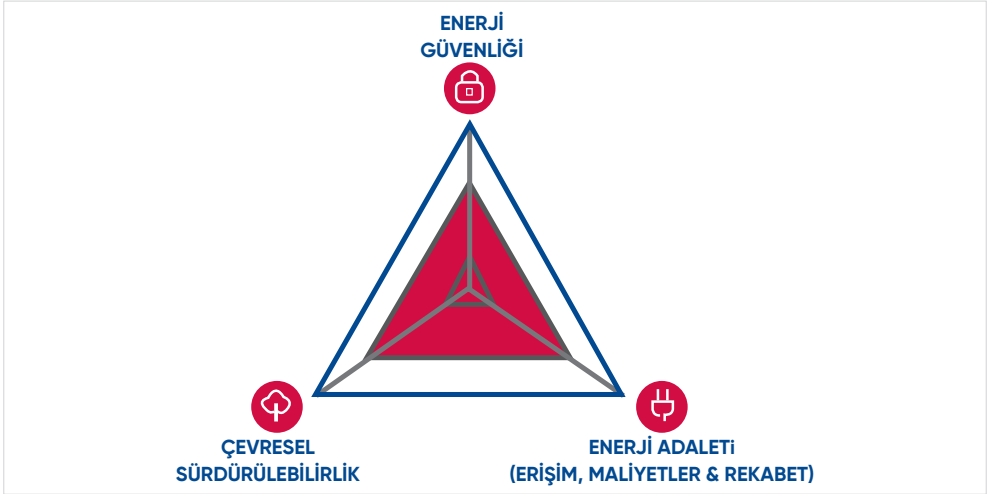
Bölüm 2'de sunulduğu üzere, dünya genelinde enerjiye erişim riskleri, enerji maliyetlerinin enerji piyasalarına ve makro ekonomik göstergelere etkileri gibi düzlemlerde enerji güvenliğini güçlendirmeye yönelik stratejilerin önemi artmaktadır. İklim değişikliği ile mücadele hedefleri, bu kapsamda iklim güvenliğini temin edecek, uygulanabilir bir temiz enerji dönüşümü vizyonu yaşamsal önemini korumaktadır. Son dönemde temiz enerji yatırımlarında büyüme güçlenirken, daha güvenli ve temiz enerji geleceğine eş zamanlı katkı sunacak çözümlerin ve ilgili alanlarda sürdürülebilir büyümenin önemi artmaktadır.

Bu kapsamda yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, e-mobilite ve ısı pompası çözümlerini de içeren yaygın elektrifikasyona ek olarak, karbondan arındırılması görece daha zorlu olan alanlarda hidrojen, karbon yakalama ve depolama gibi teknolojilerde büyüme perspektifi de öne çıkmaktadır. Yeni sanayi paradigması içerisinde temiz enerji teknolojilerinde gelişim, tedarik zincirlerinin güvenliği, kritik teknolojilerde ve üretimlerinde kendine yeterlilik gibi unsurlar, gelişen enerji güvenliği ve rekabetçilik paradigmalarının temel bileşenlerini oluşturmaktadır.

Güvenli ve temiz enerji geleceği hedeflerine ulaşılabilmesi, değer zincirinde enerji tüketicisini odağına alan bir dönüşüm ile olanaklı olacaktır. Bu çerçevede enerjinin maliyet, fiyat ve rekabetçilik unsurlarının enerji ekosisteminin genelinde ekonomik ve sosyal gelişimi, sürdürülebilir kalkınmayı da destekleyecek şekilde ele alınması gerekmektedir.

Güvenli enerji, temiz enerji ve uygun maliyetli, rekabetçi enerji üçlemesi içerisinde azami ekonomik ve toplumsal faydanın, söz konusu her üç alanda birbirini destekleyen ve bütünleyen stratejilerin, yatırımların, piyasa ve iş modellerinin, geniş bir teknoloji setinin, ekosistemde iş birliklerinin gelişimi ve yaygınlaşması ile sağlanabileceği değerlendirilmektedir (Şekil 3.18).

Şekil 3.18. Enerjide Üçlü Hedef Seti



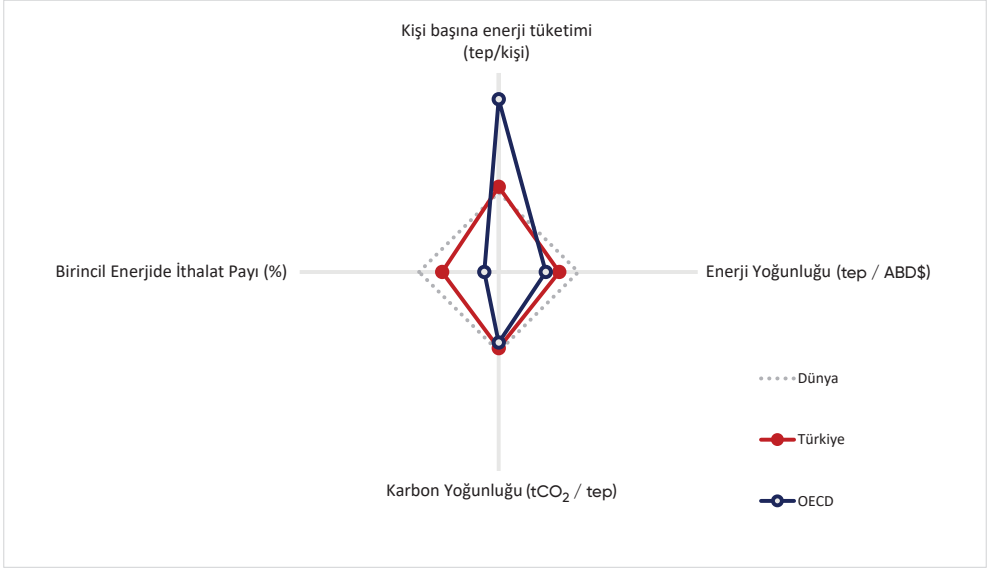
Kaynak: World Energy Council'den uyarlanmıştır

IIcec analizlerinde Türkiye enerji sektörünün, önümüzdeki dönemde daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerji geleceğine ulaştırılması bakımından kritik olan performans göstergeleri aşağıda özetlenmektedir (Şekil 3.19).

- **Kişi başına enerji tüketimi:** OECD ve AB ortalamalarının yaklaşık yarısı seviyelerinde olan kişi başına enerji tüketiminde büyümenin güvenli, sürekli, uygun maliyetli ve rekabetçi koşullarda sağlanması,
- **Enerji yoğunluğu:** Enerji verimliliğinde özellikle son dönemde sağlanmaya başlayan önemli iyileşmelerle enerji yoğunluğunda azaltım hedeflerinin sürdürülmesi, enerjide verimli büyümenin güçlenmesi ve enerji tüketiminin katma-değeri yüksek üretime dönüşümü fırsatlarının daha hızlı şekilde değerlendirilmesi,

- **Nihai enerji tüketiminde karbon yoğunluğu:** OECD ortalamasının halen üzerinde olan karbon yoğunluğunun, büyüyen bir enerji ekosistemi içerisinde, temiz enerji kaynaklarına dayalı elektrifikasyon, yenilenebilir enerjinin doğrudan kullanımı, yenilikçi temiz enerji teknolojilerinin üretiminde ve kullanımında yaygınlaşma fırsatları, dünyadaki ve bölgedeki temiz enerji odaklı girişimler ve iş birlikleri değerlendirilerek düşürülmesi,
- **Birincil enerjide ithalat yoğunluğu:** Birincil enerji arzının üçte-ikisini oluşturan ithal fosil kaynak payının, yukarıdaki üç faktörle de yakından ilişkili olarak düşürülmesi, böylelikle kendine yeterliliğin güçlendirilmesi ve enerjide ve ekonominin genelinde güçlü, sürdürülebilir ve rekabetçi büyümenin desteklenmesi.

Şekil 3.19. Enerji Sektörünün Karekodu
(2022/2023, Dünya=1:1:1, tep/kışı, tep/ABD\$, tCO₂/tep, %)

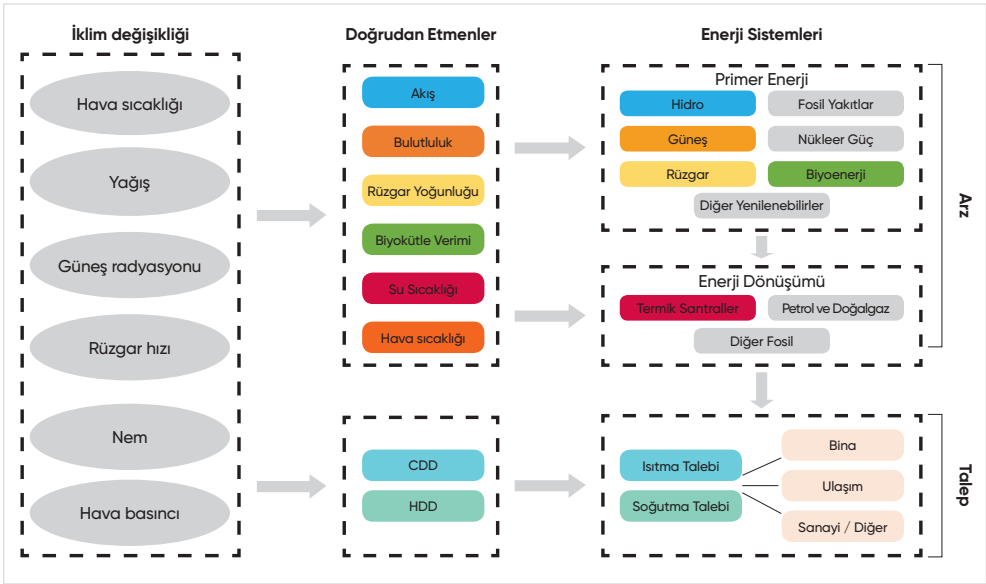


Kaynak: ETKB, IEA Verileri, IICEC Analizleri

3.5. İklim Riskleri ve Enerji Sistemi

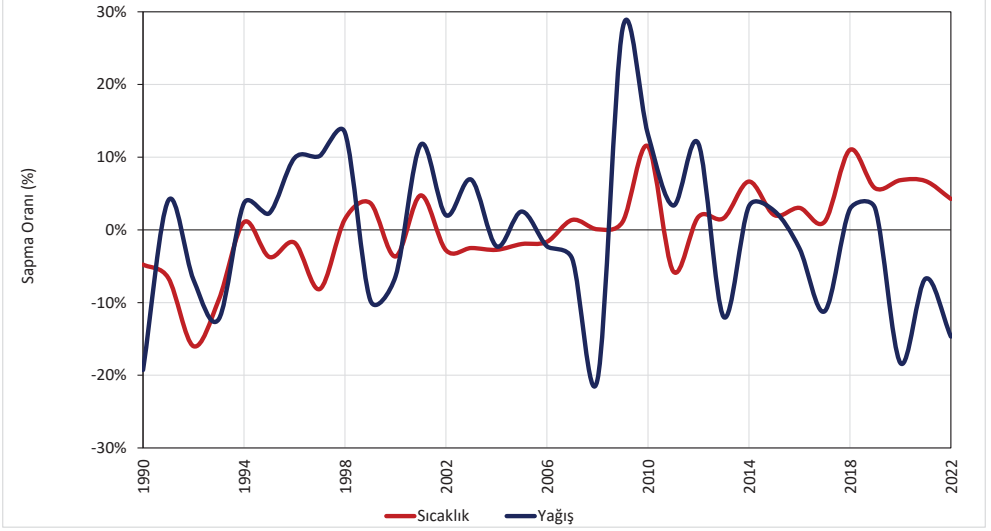
Bölüm 2’de sunulduğu gibi, son dönemde aşırı iklim olaylarının frekansı ve şiddeti artmakta, iklime ilişkin riskler daha görünür duruma gelmektedir. Akdeniz havzası iklim değişikliğinin etkilerine en fazla duyarlı bölgeler arasında yer almaktadır. IPCC tarafından yapılan en son çalışmalarda küresel sıcaklıklarda yüksek artışı durumunda Türkiye’nin de içinde olduğu Akdeniz Havzasında, kuraklık artışları, yağışlarda azalma ve rüzgar hızında azalma gibi önemli etkiler öngörülmektedir. Son dönemde aşırı iklim olaylarının frekansı artarken, yüksek sıcaklık dönemleri, hidrolojik koşullarda bozulma gibi enerji sistemi ile ilişkisi yüksek olan dinamikler daha belirgin duruma gelmektedir (IPCC, 2023). Türkiye meteorolojik verileri incelendiğinde de, son dönemde uzun dönemli ortalamalara göre sıcaklıklarda belirgin bir artış trendi gözlenmektedir. Yağışlarda ise dönemsel değişimler daha belirgin duruma gelmekte, geçmiş yıllar ortalamalarına göre önemli düşüşler görülmektedir (MGM, 2023). İklim ile ilgili gelişmeler, kurak dönemler ve hidroelektrik üretiminde azalma, elektrik talebinde soğutma kaynaklı artış, enerji altyapılarının işletiminde aşırı iklim olayları kaynaklı yeni zorluklar, rüzgar karakteristiklerinde değişim gibi alanlarda, enerji arz ve talep dinamikleri için çok boyutlu etkileri beraberinde getirebilecektir. Bu gelişmeler, enerji sisteminin iklim direncini artırabilecek stratejilerin, enerji sektörünün iklim değişikliğine uyumunun ve enerji portföyünde çeşitlendirmenin önemini pekiştirmektedir (Şekil 3.20 ve Şekil 3.21).

Şekil 3.20. İklim Değişikliğinin Enerji Sistemlerine Etkileri



Kaynak: Yalew et al., 2020, IICEC 2022

Şekil 3.21. Türkiye Sıcaklık ve Yağışlarda Ortalamalara göre Değişim (1990-2022, %)



Kaynak: MGM

3.6. Enerji, İklim Politikaları ve Stratejilerinin Temel Öncelikleri

Türkiye son dönemde enerji politikasının arz güvenliği, yerleştirme ve öngörülebilir piyasalar bileşenlerinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. Özellikle elektrik kurulu gücünde ve yenilenebilir enerji kapasitesinde büyüme, doğal gaz keşfi, elektrik şebekeleri ve doğal gaz depolama kapasiteleri gibi altyapılarda gelişim, rüzgar ve güneş teknolojilerinde yerleşme gibi alanlarda sağlanan gelişmeler yoluyla enerji sektörünün büyümesi, sosyal ve ekonomik gelişim hedeflerinin en önemli destekleyicisi olarak kritik bir işlev üstlenmektedir. Türkiye'nin enerji politikaları, enerjide ithalatın azaltılması, arz güvenliğinin güçlendirilmesi ve net-sıfır hedeflerinin eş zamanlı olarak, rekabetçi ve maliyet-etkin şekilde gerçekleştirilmesine odaklanmaktadır. Bu yönde kapsamlı ve uygulanabilir bir dönüşüme ilişkin hedeflerde, teknoloji-odaklı stratejiler de önemli yer tutmaktadır (ETKB, 2023a). Enerji ve iklim geleceğine yönelik temel politika belgeleri ve hedefleri aşağıda özetlenmektedir:

- **12. Kalkınma Planı (2024-2028):** Sürdürülebilir ve kapsayıcı büyüme hedefinin gerçekleştirilmesini sağlamak üzere bütüncül bir yol haritası vizyonu ile yayımlanan Kalkınma Planı, güvenli enerjiye, net-sıfır emisyon hedefini sağlayacak enerji dönüşümüne ve ilgili teknolojilerde gelişim fırsatlarına ilişkin önemli hedefler ve strateji başlıkları içermektedir. Plan'da enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesine yönelik adımlarla, ekonominin rekabetçiliğini sağlayacak yeşil dönüşümün önemine, teknoloji-odaklı büyüme yoluyla katma-değeri yüksek üretim alanlarına vurgu yapılmaktadır.

Yenilenebilir enerji, elektrifikasyon, enerji verimliliği, yeşil hidrojen ve enerji depolama yatırımlarının enerji güvenliği ve net-sıfır hedefi için kritik rol oynayacağı belirtilmekte, nükleer enerjide büyüme perspektifi sunulmaktadır. Plan, enerjide ve ekonominin sürdürülebilir rekabetçiliği bakımından kritik olan imalat sanayisinde ithalat bağımlılığının düşük seviyelere indirilmesi, bu kapsamdaki enerji teknolojilerinde gelişime ve yerleşmeye öncelik verilmesi hedeflerini de öne çıkarmaktadır (SBB, 2023a).

- **Türkiye Ulusal Enerji Planı (TUEP) 2022:** TUEP, Türkiye'nin enerji güvenliği hedeflerini ve 2053 net-sıfır emisyon perspektifini yansıtmaktadır (ETKB, 2022). Enerji arz ve talebine ilişkin uzun vadeli ve bütüncül bir planlama perspektifi sunan TUEP, birincil enerji arzı ve nihai enerji talebi kompozisyonunda enerji güvenliğini ve kendine yeterliliğin artırılmasını destekleyen hedefler içermektedir. TUEP aynı zamanda net-sıfır hedefleri kapsamında kritik ve kapsamlı bir dönüşüm perspektifi sunmaktadır. Plan'da, fosil yakıtların birincil enerji arzında payı 2035 yılında %70'e ve 2053 yılında %21'e düşmektedir (2022 yılında %85). 2053 yılında yenilenebilir enerjinin birincil enerji arzındaki payı %50'ye çıkarırken, nükleer enerji birincil enerji arzının %29'unu oluşturmaktadır (2022 yılında sırasıyla %15 ve sıfır). Elektrik enerjisi, özellikle 2035 sonrası artan talep ivmesi ile 2053 yılında nihai enerji talebinin ağırlıklı bileşeni konumuna gelmekte, elektrik kurulu gücü içerisinde yenilenebilir enerji ve nükleer enerjinin toplam katkısı 2035 yılında yaklaşık %70'e ve 2053 yılında %90'a kadar ulaşmaktadır. Yenilenebilir enerjide büyüme, enerji verimliliği performansında sürekli gelişim, enerji sisteminin esnekliğinin güçlendirilmesi, orta ve uzun vadede hidrojen ve diğer yenilikçi teknolojilerin sisteme entegrasyonu, Plan'da öne çıkan temalar ve hedeflerdir.
- **2053 Net-Sıfır Hedefi ve Ulusal Katkı Beyanı (NDC):** Türkiye 2053 net-sıfır hedefini açıklamıştır. 2030 yılı için %21 olarak açıklanan artıştan azaltım hedefi, 2022 COP 27 Konferansındaki yeni Ulusal Katkı Beyanı kapsamında yüzde %41'e yükseltilmiştir (Bu hedef 2012 yılının baz yıl olarak kabul edildiği referans senaryoya göre 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarında %41 azaltımı ifade etmektedir, 2030 yılında 695 Mt CO₂-eş. Net-sıfır hedefi doğrultusunda, toplam emisyonların 2038 yılında tepe noktasına ulaştırılması hedefi beyan edilmiştir). Ulusal Katkı Beyanı iklim değişikliğine uyum kapsamında öngörülen politikaları ve tedbirleri de içermektedir (ÇŞİDB, 2023).
- **Orta Vadeli Program (OVP) (2024-2026):** OVP, enerji maliyetlerinin ve enerji faturasının cari işlemler dengesine ve enflasyona etkilerine vurgu yapmaktadır. Bu çerçevede, yenilenebilir enerji kullanımında ve enerji verimliliğinde artış gibi başlıklarda, enerji sektöründe arz güvenliğini ve çevresel performansı eş zamanlı olarak güçlendirecek alanlarda çok sayıda eylem tanımlanmaktadır.

OVP, 2053 net-sıfır emisyon hedefine yönelik uzun vadeli düşük emisyonlu kalkınma stratejisinin, kalkınma planlarıyla uyumlu şekilde hazırlanması hedefini de belirtmektedir. Sürdürülebilir ve teknoloji-odaklı enerji dönüşümüne katkı sunacak, enerji depolama, hidrojen ve ileri karbon teknolojilerinde Ar-Ge ve yenilik faaliyetlerinin desteklenmesi hedeflenmektedir (SBB, 2023b).

- **Diğer Politika Belgeleri:** Net-sıfır hedefi, enerjide, iklimde ve yenilikçi enerji teknolojilerinde küresel ve bölgesel gelişmeler kapsamında, İklim Kanunu, Yeşil Mutabakat Eylem Planı, ulusal emisyon ticaret sisteminin kurulması, sanayi dönüşümü odaklı stratejileri gibi başlıklardaki gelişmelerin de önümüzdeki dönemde enerji sektörünün büyümesinde ve dönüşümünde önemli rol oynayacağı değerlendirilmektedir.

3.7. Politika ve Stratejilerde Hidrojen

Hidrojen, son dönemde özellikle net-sıfır hedefinin belirlenmesiyle birlikte strateji bileşenleri arasında konumlandırılmaya başlamıştır. Kalkınma Planı, net sıfır emisyon hedefleri çerçevesinde yeşil hidrojen üretiminin daha önemli hale geleceğine vurgu yapmaktadır. TUEP, bütüncül arz ve talep sistem içerisinde hidrojene ilişkin hedefler içermektedir. 2023 yılının başında bir ilk olarak yayımlanan Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasında, yeşil hidrojen odaklı bir gelişim hedefi, özellikle teknoloji-odaklı alanlara ilişkin değerlendirmeler ve hedeflerle birlikte sunulmaktadır.

- **12. Kalkınma Planı (2024–2028):** Yeşil dönüşüm kapsamında hidrojen değer zinciri içerisindeki üretim, depolama, taşıma ve sanayide kullanım süreçleri ile ilgili bileşen, ekipman ve sistemlerde yerleşmenin ve ticarileştirilmenin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Yeşil hidrojen üretiminin sağlanabilmesi için yerli elektrolizör geliştirilmesine yönelik çalışmaların yapılmasına, hidrojenin taşınmasına ve depolanmasına yönelik Ar-Ge çalışmalarının sürdürülmesine, hidrojen yakıt hücresi ve bileşenlerine ve hidrojen temelli motorlara yönelik teknolojilerin geliştirilmesine, kömürün hidrojen, metanol ve amonyak üretimi gibi alanlarda sürdürülebilir şekilde kullanılabilmesine yönelik perspektif öne çıkmaktadır. Plan'da ayrıca, hidrojen teknolojilerinde mevcut durumda yerli üretim yetkinliklere ilişkin envanter çalışmalarının yapılması ve hidrojenin teknik ve ekonomik yönlerden kullanılabilirliğine ilişkin sektörel analizlerin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Hidrojen ve amonyakta yeşil teknolojilerle üretime yönelik yatırımların destekleneceğinin vurgulandığı Plan'da yeşil hidrojen başta olmak üzere hidrojen teknolojilerinin ve ilgili altyapıların gelişimine yönelik uluslararası iş birliklerinin de destekleneceği belirtilmektedir (SBB, 2023a).

- **TUEP 2022:** Plan'da hidrojenin orta ve uzun dönemde enerji sistemine katkısının kademeli olarak arttığı görülmektedir. 2030 yılında yaklaşık 2 GW ve 2035 yılında 5 GW elektrolizör kapasitesi hedefi belirtilmekte, hidrojenin ilk aşamalarda öz-tüketime ve sanayi sektörlerinin talebinin karşılanmasına yönelik kullanılması öngörülmektedir. 2053 net-sıfır emisyon hedefi için nihai enerji hizmetlerinde doğal gaz tüketiminin hidrojen ve sentetik metan gibi temiz yakıtlarla karışımına vurgu yapılan Plan'da, hidrojenin gaza karışım oranı 2035 yılında %3,5 ve 2053 yılında %12 olarak belirlenmiştir (ETKB, 2022).
- **OVP (2024-2026):** Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) ve 2053 net sıfır emisyon hedefi kapsamında hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge ve yenilik faaliyetlerinin destekleneceği belirtilmektedir (SBB, 2023b) (SKDM ve ilgili analizler için lütfen Bölüm 4'e bakınız).
- **Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası:** Yerli teknolojileri baz alarak, yeşil hidrojenin üretiminden son kullanımına kadar etkin bir değer zinciri oluşturarak 2053 net sıfır hedefine katkı sağlamak amacıyla yayımlanan belge, yeşil hidrojen üretiminde ve kullanımında dünyada öncü olma vizyonu içermektedir (ETKB, 2023b).
 - Teknoloji-odaklı bir yol haritası da niteliğindeki belgede, hidrojen üretim, depolama ve dağıtım, kullanım ve uygulama teknolojilerinde tespit edilen ihtiyaçlar çerçevesinde sektörler bazında teknolojik yaygınlaşma perspektifi sunulmaktadır.
 - Hidrojenin ham madde, yakıt, enerji taşıyıcısı ve enerji depolama gibi potansiyel kullanım imkanlarının elektrifikasyon yönlü gelişmenin tamamlayıcısı rolüne vurgu yapılmaktadır.
 - Yerli kaynaklardan üretilen yeşil hidrojenin sektörlerin talepleri karşılanırken aynı zamanda ihtiyaç fazlasının ihraç edilmesi yoluyla döviz girdisi sağlanmasına da öncelik verilmektedir.
 - Belge, yerli teknoloji gelişimi, mevzuat, sertifikasyon, talep ve yatırım teşvikleri, insan kaynağı gibi kritik gelişim alanlarını kapsayan 13 politika içermektedir (Şekil 3.24):

1. Mevcut mevzuatın gözden geçirilerek "hidrojen üretim, taşıma, depolama ve kullanım" için uygun hale getirilmesi,
2. Yeşil hidrojen üretiminde ve depolanmasında yerli aksam kullanılmasına yönelik teşvik mekanizması oluşturulması,
3. "Yeşil hidrojen" için sertifika programları oluşturulması ve bu programların izlenebilirliğinin sağlanması,
4. Yerli ve millî teknolojilerin (elektrolizör, yakıt hücresi vb.) geliştirilerek üretilmesi için Ar-Ge ve Ür-Ge'nin teşvik edilmesi,
5. Linyit ve organik atıklardan hidrojen ve sentetik gaz üretimi için Ar-Ge çalışmaları yapılması,
6. Sanayi, teknoloji, standartlar ve sertifikasyon geliştirme, tedarik zinciri ve ticaret fırsatları ile ilgili konularda uluslararası iş birliği yapılması,
7. Ticari talep ve yatırımları teşvik etmek için kamu ve özel sektör iş birlikleri oluşturulması,
8. Karbon salımının azaltılması zor olan sektörler (kimya, demir-çelik, ulaşım, cam, seramik vb.) öncelikli olmak üzere ilgili tüm sektörlerde yeşil hidrojenin kullanımının yaygınlaştırılmasının teşvik edilmesi,
9. Yeşil hidrojen üretimini artırmak için yenilenebilir enerjinin üretim ve kullanım payının yükseltilmesi,
10. Hidrojen teknolojileri konusunda nitelikli insan gücü yetiştirilerek, istihdamda sürekliliğinin sağlanması,
11. Mevcut doğal gaz hatlarına hidrojen karıştırılmasıyla ısı sektörünün kademeli olarak karbonsuzlaşma dönüşümüne katkı sağlanması,
12. Hidrojen depolamada başta bor madeni olmak üzere yerli kaynakların kullanılması,
13. Dünya ve özellikle Avrupa pazarına yerli teknolojiler ile ihtiyaç fazlası yeşil hidrojen veya amonyak ihraç edilmesi.

Şekil 3.24. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası Politika Hedefleri



3.8. Hidrojen Ekosisteminde Öne Çıkan Güncel Gelişmeler

Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasının yayımlanması, böylelikle hidrojen ekosisteminde teknoloji-odaklı önceliklerin belirlenmesi, hidrojen değer zincirinin gelişimine yönelik önemli bir ilk adım olmuştur. Önümüzdeki dönemde söz konusu stratejinin dinamik şekilde geliştirilmesi ve derinleştirilmesi, hidrojen arzında ve talebinde büyüme fırsatlarını ve büyümenin çok boyutlu enerji, iklim ve teknoloji faydalarını destekleyecektir.

Son dönemde hidrojen üretiminde, kullanımında ve diğer ilgili alanlarda, kamu, sanayi ve akademide önemli girişimler gelişmektedir.

- Kümelenme ve vadi yaklaşımlarının ilk örnekleri olan Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu ve Türkiye’de bugüne kadarki en yüksek AB katkılı hibe desteğini alan HYSouthMarmara Hidrojen Vadisi Projesi 2023 yılı içerisinde başlamıştır⁵ (European Commission, 2023b; GMKA, 2023a; GMKA, 2023b; Sabancı Üniversitesi, 2023a; Sabancı Üniversitesi, 2023b).
- TÜBİTAK MAM ve ASPİLSAN gibi kurumlar tarafından yerli elektrolizör projeleri odaklı çalışmalar sürdürülmekte, ekosistemde özel sektör paydaşları tarafından da elektrolizör geliştirilmesine ve kuruluşlarına yönelik çeşitli çalışmalar gelişmektedir. TÜBİTAK MAM yakıt hücresi teknolojilerine yönelik çalışmalarını sürdürmektedir (ASPİLSAN, 2022; TÜBİTAK MAM, 2022).

⁵ HYSouthMarmara projesinin ortakları Güney Marmara Kalkınma Ajansı, Sabancı Üniversitesi, Enerjisa Enerji Üretim A.Ş., Kale Seramik Çanakkale Kalebodur A.Ş., Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş., Eti Maden, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Türk Alman Üniversitesi, Linde Gaz A.Ş., Bandırma On Yedi Eylül Üniversitesi, Hidrojen Peroksit A.Ş. ve TENMAK. Projede Türkiye dışından Almanya, İtalya ve Fas’tan da birer katılımcı yer almaktadır.

- TÜBİTAK Sanayi Yenilik Ağ Mekanizması (SAYEM) kapsamında hidrojen teknolojilerinin desteklenmesi odaklı çalışmalar başlatılmıştır. TENMAK tarafından çeşitli hidrojen teknolojileri alanlarında sanayi ve akademi iş birliklerini ve projeleri destekleyici programlar geliştirilmektedir. TENMAK hidrojen teknolojilerine yönelik altyapılar da oluşturulmaktadır (TENMAK, 2022a; TENMAK, 2022b; TENMAK, 2023; TÜBİTAK MAM, 2023).
- Yerleşme hedefleri ile uyumlu olarak, hidrojen depolama teknolojilerinin geleceğinde önemli bileşenlerden olan sodyum bor hidrür teknolojisinin ve ilgili yatırımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Yerleşmede, Türkiye'nin kömür rezervlerinin temiz hidrojen üretimi amaçlı değerlendirilmesi bakımından da önemli fırsat alanları bulunmaktadır (Eti Maden, 2019; TKİ, 2021; AA, 2022).
- Avrupa'da hidrojen ekosisteminin platformu Hydrogen Europe'a katılımlar artmaktadır (Hydrogen Europe, 2023).
- Elektrik üretimi ve rafineri sektörlerinde yeşil hidrojen üretimi yönünde hedefler açıklanmakta, karayolu ulaşımında hidrojen kullanımına ilişkin yatırımlar ve ilk uygulamalar da gelişmektedir.

Tüm bu gelişmelerin, hidrojen ekosisteminde büyümenin ilk fazında sağlanabilecek iyi uygulama örnekleri yoluyla ekosistemde farkındalığın gelişimine ihtiyaçların tespitine ve daha geniş fırsatların değerlendirilmesine önemli zemin oluşturacağı değerlendirilmektedir.

3.9. Yeşil Hidrojen Daha Güvenli, Temiz ve Teknoloji-Odaklı Enerji Geleceğine Nasıl Katkı Sağlayacak ?

Türkiye'nin temiz elektrifikasyon, yenilenebilir enerji ve enerji verimliliğinde yüksek büyüme potansiyeli, enerji güvenliğinde güçlendirme ve net-sıfır perspektifinin kritik bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu alanlarda potansiyelin artan oranlarda performansa dönüştürülmesi, temiz enerji geleceğine ve enerjide kendine yeterliliğin güçlendirilmesine geniş katkılar sunacaktır. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de önümüzdeki otuz yıl içerisinde emisyonlarda azaltım için en büyük katkının bu üç alandan gelmesi öngörülmektedir.

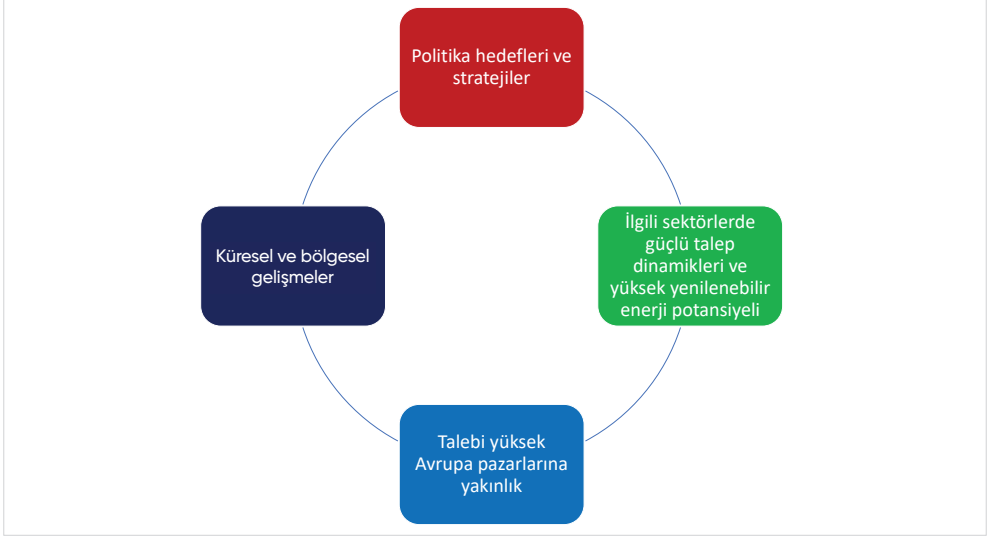
Bununla birlikte, bütüncül enerji sisteminin net-sıfır emisyon konumuna erişebilmesi için elektrifikasyon çözümleriyle karbondan arındırılması zor olan, fosil yakıt-yoğun sanayi sektörlerinde ve bazı ulaştırma alanlarında düşük karbonlu hidrojen kullanımıyla petrol, kömür ve doğal gazın ikame edilebilmesi gerekmektedir. Söz konusu sektörlerde yeşil hidrojen kullanımının yaygınlaşması, net-sıfır patikasını desteklemenin yanı sıra yanı sıra, temiz ve aynı zamanda yerli olan kaynakların kullanımı sayesinde enerji güvenliğinin iyileştirilmesinde, enerjide ithalat hacimlerinin ve faturasının azaltılmasında da kritik işlev üstelenecektir.

12. Kalkınma Planı ve Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda önceliklendirilen hedefler, yeşil hidrojen teknoloji-odaklı büyüme fırsatlarını desteklemektedir. Hidrojen ekosisteminin güçlü ve sürdürülebilir gelişimi, güvenli ve temiz enerji geleceğine ek olarak teknolojik gelişim ve teknolojilerde yerleşme için de önemli fırsat alanları içermektedir.

Bölüm 2'de sunulan teknoloji spektrumu ve ilgili teknolojilerdeki küresel ve bölgesel teknoloji gelişimi yarışı, teknolojilerde kendine yeterliliğin sağlanması, dünyada önde gelen üretim ve tedarik üslerinden birisi konumuna erişilmesi için önemli bir fırsat penceresi sunmaktadır. Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasında belirtilen teknolojiler bu çerçevede önemli bir baz oluşturmaktadır. Güçlü yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli yeşil hidrojen üretimi ve tedariki için önemli olup, Türkiye bölgesel rekabetçilik bakımından avantajlar sağlamaktadır. Talebi yüksek Avrupa pazarlarına yakınlık da, gelecekte bölgesel konumu güçlendirecek önemli bir fırsat alanıdır (Şekil 3.25).

Çalışmanın sonraki bölümlerinde, yeşil hidrojen üretiminin ve talebinin gelişimine yönelik uzun vadeli bir gelecek perspektifi, daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceğinde sağlayabileceği somut katkılar ile birlikte sunulmaktadır.

Şekil 3.25. Yeşil Hidrojen Türkiye'nin Güçlü Yönleri



IICEC Analizleri

Referanslar

- Anadolu Ajansı (AA) (2022), Doğal Gaz İthalatını Azaltmaya Aday ‘Türk Linyitini Gazlaştırma’ Teknolojisi Hazır
<https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/dogal-gaz-ithalatini-azaltmaya-aday-turk-linyitini-gazlastirma-teknolojisi-hazir/2509837>
- Askeri Pil Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi (ASPILSAN) (2022), Türk Sanayisinin İlk Yeşil Hidrojen Tesisinin Kurulması İçin Start Verildi
<https://www.aspilsan.com/turk-sanayisinin-ilk-yesil-hidrojen-tesisinin-kurulmasi-icin-start-verildi/>
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA) (2023), Motorisation Rates in the EU by Country and Vehicle Type
<https://www.acea.auto/figure/motorisation-rates-in-the-eu-by-country-and-vehicle-type/>
- European Commission (2023b), South Marmara Hydrogen Shore
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-repository/hysouthmarmara_en
- European Commission (2023a), Eurostat Database
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>
- Eti Maden (2019), Geleceğin Yenilenebilir Enerjisinin Depolayıcısı: Bor
<https://www.etimaden.gov.tr/enerji>
- Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA) (2023a), “Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu” GÜDÜMLÜ PROJESİ’nde İmzalar Atıldı
<https://www.gmka.gov.tr/haber/guney-marmara-hidrojen-kiyisi-platformu-gudumlu-projesinde-imzalar-atildi>
- Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA) (2023b), “South Marmara Hydrogen Shore- HYSouthMarmara” Hidrojen Projesi’nin Uygulama Dönemi Başladı
<https://www.gmka.gov.tr/haber/south-marmara-hydrogen-shore---hysouthmarmara-hidrojen-projesinin-uygulama-donemi-basladi>
- Hydrogen Europe (2023), Member Locations
<https://hydrogeneurope.eu/members-locations/>

- International Energy Agency (IEA) (2023), Data and Statistics
<https://www.iea.org/data-and-statistics>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023), Climate Change Synthesis Report 2023
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) (2023), Karayolu Ulaşım İstatistikleri 2022
<https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Yayinlar/YayinPdf/KarayoluUlasimIstatistikleri2022.pdf>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) (2023), Meteorolojik Parametrelerin Türkiye Analizi
<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=F>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2023), OECD Stat
<https://stats.oecd.org/>
- Otomotiv Sanayicileri Derneği (OSD) (2023), Otomotiv Sanayii Genel ve İstatistik Bülteni 2023
https://www.osd.org.tr/saved-files/PDF/2023/05/24/KATALOG_2023.pdf
- Sabancı Üniversitesi (2023a), Sabancı Üniversitesi'nin de Yer Aldığı Hidrojen Vadisi Projesi, Bugüne Kadarki En Yüksek AB Katkılı Hibe Desteğini Aldı
<https://gazesu.sabanciuniv.edu/tr/sabanci-universitesinin-de-yer-aldigi-hidrojen-vadisi-projesi-bugune-kadarki-en-yuksek-ab-katkili>
- Sabancı Üniversitesi (2023b), Sabancı Üniversitesi'nin de Yer Aldığı Türkiye'nin İlk Hidrojen Vadisi Projesi için İmza Töreni Gerçekleşti
<https://gazesu.sabanciuniv.edu/tr/sabanci-universitesinin-de-yer-aldigi-turkiyenin-ilk-hidrojen-vadisi-projesi-icin-imza-toreni>
- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2020), Turkey Energy Outlook 2020
<https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/teo>
- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2021), Türkiye Elektrikli Araçlar Görünümü
<https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/tevo>

- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2022), Türkiye Yenilenebilir Enerji Görünümü

<https://iicec.sabanciuniv.edu/treo>

- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) (2022), Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojileri

<https://malzeme.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/hidrojen-ve-yakit-pili-teknolojileri>

- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) (2023), Hidrojen Ekosistemi İş Birliği Toplantısı ile Geleceğin Enerji Çözümü Gündemde!

<https://mam.tubitak.gov.tr/tr/haber/hidrojen-ekosistemi-birligi-toplantisi-ile-gelecegin-enerji-cozumu-gundemde>

- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) (2023a), On İkinci Kalkınma Planı

https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/11/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_17112023.pdf

- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) (2023b), Orta Vadeli Plan (2023-2025)

<https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/09/Orta-Vadeli-Program-2023-2025.pdf>

- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Yatırım Ofisi (CYO) (2023), Kütüphane

<https://www.invest.gov.tr/tr/library/sayfalar/default.aspx>

- Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İklim Değişikliği Başkanlığı (ÇŞİDB) (2023), Türkiye Cumhuriyeti Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı

<https://www.iklim.gov.tr/db/turkce/haberler/files/T%C3%BCrkiye%20Cumhuriyeti%20G%C3%BCncellenmi%C5%9F%20Birinci%20Ulusal%20Katk%C4%B1%20Beyan%C4%B1.pdf>

- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2022), Türkiye Ulusal Enerji Planı

https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2023a), Kurum Politikalarımız

<https://enerji.gov.tr/bm-kurum-politikalarimiz>

- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2023b), Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası

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

- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2023), Denge Tabloları

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

- Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (TCMB) (2023a), Ödemeler Dengesi İstatistikleri

<https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Odemeler+Dengesi+ve+Ilgili+Istatistikler/Odemeler+Dengesi+Istatistikleri/>

- Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (TCMB) (2023b), Enerji İthalat Fiyatlarının Son Dönem Seyri ve Belirleyicileri

<https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/8d4893c3-09f8-4aad-96cd-82673705066e/en2305.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-8d4893c3-09f8-4aad-96cd-82673705066e-oFGb6Gs>

- Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB) (2023), İstatistikler

<https://www.uab.gov.tr/istatistikler>

- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) (2023), Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri

<https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>

- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü (TENMAK) (2022a), Araştırma Alanları

<https://temen.tenmak.gov.tr/tr/laboratuvarlar/hidrojen-teknolojileri/arastirma-alanlari-temen.html>

- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü (TENMAK) (2022b), Hidrojen Teknolojileri

<https://temen.tenmak.gov.tr/tr/laboratuvarlar/hidrojen-teknolojileri.html>

- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) (2023), Hidrojen Teknolojileri ve Yakıt Hücresi Çağrısı
<https://www.tenmak.gov.tr/tugepbasvuru/EK-1.pdf>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2023), İstatistik Veri Portalı
<https://data.tuik.gov.tr/>
- Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) (2021), Temiz Kömür Teknolojileri
<https://www.tki.gov.tr/temiz-komur-teknolojileri>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2023), Reports
https://unfccc.int/reports?f%5B0%5D=corporate_author%3A249&f%5B1%5D=document_type%3A3517
- World Bank (WB) (2023), Open Data
<https://data.worldbank.org/>
- World Energy Council (2022), World Energy Trilemma Index
<https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index>
- Yalew et al., (2020), Impacts of Climate Change on Energy Systems in Global and Regional Scenarios, Nature Energy, Volume 5, October 2020
<https://www.nature.com/articles/s41560-020-0664-z>

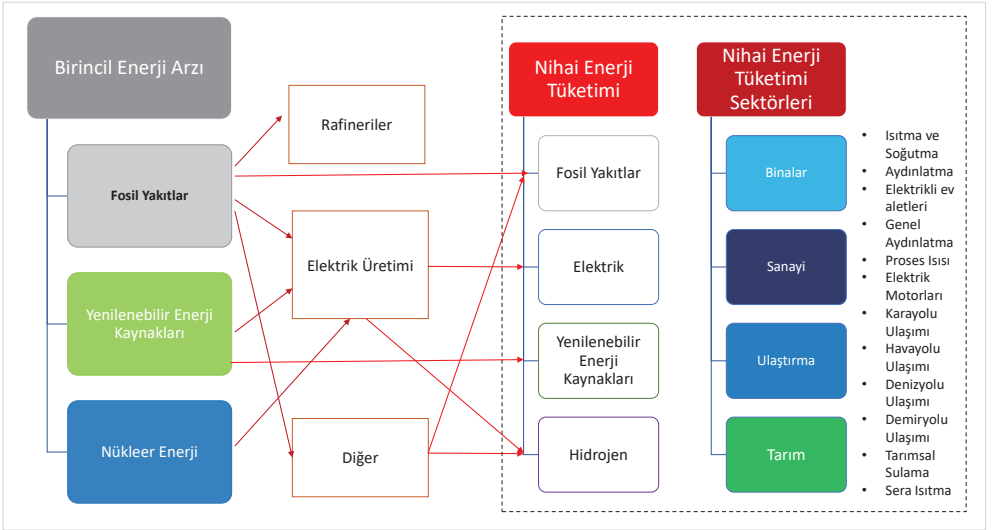
BÖLÜM 4:

IICEC Analizlerinde
Türkiye'de Yeşil Hidrojen
Geleceği & Çok Boyutlu
Faydalar

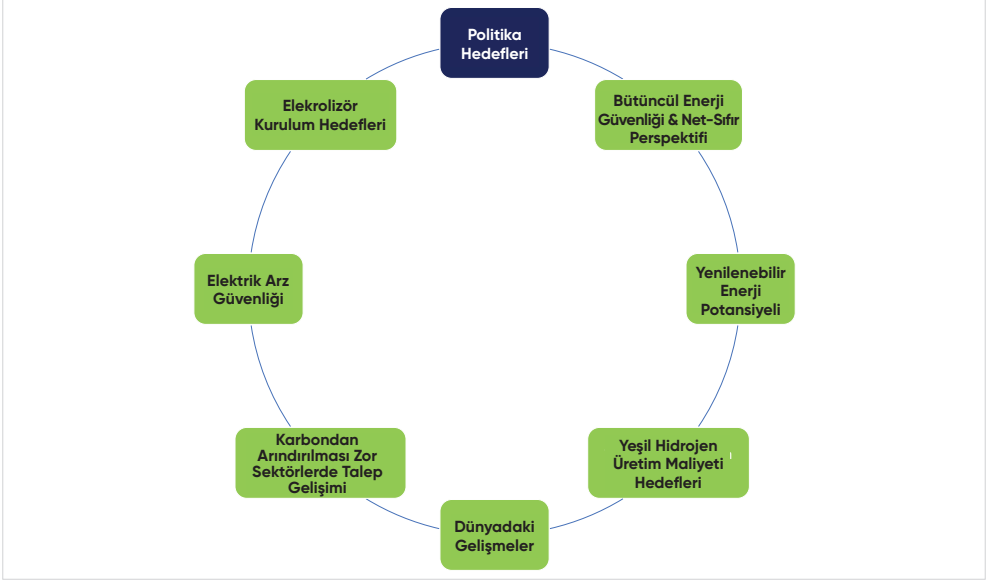
4.1. IICEC Modeli ve Analizleri Genel Çerçevesi

IICEC tarafından 2020 yılında Türkiye’de bir ilk olarak gerçekleştirilen “Türkiye Enerji Görünümü 2020” çalışmasının temel çıktıları ve bütüncül modelleme altyapısını, enerjide ve hidrojenle 12. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Türkiye Ulusal Enerji Planı ve diğer ilgili politikalardaki hedefleri ve stratejileri, sektörel yönelimleri, Bölüm 2’de sunulan dünyadaki ilgili gelişmeleri esas alan analizlerde, Türkiye’de yeşil hidrojenle uzun vadede büyüme ve gelişim perspektifi detaylı olarak değerlendirilmiştir (SBB 2023; ETKB 2022; ETKB 2023; IICEC, 2020) (temel politika belgeleri ve veri kaynakları için lütfen EKLER’e bakınız). Yeşil hidrojen üretiminde ve talebinde gelişimin, Türkiye’nin enerji ekonomisi ve çevresel performans bakımından sağlayacağı çok boyutlu katkılar somut göstergelerle analiz edilmiştir. Bu çerçevede, enerji arzında yerleşme ve çeşitlendirme, enerji ithalatında tasarruflar, sera gazı emisyon envanterinde azaltım etkileri gibi kritik kazanımlar, fosil yakıt ithalatının ve karbon emisyonlarının maliyetleri kapsamında irdelenmiştir. Çalışmada maliyet tarafına ilişkin faktörler de değerlendirilerek bütüncül fayda ve maliyet analizleri gerçekleştirilmiş, fayda-maliyet çarpanının gelecekteki gelişimi irdelenmiştir. Tekno-ekonomik analizler çerçevesinde yeşil hidrojen üretiminin ekonomisine ve rekabetçiliğine, fayda-maliyet çarpanının arz ve talep bileşenlerine ilişkin çeşitli hassasiyet analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).

Şekil 4.1. IICEC Modelleme ve Analiz Perspektifine Genel Bakış



Şekil 4.2. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojende Büyümede Kritik Faktörler



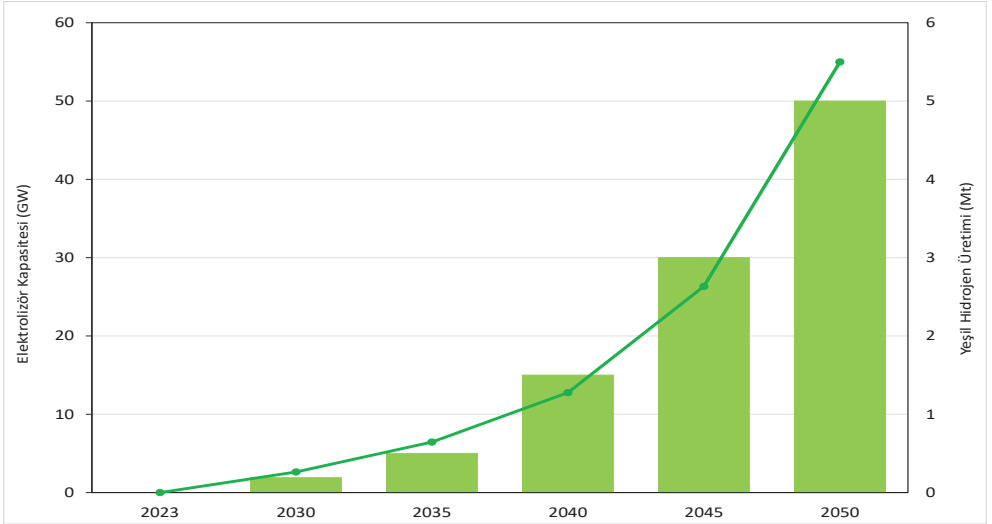
4.2. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojen Arz ve Talep Gelişimi

4.2.1. Yeşil Hidrojen Üretimi Geleceği

IICEC modelleme çerçevesi ve analizlerinde yeşil hidrojen üretimi perspektifi, Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki elektrolizör kapasitesi sayısal hedeflerini yansıtmaktadır (2030'da 2 GW, 2035'te 5 GW ve 2053'te 70 GW) (ETKB, 2023). Bu doğrultuda 2050- 2053 döneminde 50-70 GW kuruluma ulaşılmasına yönelik bir gelişim patikasını baz alan analizlerde, 2050 yılına kadar olan dönemdeki büyüme yılda ortalama yaklaşık 2 GW kapasite artışı gerektirmektedir. Elektrolizör kapasitesi 2030-2050 döneminde yıllık ortalama %12 artış göstermektedir (2040 yılında 15 GW ve 2045 yılında 30 GW). Kapasitede gelişim ivmesi özellikle 2035 sonrası dönemde güçlenmektedir. Talep sektörlerinde gelişim, teknolojik ilerlemelerle maliyet performansında iyileşmeler ve yerli imalat yetkinliklerinin kazanılmasının büyüme ivmesini destekleyeceği değerlendirilmektedir. Yıllık ortalama kapasite artışı 2040-2045 döneminde 3 GW ve 2045-2050 döneminde 4 GW'a ulaşmaktadır (2050-2053 döneminde 6,7 GW). Öncelikle 2030-2035 döneminde 2-5 GW kuruluma ulaşılabilmesi, 2053 yılına doğru resmi hedeflere ulaşılabilmesinde belirleyici unsur olacaktır. Kurulumların henüz sınırlı sayıda ve oldukça küçük ölçeklerde bulunduğu dikkate alındığında, söz konusu sayısal hedeflere ulaşılabilmesi için kapasite gelişim ivmesinde yakın vadede önemli artış sağlanması ve buna yönelik uygulanabilir bir yol haritasının oluşturulması gerekecektir (2035 yılına kadar yıllık ortalama yaklaşık 400 MW artış) (Şekil 4.3).

Yeşil hidrojen üretimi potansiyeli, elektrolizör kapasitesi gelişim patikası, kullanım oranlarının gelecekte muhtemel gelişimi ve verimlilikte küresel teknolojik ilerlemelere ilişkin öngörüler çerçevesinde analiz edilmiştir. 2050 yılında 50 GW elektrolizör kapasitesi bazında 5,5 milyon ton (Mt) yeşil hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir (2030 yılında 0,3 Mt ve 2040 yılında 1,3 Mt). Bölüm 2'de sunulan elektrolizör teknoloji gelişim perspektifi ve fırsatları içerisinde ortalama verim 2050 yılına kadar olan dönemde yaklaşık %65'ten %75'e çıkmaktadır. Elektrolizör kurulumları ekosistem gelişiminin ilk aşamalarında geleneksel hidrojen tüketicisi sektörlerde ve sanayide yeni talep sektörlerinde tüketimin olduğu yerde üretim odaklı olarak gelişmektedir. Dolayısıyla, başlangıç aşamalarında elektrolizör kapasitesinde yüksek kullanım oranları beklenmektedir (2030-2035 dönemine kadar asgari %70). Talep portföyü özellikle 2035 sonrası dönemde sektörler bazında daha çeşitlenmiş bir niteliğe ulaşmaktadır. Ulaştırma ve lojistik sektörlerinde talep gelişimi ve kurulumların coğrafi yaygınlığının artması neticesinde ortalama kullanım oranında tedrici bir düşüş öngörülmektedir (2040 yılında %65 ve 2050 yılında %56). Bu gelişim dünyadaki beklentilerle de uyum göstermektedir¹ (Talep gelişim perspektifinin detayları için lütfen Bölüm 4.2.2'ye bakınız). Tüm bu dinamik parametreler çerçevesinde birim elektrolizör kapasitesi başına yeşil hidrojen üretimi 2030-2040 döneminde azalmakta, sonrasında ise kullanım oranlarında düşüş hızının üzerinde verimlilik artışları neticesinde 2050 yılında 2030 yılı seviyesine yaklaşmaktadır (2030 yılında 138,1 kt/GW ve 2050 yılında 110,0 kt/GW²) (Şekil 4.4).

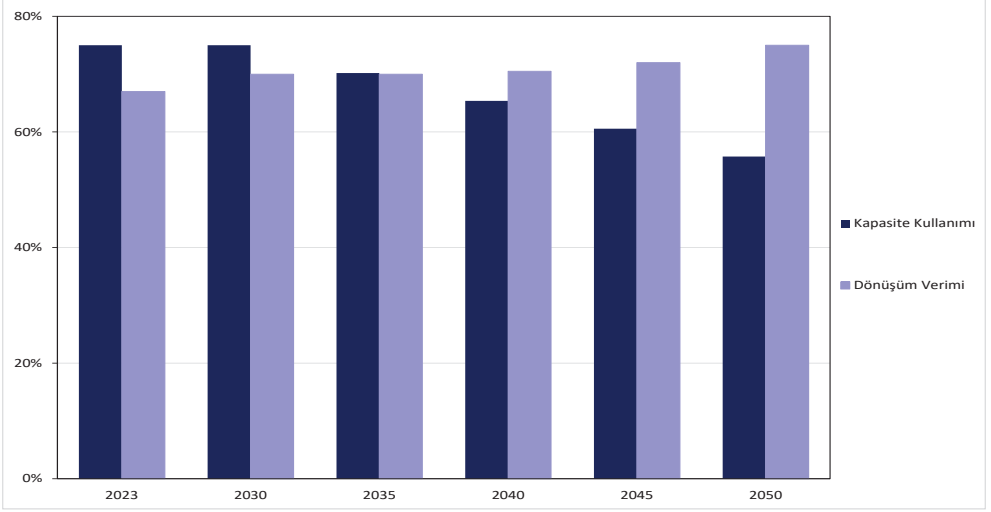
Şekil 4.3. Elektrolizör Kapasitesi ve Yeşil Hidrojen Üretimi Gelişimi (2023 – 2050, GW, Mt)



¹ IEA NZE Senaryosunda 2050 yılında elektrolizör ortalama kullanım oranı %45 (<https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>)

² 2050 yılına kadar ortalama %75 kullanım oranı durumunda: 147,3 kt/GW veya 7,4 Mt; 5,5 Mt üretim için 37,3 GW. Dönüşüm faktörleri için EKLER'e bakınız.

Şekil 4.4. Elektrolizör Verimi ve Kullanım Oranı Gelişimi (2023 – 2050, %)

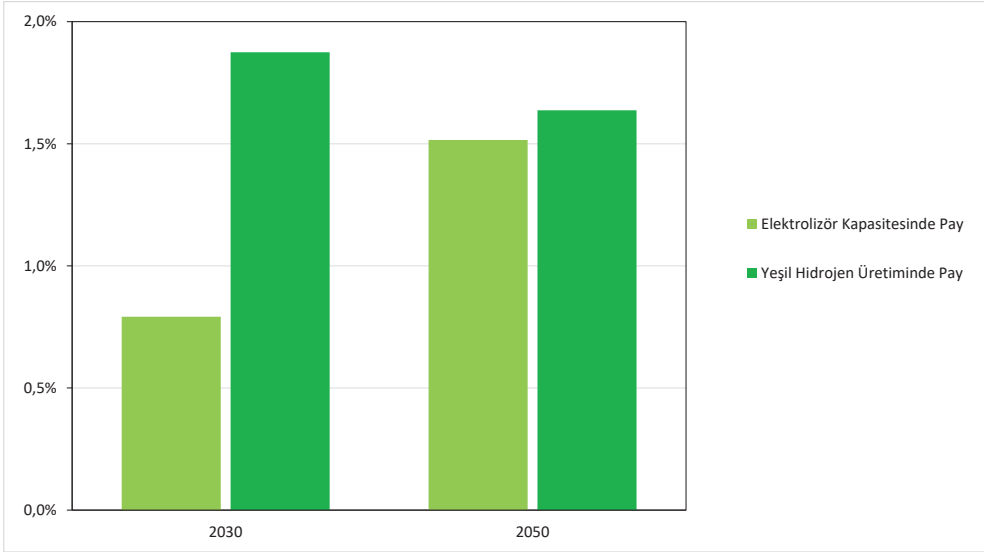


Yeşil hidrojenle küresel net-sıfır hedefi ile uyumlu gelişim patikasında, dünyada toplam elektrolizör kapasitesi 2030 yılında 420 GW ve 2050 yılında 3300 GW'a ulaşmaktadır. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki elektrolizör kapasitesi sayısal hedefleri ile Türkiye'nin kurulu kapasitede küresel payı 2030 yılında binde 8'e ve 2050 yılında %1,5'a karşılık gelmektedir. Diğer bir ifadeyle, uzun vadede Türkiye'nin net-sıfır hedefi çerçevesinde açıkladığı elektrolizör kurulum hedefi, 2030-2050 döneminde küresel payda yaklaşık 2 kat artış sağlayabilecektir.

2030 yılı hedefi, somut hedefler açıklamış olan bazı Avrupa ülkeleri ile karşılaştırıldığında nispeten düşük seviyededir. 2035 yılı hedefi ise Avrupa'daki pek çok 2030 hedefine daha yakın görünmektedir (Almanya 10 GW, Fransa 6,5 GW, İtalya ve Birleşik Krallık 5 GW, İspanya 4 GW, Hollanda 3-4 GW, Polonya 2 GW, Yunanistan 1,7 GW) (IEA, 2023a). Mevcut kurulumlar ve proje portföyleri çerçevesindeki analizler de Avrupa'daki bazı bölgelerle üç ila beş yıllık bir faz farkına işaret etmektedir.

Türkiye enerji sektörünün Bölüm 3'te sunulan genel dinamiklerinin de karşılaştırmalı analizlerde dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle enerji sektöründe genel talep büyümesinin, enerji arz güvenliği ihtiyaçlarının, elektrifikasyon gelişim hızının ve tüm bu boyutlara ilişkin maliyet çerçevesinin ve yatırım gereksiniminin, kapasitede hedeflenen hızda bir büyümenin sağlanabilmesinde, yakın ve orta vadede kurulum hedeflerine ulaşılabilmesinde kritik olacağı değerlendirilmektedir. 2053 hedefini yansıtan yeşil hidrojen üretim büyüme perspektifinde Türkiye'nin dünya toplam üretimindeki payı %2'ye yakın gerçekleşmektedir (Türkiye'nin dünya toplam birincil enerji arzında ve nihai enerji talebinde payı 2022 yılında yaklaşık %1 ve 2050 yılında öngörülen yaklaşık %1,5) (Şekil 4.5).

Şekil 4.5. Türkiye'nin Elektrolizör Kapasitesi ve Yeşil Hidrojen Üretiminde Küresel Payı (2030, 2050, %)



Elektrolizör kapasitesinde gelişim, elektrik girdisi gereksiniminde de buna paralel bir artışı beraberinde getirecektir. IICEC analizlerinde elektrolizör kurulu gücünü destekleyecek elektrik gereksinimi 2030 yılında 12 TW-saat ve 2035 yılında 31 TW-saat olarak hesaplanmaktadır. Elektrik talebi 2030 yılından itibaren her on yıl içerisinde yaklaşık üç kat artış göstererek 2040 yılında 86 TW-saate ve 2050 yılında 244 TW-saat'e ulaşmaktadır (2050 yılında Türkiye'nin 2022 yılı toplam brüt elektrik talebinin yaklaşık üçte-ikisine eşdeğer). Türkiye enerji sektöründe güçlü elektrifikasyon dinamikleri çerçevesinde, enerji arz güvenliğini verimli şekilde desteklerken aynı zamanda net-sıfır hedefini de sağlayacak bir gelişim patikasında elektrik enerjisinin toplam nihai enerji talebindeki payında iki-katın üzerinde artış gerçekleşmesi öngörülmektedir. 2050 yılına kadar olan dönemde nihai enerji tüketiminin en az yarısının elektrik enerjisi formunda gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu çerçevede, elektrolizör kapasitesi için gereken elektrik enerjisi miktarının, brüt elektrik talebinin 2035 yılında %6'sına, 2040 yılında %12'sine ve 2050 yılında yaklaşık %20'sine karşılık gelmesi beklenmektedir (Şekil 4.6). 2053 yılı resmi elektrolizör kurulum hedefinin sağlandığı senaryoda, yeşil hidrojen üretimi, binalar, sanayi ve ulaştırma gibi büyük elektrik talep segmentlerinden birisi konumuna gelmektedir³.

³ 2050 yılında toplam brüt elektrik talebinin %19'una eşdeğer. IEA NZE Senaryosunda 2050 yılı dünya ortalaması %20. (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>)

Elektrik enerjisi girdisini sağlayacak kurulu güç gelişimi, elektrolizör kullanım oranlarının dinamik gelişimine ve yeşil hidrojen üretimine odaklı olarak geliştirilmesi gerekecek yenilenebilir enerji kurulu gücünün, özellikle rüzgar ve güneş üretim birimlerinin, kapasite faktörlerindeki gelişmelere bağlı olarak şekillenecektir. Bu çerçevede, 2030-2035 döneminde 2-5 GW elektrolizör kapasitesini gerçekleştirmek üzere gerekecek ilave kurulu güç ihtiyacı 6-14 GW olarak hesaplanmaktadır. Bu dönemde rüzgar ve güneş ortalama kapasite faktörü %25-30 seviyesinde, elektrolizör kullanım oranları ise yukarıda sunulduğu gibi %70-75 bandında gerçekleşmektedir (%90 kullanım oranı ve %25-30 kapasite faktörü ile %20 daha fazla elektrik kurulu güç gereksinimi).

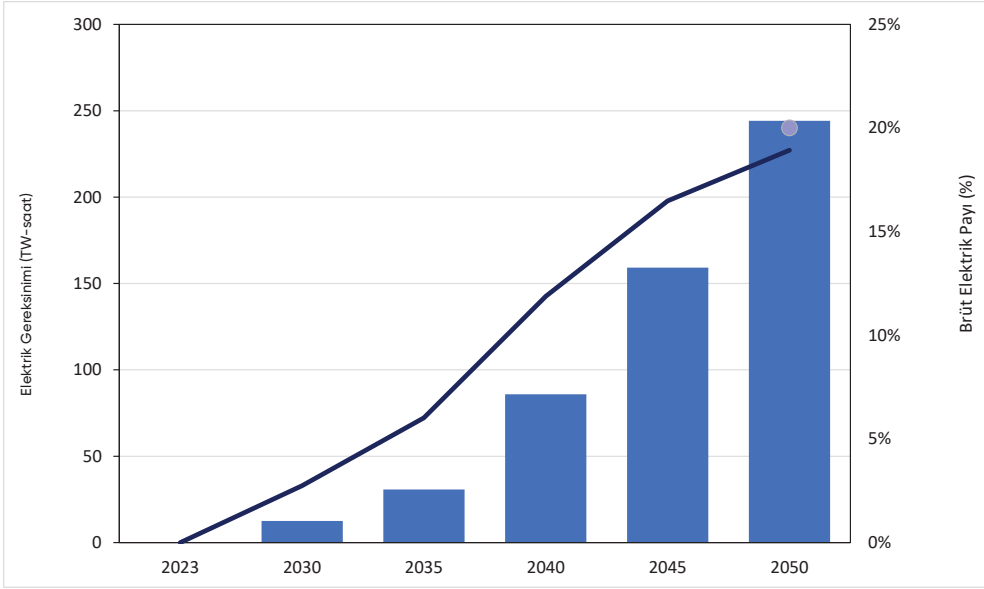
Rüzgar ve güneşte teknolojik gelişmeler, deniz üstü rüzgar kapasiteleri yoluyla sağlanabilecek kapasite faktörü artışları ve elektrolizör kullanım oranlarında tedrici azalım neticesinde elektrolizör kurulu gücü-elektrik kurulu gücü çarpanı 2030-2050 arası dönemde yaklaşık %60 oranında düşmektedir (2030 yılında 3 ve 2050 yılında 1,5-2). 2050 yılında 50 GW elektrolizör kurulumu ve 5,5 Mt yeşil hidrojen üretimi için kurulu güç gereksiniminin 90-100 GW mertebesinde gerçekleşmesi beklenmektedir (%56 kullanım oranı ve %30 kombine elektrik kurulu güç kapasite faktörü ile 93 GW) (Şekil 4.7).

Analizlerde, gelecekte rüzgar ve güneşte elektrik talebinin üzerinde gerçekleşebilecek dönemsel fazla üretimlerin etkisi dikkate alınmamıştır. Kesintili üretimlerin ve talebin gelecekteki dinamiklerine bağlı olarak, bazı dönemlerde muhtemel fazla üretimlerin depolama perspektifi ile birlikte değerlendirilebilmesi durumunda orta ve uzun vadede ilave elektrik kurulu güç ihtiyacı azalabilecektir.

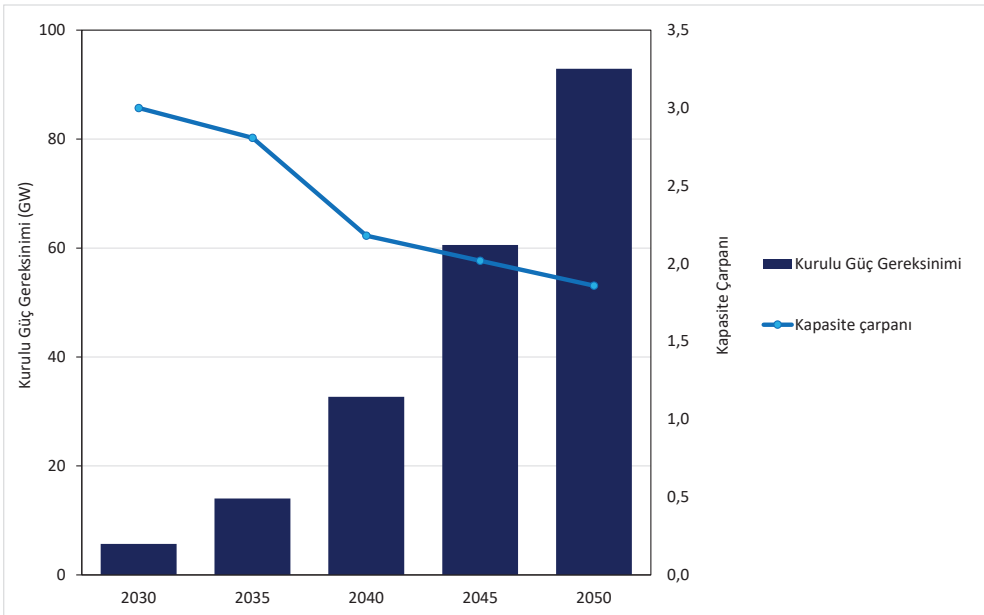
Özellikle 2030-2035 dönemine kadar olan ilk gelişim aşamasında elektrolizör kurulum hedeflerinin, elektrifikasyona ve elektrik arz güvenliğine yönelik stratejiler ve bu kapsamda rüzgar ve güneş kurulu güçlerinde artışa yönelik açıklanan hedefler ile entegre şekilde planlanması gerekmektedir (2035 yılına kadar olan dönemde rüzgar ve güneşte yıllık ortalama 5 GW ve toplam 60 GW kapasite artışı hedefi) (ETKB, 2022) (Şekil 4.8).

Elektrolizör kurulum hedeflerine yönelik gelişmelerde bu somut hedeflerin oldukça belirleyici olacağı değerlendirilmektedir. 2030-2035 sonrası dönemde beklenen hızlı büyüme, elektrik sektörü ile yeşil hidrojen üretimi arasındaki etkileşimin boyutunu da artıracaktır. Dolayısıyla, hidrojen üretim hedeflerinin, elektrik arz ve talep planlaması ile uyumlu şekilde gerçekleştirilmesinin önemi daha fazla pekişecektir.

Şekil 4.6. Elektrik Girdisi Gereksinimi ve Toplam Brüt Elektrik Talebinde Payı (2023 – 2050, TW-saat, %, 2050 Dünya %)



Şekil 4.7. Yenilenebilir Enerji İlave Kurulu Güç Gereksinimi (2023 – 2050, GW)



Elektrik-yoğun yeşil hidrojen üretiminin su-yoğunluğu da yüksek olup, sürdürülebilir üretimi desteklemek üzere deniz suyu öncelikli kullanımın da şimdiden planlanması gerekmektedir. Ekonomik ve iklimsel nedenlerle Türkiye’de yüzeysel ve yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilirliği üzerindeki etkiler hızla artmaktadır. İklim değişikliğine bağlı kuraklık risklerinde ve su talebinde artış nedeniyle su kaynaklarının planlamasında ve yönetimde bütüncül yaklaşımlar daha yaşamsal duruma gelmektedir.

Günümüzde 112 milyar m³’lük yıllık tüketilebilir tatlı su potansiyelinin en az %46’sı kullanılmaktadır. Bu potansiyelin sabit kalması durumunda dahi kullanım oranının ileride %75’in üzerine çıkması beklenmektedir. IICEC analizlerinde, elektroliz için su girdisinde önceliğin deniz suyunun desalinasyonu çözümlerine verilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

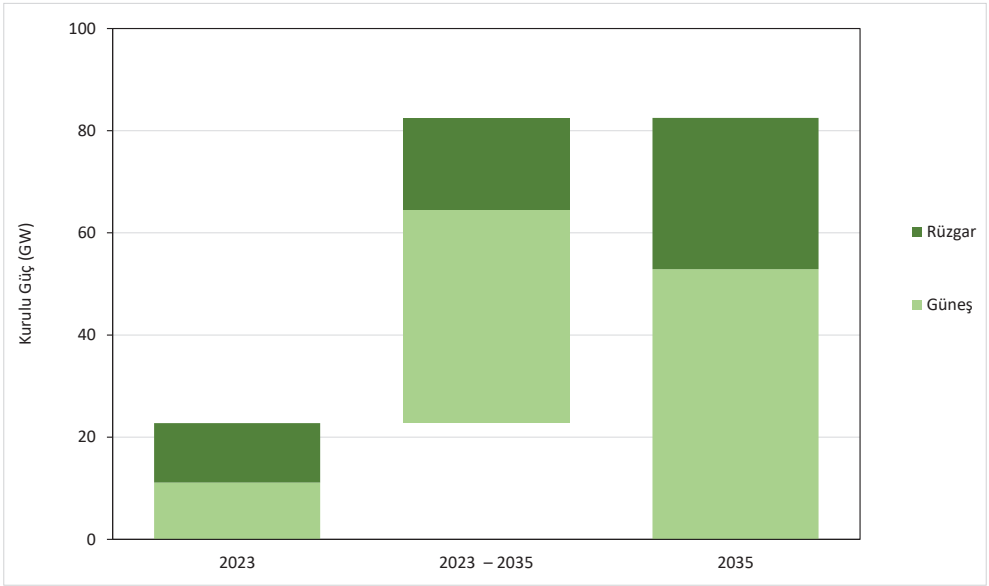
2050 yılına kadar olan dönemde elektrolizör hedeflerini desteklemek üzere toplam su gereksinimi, ağırlıklı bölümü deniz suyu olmak üzere 1,5 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır (Şekil 4.9). Tamamının yer altı suyu olması durumunda kümülatif su tüketimi 0.8 milyar m³’e karşılık gelmektedir. Mevcut yeraltı suyu tüketimi 13.4 milyar m³ seviyesindedir. Dolayısıyla bu miktar mevcut yeraltı suyu tüketiminin %6’sına eşdeğerdir.

Elektrolizör ile üretilen her bir ton hidrojen başına, saflaştırma kayıpları dahil olmak üzere, yaklaşık 15-20 ton su gerekmektedir. Sanayi ölçeğindeki desalinasyon süreçlerinin %50’lik geri kazanım verimi ile çalışacağı varsayımı ile yılda ortalama 50 milyon m³ suyun hidrojen üretmek amacıyla denizden çekileceği hesaplanmaktadır. Bu miktar, günümüzde termik santraller ve sanayi tesislerindeki yıllık soğutma suyu çekiminin %0,5’ine eşittir. Deniz suyu çekiminde elektrolizörlerin neden olacağı artışın, uzun vadede termik santrallerin üretiminin tedricen azalmasıyla oluşacak düşüşün sadece %2’si mertebesinde olması beklenmektedir.

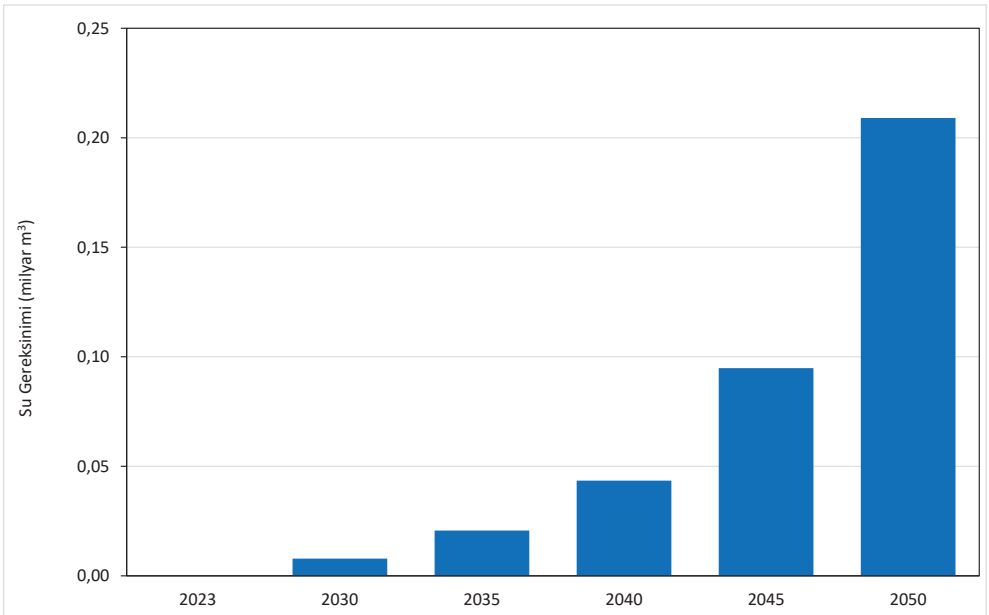
Toplam ihtiyacın 2050 yılında %90’ının desalinasyon yoluyla karşılanabileceği senaryoda, yılda ortalama ilave 6 milyon m³’lük tatlı su kullanımıyla birlikte yeşil hidrojen üretimi için toplam su gereksiniminin yılda ortalama 56 milyon m³ olacağı öngörülmektedir.

Hidrojen üretiminde desalinasyona ağırlık verilmesi, Türkiye’de tatlı su çekimi üzerindeki ilave etkinin %0,01 ile sınırlı tutulmasını sağlayabilecektir. Desalinasyon tesislerinin planlamasının ve neden olacağı ilave elektrik tüketiminin de bütüncül enerji sistemi içerisinde ayrıca irdelenmesi önem taşımaktadır. Talebin gelecekte dağıtık bir nitelik kazanması durumunda, su kullanım planlamasının hidrojen altyapı planları ile entegrasyonu da kritik olacaktır.

Şekil 4.8. TUEP Güneş ve Rüzgar Kurulu Güç Gelişim Perspektifi (2023 – 2035, GW)



Şekil 4.9. Su Gereksinimi (2023 – 2050, milyar m³/yıl)



Üretim maliyetlerine ilişkin dinamiklerin ve üretimin ekonomisinin geleneksel alternatiflere göre rekabetçiliğinin gelişimi, yeşil hidrojenle üretimin ve ekosistemin genelinde büyümenin geleceği bakımından en kritik faktör olacaktır. IICEC analizlerinde hidrojen üretim maliyetlerini belirleyen faktörler ve bunlara ilişkin muhtemel değişimler detaylı olarak irdelenmiştir. Günümüzde tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de yeşil hidrojen üretim maliyeti oldukça yüksektir. Elektrik girdisinin şebekeden veya elektrik piyasasındaki fiyatları yansıtan maliyetlerden sağlanması durumunda 2023 yılında ortalama yeşil hidrojen üretim maliyeti⁴ 8,5-9,0 ABD\$/kg seviyesindedir. IICEC analizleri ABD\$ bazında %8 ağırlıklı ortalama sermaye maliyetini⁵ baz almaktadır. Sermaye maliyetinin %10-15 bandına çıkması durumunda üretim maliyeti 9,0-9,5 ABD\$/kg seviyesine yükselmektedir. Hidrojen üretimine özel rüzgar veya güneş üretim birimlerinden rekabetçi maliyetli elektrik girdisi varsayımlarında analizler 5,5-6,5 ABD\$/kg maliyete işaret etmektedir.

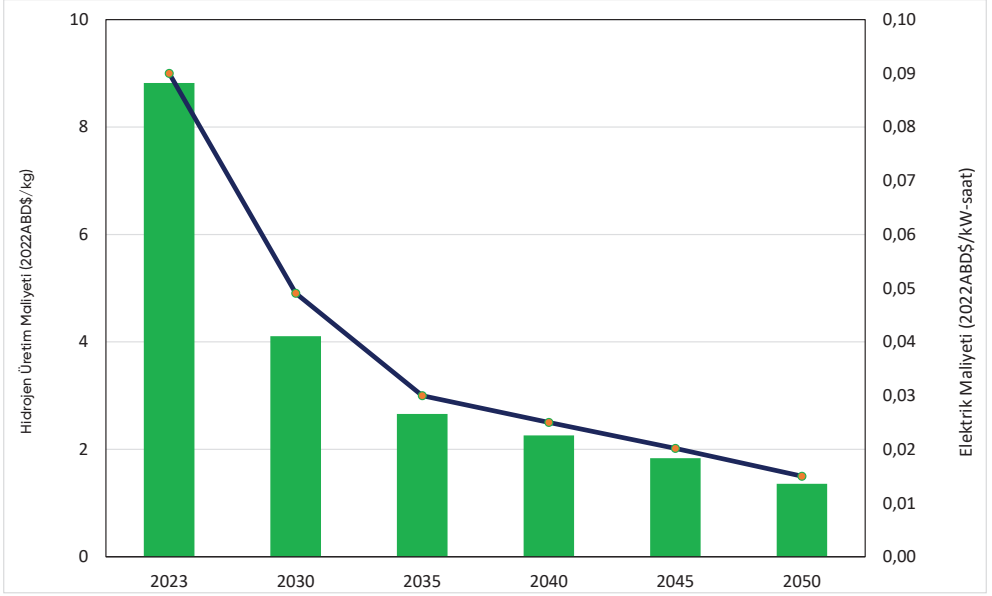
Bölüm 2’de sunulan elektrolizör teknoloji gelişim fırsatları çerçevesinde, maliyet eğrisinde özellikle 2035 yılına kadar olan dönemde öngörülen hızlı gelişimin yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin düşürülmesinde önemli etkisi olacağı görülmektedir. Bununla birlikte, Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki maliyet hedeflerinin (2035 yılında 2,4 ABD\$/kg ve 2053 yılında 1,2 ABD\$/kg) sağlanabilmesi, elektrolizör maliyetlerinde ve teknik performansında küresel ölçekte öngörülen hızlı iyileşmelerin yanı sıra elektrik girdi maliyetlerinde de önemli düşüşler sağlanabilmesini gerektirmektedir. Resmi hedeflere yakınsayan yeşil hidrojen üretim maliyeti gelişiminin elektrik girdi maliyetleri ile ilişkisi Şekil 4.10’da sunulmaktadır.

2030 yılında hidrojen üretim maliyeti, elektrik girdi maliyetlerinin 35-50 ABD\$/MW-saat bandında olması durumunda 3-4 ABD\$/kg seviyelerinde gerçekleşmektedir. 2035 yılı maliyet hedefi, yaklaşık 25 ABD\$/MW-saat seviyesinin altında elektrik girdisi ile sağlanabilmektedir. 30-35 ABD\$/MW-saat maliyet seviyelerinde ise 2035 yılı üretim maliyetinin 2,5-3 ABD\$/kg bandında gerçekleşebileceği görülmektedir (Şekil 4.11). Yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin gelecekte 2 ABD\$/kg düzeyinin altına düşmesi ise 15-20 ABD\$/MW-saat seviyesinde elektrik girdi maliyetleriyle sağlanabilecektir. Elektrolizör teknolojik gelişim eğrisi çerçevesinde irdelendiğinde bunun 2035-2040 döneminden sonra gerçekleşebileceği öngörülmektedir. Üretimde 2053 yılında 1,2 ABD\$/kg maliyet hedeflerini sağlayacak yönde gelişim için 2050-2053 döneminde elektrik maliyetinin 10-15 ABD\$/MW-saat seviyelerine düşmesi gerekmektedir. 2050 yılına doğru rüzgar ve güneş teknolojilerinde yüksek gelişim ve hızlı kapasite artışı ile desteklenen bir büyüme, elektrik üretim maliyetinde düşüşler sağlayarak bu iddialı hedefi kısmen destekleyebilecektir. Sermaye maliyetinin %10-15 bandında olması durumunda ise 2050-2053 döneminde 1,2-1,4 ABD\$/kg üretim maliyetleri için daha düşük elektrik maliyetleri gerekecektir. 2053 hedefine yönelik bir hızda maliyet azalımı patikası, uzun dönemde elektrik arz ve talep dinamiklerinde elektrik talebinin üzerinde üretim fazlası dönemlerinin gelişmesi durumunda daha muhtemel duruma gelebilecektir.

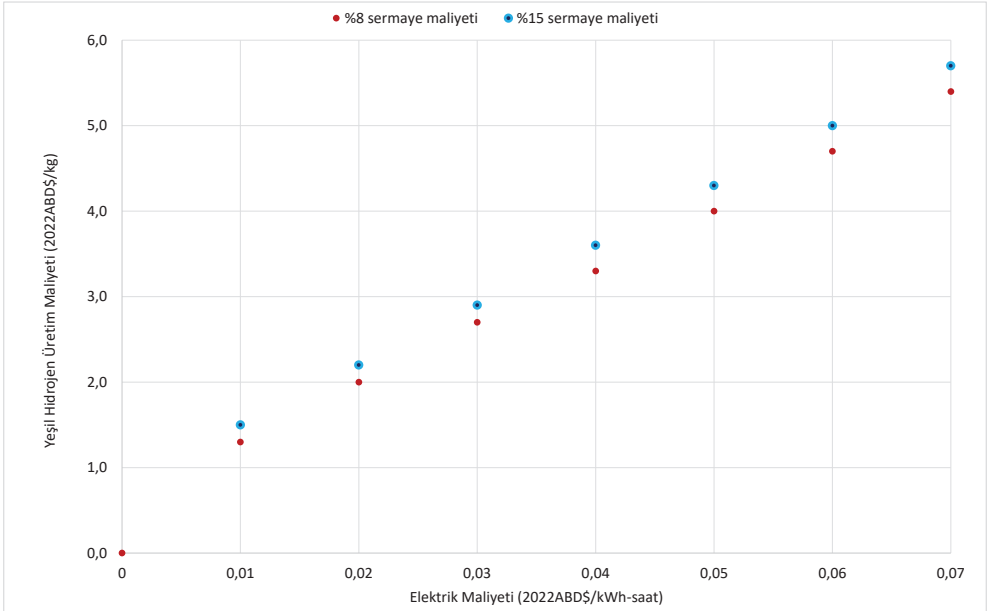
⁴ LCOH (Levelized Cost of Hydrogen). Bu çalışmanın genelinde hidrojen üretim maliyetleri seviyelendirilmiş üretim maliyetlerini ifade etmektedir

⁵ WACC

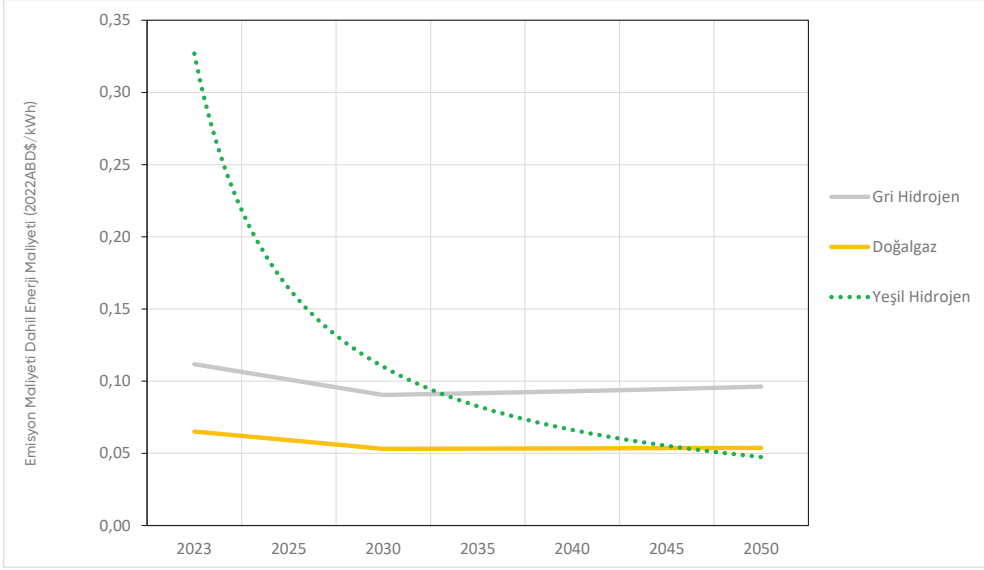
Şekil 4.10. Yeşil Hidrojen Üretim Maliyeti ve Elektrik Girdi Maliyeti İlişkisi (2023 – 2050, 2022ABD\$/kg, 2022ABD\$/kW-saat)



Şekil 4.11. Farklı Elektrik ve Sermaye Maliyetlerinde Yeşil Hidrojen Üretim Maliyet Perspektifi (2023, 2022ABD\$/kW-saat ve 2022ABD\$/kg)



Şekil 4.12. Yeşil Hidrojen Üretim Maliyetinin Rekabetçiliğinin Gelişimi (2023-2050, 2022ABD\$/kW-saat⁶)



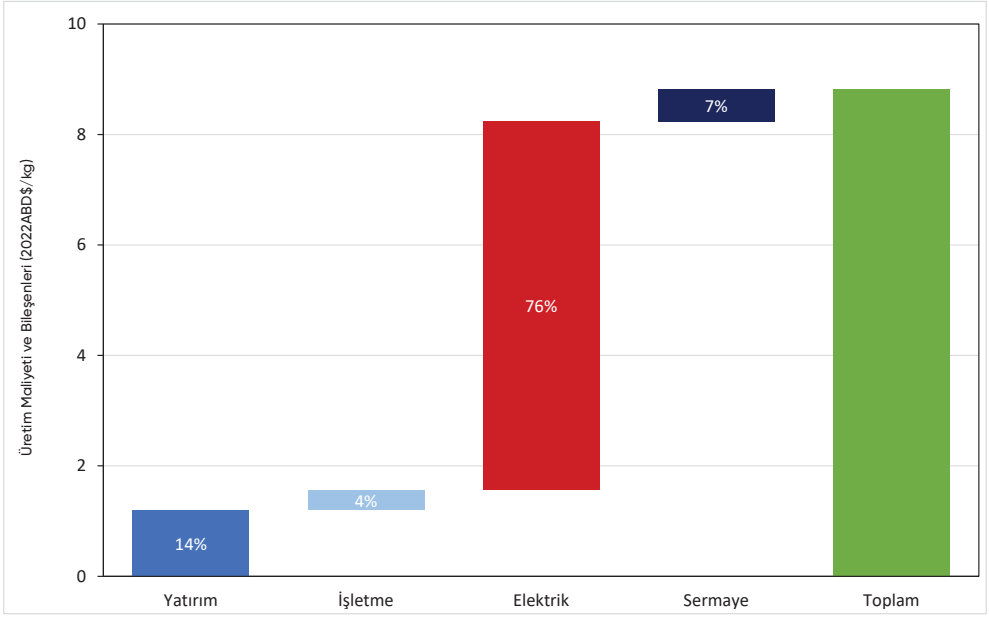
IICEC analizlerinde yeşil hidrojen üretim ekonomisi, gri hidrojen ve doğal gaz ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Mevcut koşullarda yeşil hidrojen, enerji eşdeğeri cinsinden doğal gaza göre beş ila altı kat daha pahalıdır⁷. Yeşil hidrojen maliyeti, gri hidrojenin ise iki-üç katı civarındadır. Emisyon maliyetleri eklendiğinde maliyet farkları kısmen azalmakla birlikte yeşil hidrojen yatırımlarını piyasa şartlarında rekabetçi kılabilecek seviyenin halen oldukça uzağında kalmaktadır (Yeşil hidrojen 0,25-0,30 ABD\$/kW-saat, doğal gaz 0,07 ABD\$/kW-saat).

Elektrolizör teknolojilerinde gelişimin elektrik maliyetlerinde düşüşlerle desteklenmesi durumunda yeşil hidrojen 2030-2035 döneminde gri hidrojen ile enerji cinsinden aynı maliyet seviyesine ulaşmaktadır. Doğal gaz fiyatlarının mevcut seviyelere göre belirgin şekilde değişmemesi durumunda, yeşil hidrojenim doğal gaz ile rekabet edebilir seviyeye gelmesi 2040-2045 döneminde gerçekleşmektedir. Karbon maliyetlerinde daha hızlı yükseliş veya fosil yakıt fiyatlarının gelecekte daha yüksek seyretmesi durumunda rekabetçilik daha erken gerçekleşebilecektir (Şekil 4.12). Bulgular, dünyadaki ve bölgedeki maliyet ve fiyat dinamikleriyle benzerlik göstermektedir. Karbon maliyetleri, yeşil hidrojeni maliyet bazında rekabetçi seviyeye taşımakta tek başına yeterli olmamaktadır. Bu çerçevede, yeşil hidrojenin ilk gelişim aşamalarında üretim tarafında maliyetleri düşüren ve talep sektörlerinde kullanımı teşvik eden mekanizmaların geliştirilmesi ihtiyacı tespit edilmektedir.

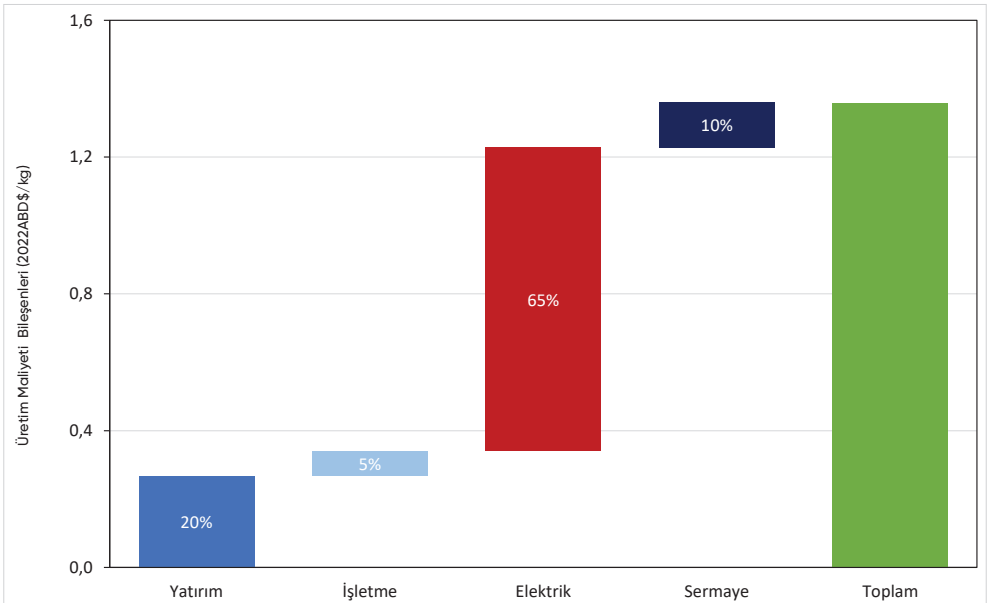
⁶ IEA STEPS Senaryosu fosil yakıt ve karbon serileriyle ve 2040 yılından önce elektrik fiyatının 30 ABD\$/MW-saat'in altına düşmemesi durumunda.

⁷Hidrojenin birim hacminin enerji içeriği doğal gazın %27'si seviyesindedir.

Şekil 4.13. Yeşil Hidrojen Üretim Maliyeti ve Bileşenleri (2023, 2022ABD\$/kg)



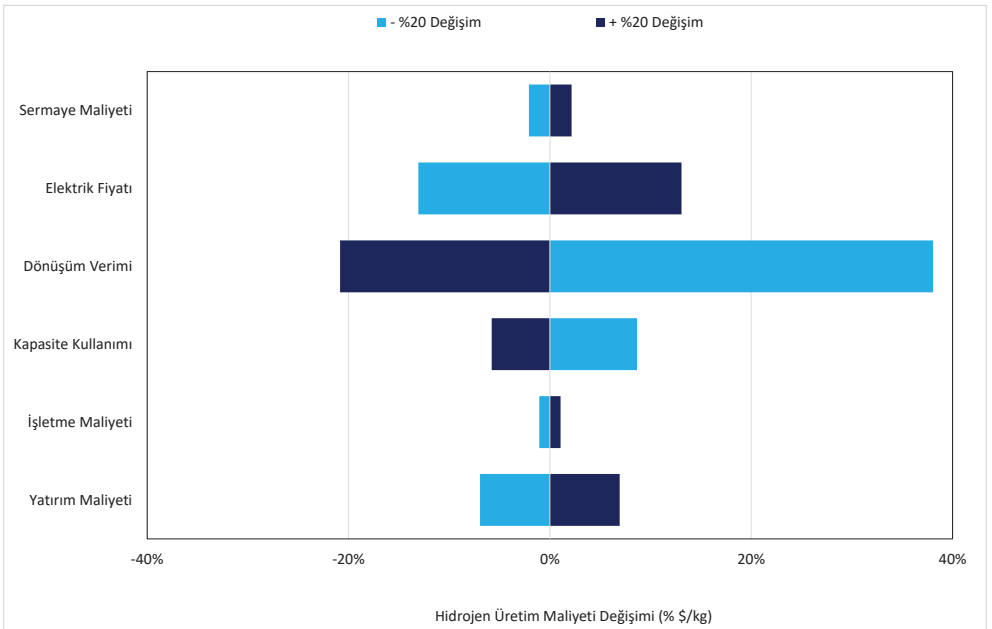
Şekil 4.14. Yeşil Hidrojen Üretim Maliyeti ve Bileşenleri (2050, 2022ABD\$/kg)



Yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin gelecek analizlerinde, maliyet bileşenlerinin zaman içerisinde değişim dinamikleri de irdelenmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, elektrik üretim maliyetleri hidrojen üretim maliyetlerinin en ağırlıklı bileşenini oluşturmaktadır. Önümüzdeki dönemde elektrik girdi maliyetlerinde öngörülen düşüşün bir yansıması olarak toplam üretim maliyeti içerisinde elektriğin payı kısmen azalmaktadır (2023 yılında yaklaşık dörtte-üç ve 2050 yılında yaklaşık üçte-iki). 2050 yılında ilk yatırım ve sermaye maliyeti bileşenlerinin ise toplam maliyetin %30'unu oluşturması beklenmektedir (2023 yılında yaklaşık %20). İşletim giderlerinin payının ise %2-3 seviyesinde olması öngörülmektedir (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).

Çalışmada üretim ekonomisi bakımından elektrik maliyetlerine ek olarak diğer kritik parametrelerdeki belirsizlikler de dikkate alınarak çeşitli hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek kullanım oranları ve verimlilikte iyileşme, hidrojen üretiminin ekonomisini güçlendirmektedir. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, 2050 yılı için yapılan analizlerde verimlilik performansının öngörülenden %20 daha yüksek veya düşük gerçekleşmesi durumunda üretim maliyetleri büyük oranda değişmektedir (Sırasıyla %21 düşüş ve %38 artış). Ortalama kullanım oranının beklenen %56 seviyesinden %20 daha yüksek veya düşük gerçekleşmesi durumunda ise üretim maliyetlerinde değişim -%6 ila +%9 olarak gerçekleşmektedir. Elektrik üretim maliyetlerinde \pm %20 sapma durumunda üretim maliyeti \pm %13 değişmektedir (Yakın ve orta vadede daha yüksek değişim).

Şekil 4.15. Yeşil Hidrojen Üretim Maliyeti Hassasiyet Analizi (2050)



4.2.2. Yeşil Hidrojen Talebi Geleceği

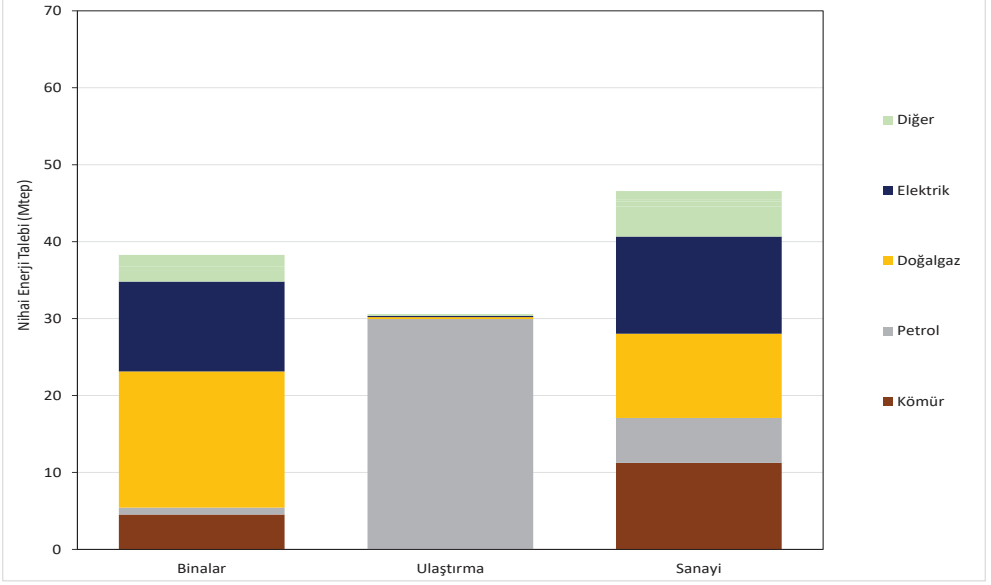
Yeşil hidrojenin gelecekte sanayi, ulaşım ve diğer sektörlerdeki gelişimi özellikle iklim değişikliği ile mücadele, küresel net-sıfır hedefleri ve karbon yoğunluğunun azaltılmasına yönelik enerji dönüşümünün hızı ile yakından ilişkili olacaktır. Türkiye'de yeşil hidrojen gelişiminin önemli itici faktörlerinden birini AB ile ticari ilişkiler ve AB'deki gelişmeler çerçevesinde SKDM, temiz enerji odaklı diğer hedefler ve uygulamalar oluşturacaktır.

Üretim ekonomisinin ve yeşil hidrojen kullanımının alternatiflere göre rekabetçiliğinin gelişim hızı ve maliyet farkını düşürmeye yönelik potansiyel mekanizmaların hayata geçirilmesi, talebin sektörlerde yayılım hızını da belirleyecektir. Elektrolizör kurulum hedeflerini ve üretim perspektifi yansıtan IICEC analizlerinde, yeşil hidrojen talebinde büyümenin özellikle 2030-2035 döneminde hızlanmaya başlaması, 2050-2053 dönemine doğru ise üretimde büyüme, ilgili teknolojilerde ilerlemeler, maliyet düşüşleri, yerleşmede ve ölçeklenmede gelişimle birlikte güçlenmesi öngörülmektedir.

Bölüm 3'te sunulduğu gibi, sanayi, ulaştırma ve binalar, Türkiye'nin nihai enerji talebinin ve enerjiden kaynaklı sera-gazı emisyon envanterinin çok büyük bölümünü oluşturmaktadır (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17). Elektrifikasyon yoluyla karbondan arındırılması zor sektörler, nihai enerji talebinin yaklaşık %30'una ve enerjiden kaynaklı sera-gazı emisyon envanterinin yaklaşık %20'sine karşılık gelmektedir (Şekil 4.18). Emisyon envanterinin %12'sini çelik, cam, seramik, çimento gibi karbondan arındırılması zor sanayi sektörleri oluşturmaktadır. Uzun mesafe karayolu ulaşımı başta olmak üzere ulaştırma alanları ise emisyonlarda %10'a kadar ulaşan paya sahiptir. Bu sektörlerde temiz elektrifikasyon ve diğer düşük-karbonlu çözümler yoluyla fosil yakıt ağırlığının düşürülebilmesi, net-sıfır emisyon hedeflerini destekleyen bir gelişim patikasının en önemli bileşenlerinden birisi durumundadır.

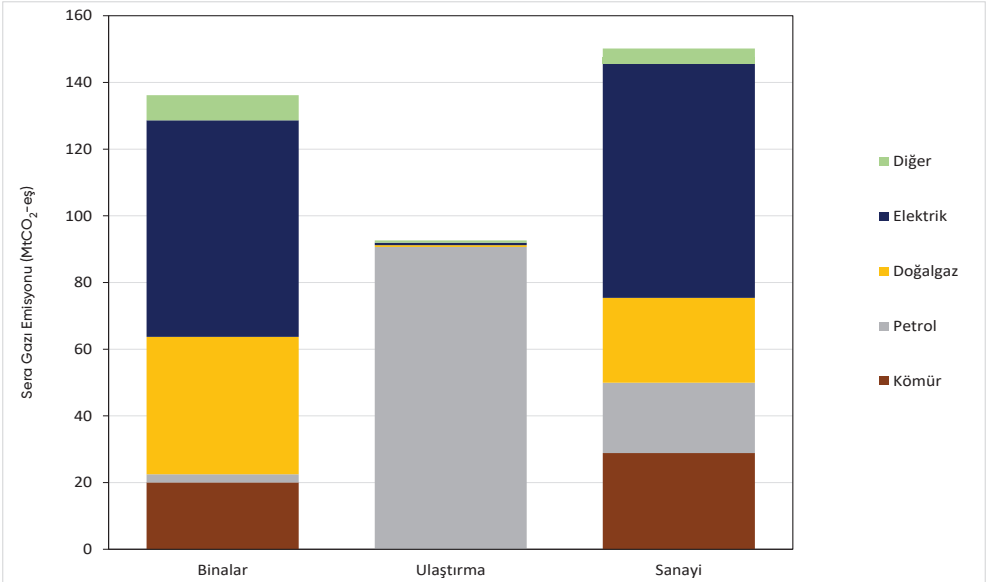
2023 yılı enerji fiyatlarıyla, karbondan arındırılması zor sektörlerin enerji ithalatı 15-20 milyar 2022ABD\$ seviyesindedir. Enerji arzında çeşitlendirmenin artırılmasına, enerji güvenliğinin güçlendirilmesine ve enerji ithalat faturasının azaltılmasına yönelik stratejiler çerçevesinde, enerji sisteminin genelinde ve özellikle nihai enerji tüketiminde ithal fosil yakıt yükünün azaltılmasına ilişkili ilerlemeler kritik rol oynayacaktır.

Şekil 4.16. Nihai Enerji Talebinin Kaynaklara Göre Sektörel Kırılımı (2021, Mtep)



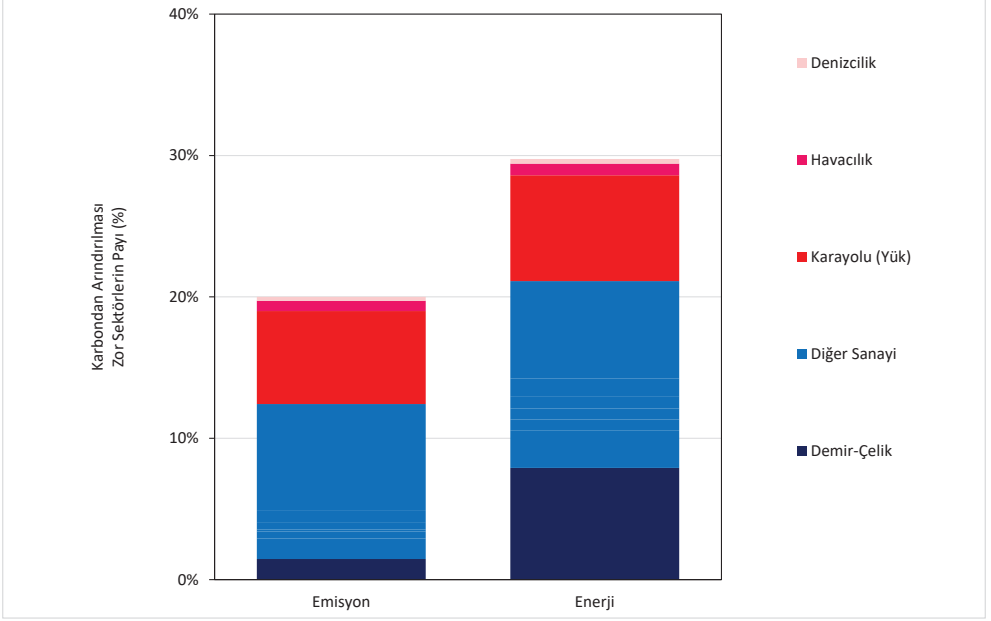
Kaynak: ETKB

Şekil 4.17. Nihai Enerji Tüketim Sektörlerinde Enerjiden Kaynaklı Sera Gazı Emisyon Envanterinin Kırılımı (2021, MtCO₂-eş)



Kaynak: ÇŞİDB, TÜİK

Şekil 4.18. Karbondan Arındırılması Zor Sektörler & Nihai Enerji Talebi ve Sera Gazı Emisyon Envanterinde Payları (%)



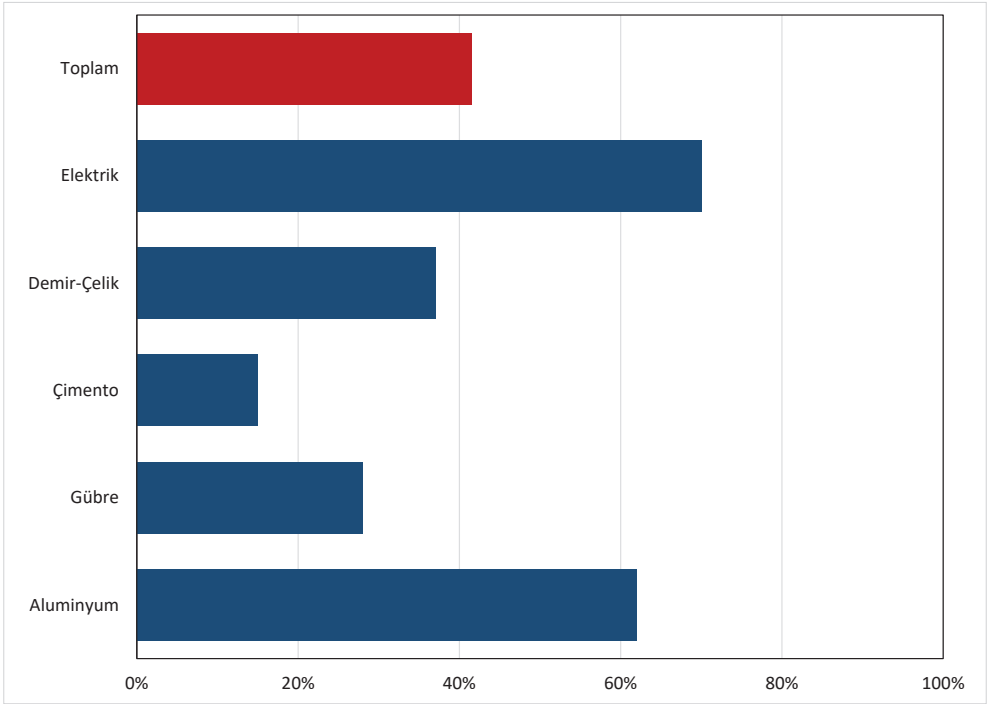
IICEC modelleme çerçevesinde, yeşil hidrojenin karbondan arındırılması zor sanayi ve ulaştırma sektörlerinde gelişim perspektifi alt sektörler bazında analiz edilmiştir. Hidrojenin doğal gaz şebekesine karıştırılmasına yönelik gelecek hedefleri içerisinde binalarda kullanımın potansiyel gelişimi irdelenmiş, elektrik sektöründe kullanım fırsatlarına yönelik çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir.

Son dönemde dünya genelinde temiz enerji dönüşümüne yönelik hedefler, AB özelinde işleyiş kazanan SKDM ve karbon fiyatlandırmasına ilişkin gelişmeler çerçevesinde, Türkiye endüstrisinin rekabetçiliğinin sürdürülebilirliği bakımından kritik bir döneme girilmiştir. SKDM ilk fazı faaliyete geçmiş olup, AB tarafından ithal edilen demir-çelik, çimento, alüminyum, gübre, elektrik ve hidrojene karbon fiyatlandırması üzerinden vergi uygulanacaktır. 1 Ekim 2023'te başlayan geçiş döneminde sadece veri raporlamak ile sorumlu olan ihracatçılar, 1 Ocak 2026'dan itibaren vergi ödeme aşamasına geçecektir. AB, bu uygulamayla karbon maliyeti kaçaklarını önlemeyi hedeflediğini belirtmektedir (European Commission, 2023).

2022 yılında Türkiye AB'ye 103,1 milyar ABD\$ ihracat gerçekleştirmiştir (2022 yılında AB'nin toplam ihracatında %4 pay). AB, Türkiye'nin bölgelere göre ihracatı içerisinde %41 pay ile ilk sırada yer almaktadır (TİM, 2023). 2022 yılında SKDM ürünlerinde AB'ye toplam ihracat 13,4 milyar ABD\$ olarak gerçekleşmiştir. Bu kapsamdaki ürünlerde AB'ye ihracat toplam ihracatın %42'sini oluşturmaktadır (TB, 2023a).

Bölüm 2’de sunulduğu gibi, AB tarafından temiz enerji ve iklim-odaklı yeni büyüme ve sanayi stratejisi kapsamında geliştirilen yeni açılımların tamamı, sanayi sektörlerinin ihracatının sürdürülebilirliği ve ticaret performansının gelişiminde önemli rol oynayacaktır. 2022 yılında toplam 22,1 milyar ABD\$ ihracatının %37’sini AB’ye gerçekleştiren demir-çelik sektörü (8,1 milyar ABD\$), Türkiye’nin ilk aşamada SKDM’den en çok etkileneceği alanların başında gelecektir (Şekil 4.19) (TB, 2023a; TB, 2023b). Önümüzdeki dönemde SKDM kapsamının fosil yakıt yoğunluğu yüksek diğer alanlara genişlemesi durumunda enerji sektöründe ve enerji tüketicisi sektörlerde karbon yoğunluğunu azaltmaya yönelik stratejiler, yatırımlar ve teknolojiler daha kritik konuma gelecektir.

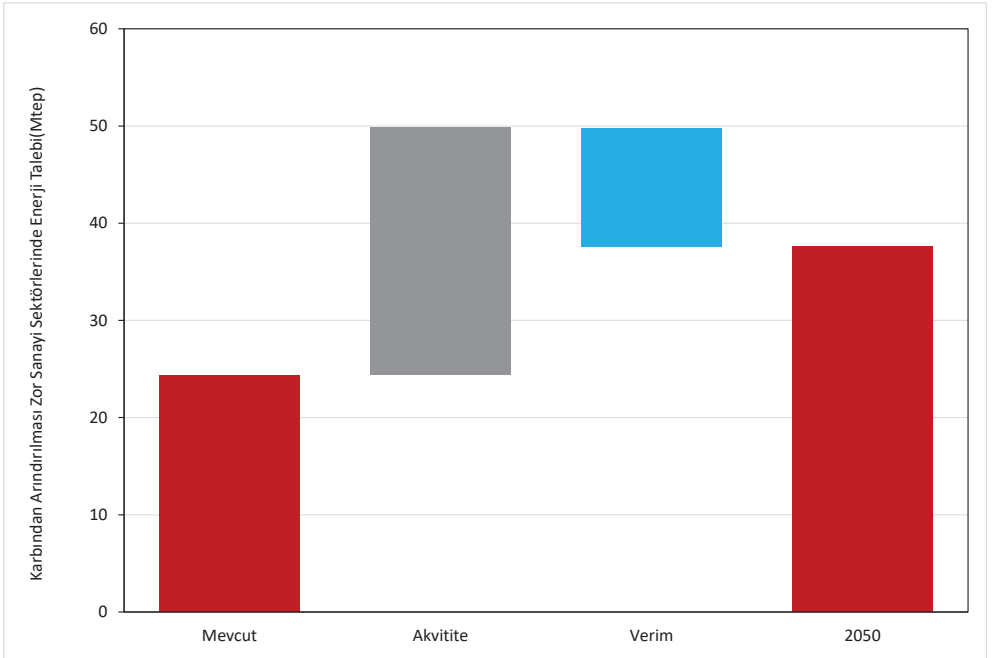
Şekil 4.19. SKDM Kapsamındaki Sektörlerin İhracat Tutarında AB Payı (%)



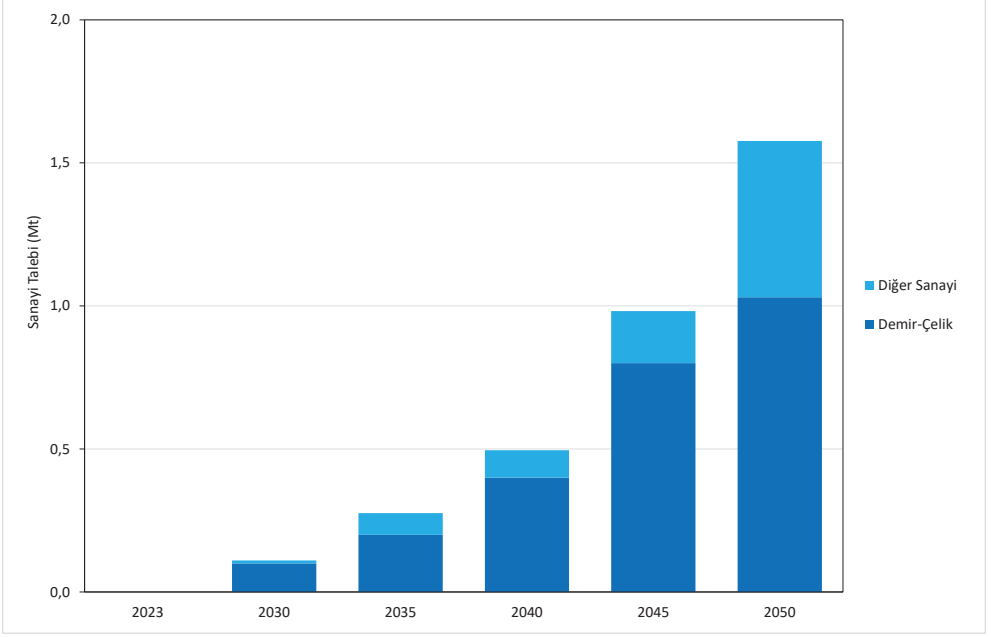
IICEC analizlerinde karbondan arındırılması zor sanayi sektörlerinin enerji talebinin gelişimi detaylı olarak analiz edilmiştir. Sanayi sektörlerinde büyüme ve ihracat hedeflerini ve enerji verimliliği potansiyelini yansıtan bu analizlerde 2050 yılına kadar olan dönemde talebin 38 Mtep’e ulaşması beklenmektedir (2023 yılında yaklaşık 25 Mtep). Üretim aktivitesindeki artışın etkisiyle talepteki büyüme hızı, enerji verimliliğinde iyileşmeler ile kısmen düşmektedir (Şekil 4.20). Sektörlere göre değişmekle birlikte, enerji talebinde yıllık ortalama %1 düşüşün enerji verimliliğine yönelik iyileştirmelerle sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

Sanayi sektörlerinde önümüzdeki dönemde anlamlı bir yapısal dönüşümün gerçekleşmesi, böylelikle toplam enerji yoğunluğunun tedricen azalması durumunda talep artış hızı yavaşlayabilecektir. Enerji verimliliğine ek olarak, sanayide enerji kullanımının geleceğinde elektrifikasyonda yaygınlaşmayı, uygun sektörlerde ve uygulamada doğrudan yenilenebilir enerji kullanımında artışı ve gelecekte bazı alanlarda ileri karbon teknolojilerinde gelişebilecek fırsatları yansıtan analizlerde nihai enerji tüketicisi sanayi sektörlerinde yeşil hidrojen talebi 2035 yılında 0,3 Mt ve 2050 yılında yaklaşık 1,5 Mt olarak gerçekleşmektedir. Çelik sektörünün, enerji talebinin büyüklüğü, kapasite artış potansiyeli, ihracat hedefleri ve AB ile ticarete gelişen dinamikler çerçevesinde talep gelişiminin ağırlıklı bileşenini oluşturması beklenmektedir. Çelik sektörünün, 2050 yılında toplam sanayi talebinin üçte-ikisine karşılık gelmesi öngörülmektedir. Sektörün yakıt, cevher ve hurda kaynaklarının her türlü karbon maliyetini düşürecek şekilde uzun vadeli olarak planlanması yoluyla üretimde ve ihracatta sürdürülebilir rekabetçiliğin temin edilmesi kritiktir. Cam, seramik, kimya ve çimento gibi fosil-yakıt yoğunluğu yüksek sektörlerin de özellikle SKDM kapsamındaki gelişmeler ve temiz enerji dönüşümünde gelecek perspektifi çerçevesinde yeşil hidrojen talebinin geleceğinde önemli paya sahip olacağı görülmektedir (2035 yılında 0,1 Mt ve 2050 yılında 0,5 Mt) (Şekil 4.21).

Şekil 4.20. Karbondan Arındırılması Zor Sanayi Sektörlerinde Enerji Talebi Gelişim Perspektifi (2023-2050, Mtep)



Şekil 4.21. Nihai Enerji Tüketici Sanayi Sektörlerinde Yeşil Hidrojen Talebinin Gelişimi (2023-2050, Mt)

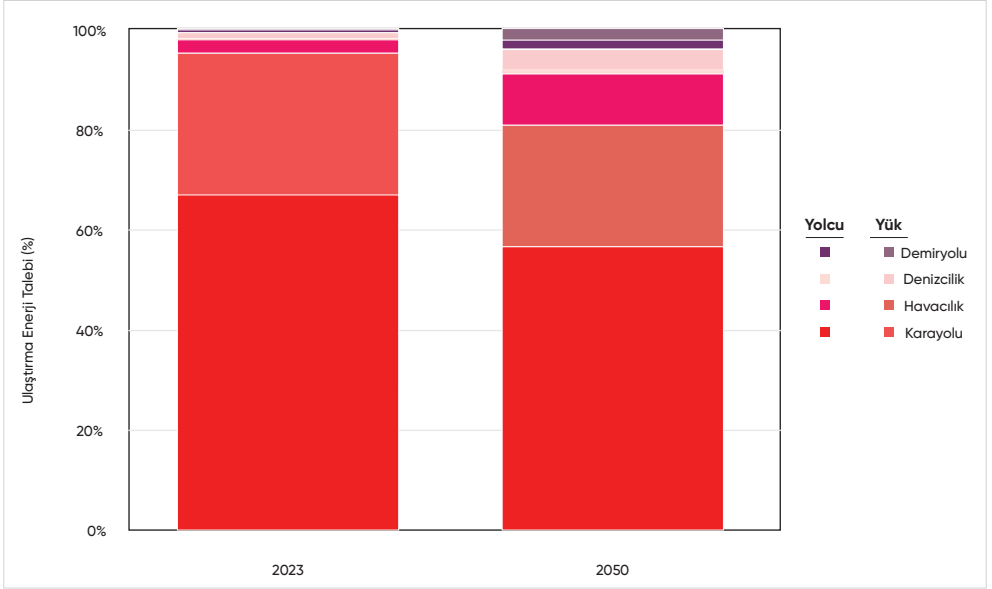


Bölüm 3'te sunulduğu gibi, Türkiye kentleşme, mobilite ve ekonomik aktivitede artış gibi faktörlerin etkisiyle ulaşımda hızlı büyüme dinamiklerine sahiptir. Daha güvenli ve verimli enerji geleceği hedeflerini yansıtan IICEC analizlerinde ulaştırma enerji talebi, yolcu ve yük aktivitesi bazında ve enerji kullanım türlerine göre analiz edilmiştir.

IICEC analizlerinde modlar arası geçişlerin hızlanması ve yakıt ekonomisinde iyileşmeler sonucunda karayolunun ulaştırma enerji talebinde halen %90'un üzerinde olan payı 2050 yılına kadar olan dönemde kısmen azalmaktadır (2050 yılında %80). Modlar arası geçişlerin daha yüksek bir hızda gerçekleşmesi durumunda karayolunun payı daha da düşebilecektir. Havayolu aktivitesinde büyüme dinamikleri çerçevesinde havacılık sektöründe enerji talebi hızlı artış göstermektedir (Ulaştırma enerji talebi içerisinde 2023 yılında %3 ve 2050 yılında %10 pay). Enerji verimliliği yüksek yük taşımacılığına yönelimde artış neticesinde denizcilik ve demiryollarının ulaşım enerji talebinde payı ise sırasıyla %6 ve %4'e yükselmektedir (2023 yılında toplam %3) (Şekil 4.22).

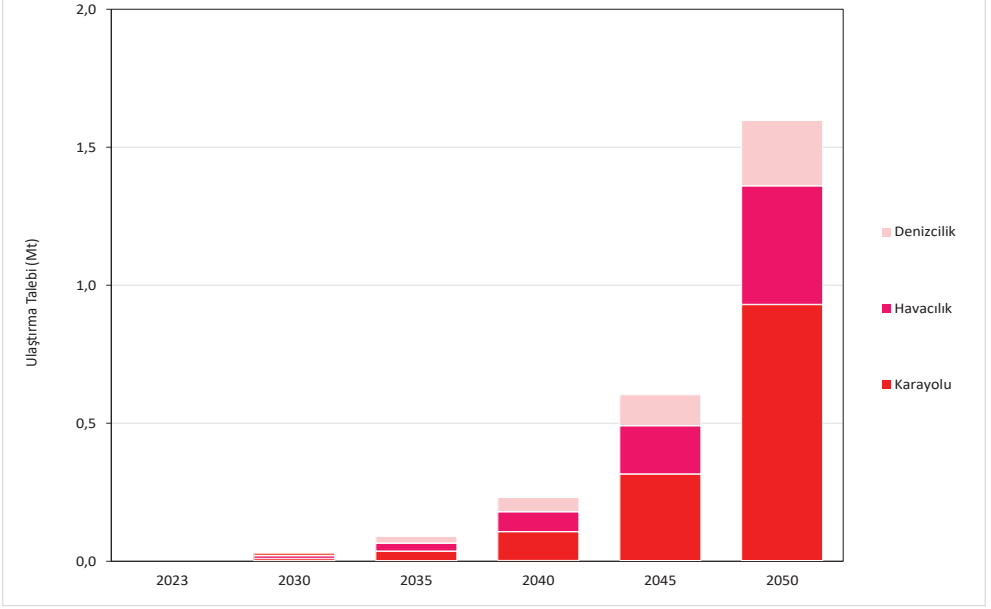
Ulaşımın geleceğinde en hızlı büyüme elektrifikasyonda gerçekleşecektir. Elektrikli araçlarda ve e-mobilite ekosisteminin genelinde son dönemdeki gelişmeler de bu yönelimi desteklemektedir⁸. IICEC analizlerinde hafif karayolu taşımacılığında elektrikli araçlar, dünyadaki genel yönelimlere ve beklentilere paralel şekilde ana teknoloji çözümü olarak gelişmektedir. Karayolu yük taşımacılığında ve uzun mesafe yolcu taşımacılığında hidrojenin önemli bir seçenek konumuna gelmesiyle, talebin özellikle 2030 sonrası dönemde hızlanarak 2050 yılında 1 Mt'a ulaşması beklenmektedir. Karayolunun ulaşım modları içerisinde mevcut payını koruması durumunda talep daha yüksek seviyelere çıkabilecektir. IICEC analizleri, lojistikte ve AB ile entegrasyonda gelişim ve temiz enerji hedeflerinde yaygınlaşma ile birlikte havacılık ve denizcilik sektörlerinin de geleceğin yeşil hidrojen talebinin önemli bileşenlerini oluşturacağına işaret etmektedir (2050 yılında sırasıyla 0,4 Mt ve 0,2 Mt). 2050 yılında ulaştırmada 1,6 Mt yeşil hidrojen talebinin %58'i karayolu ulaşımında, %27'si havacılıkta ve %15'i denizcilikte gerçekleşmektedir (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24).

Şekil 4.22. Ulaştırma Enerji Talebinin Ulaşım Modlarına Göre Kırılımı (2023, 2050, %)

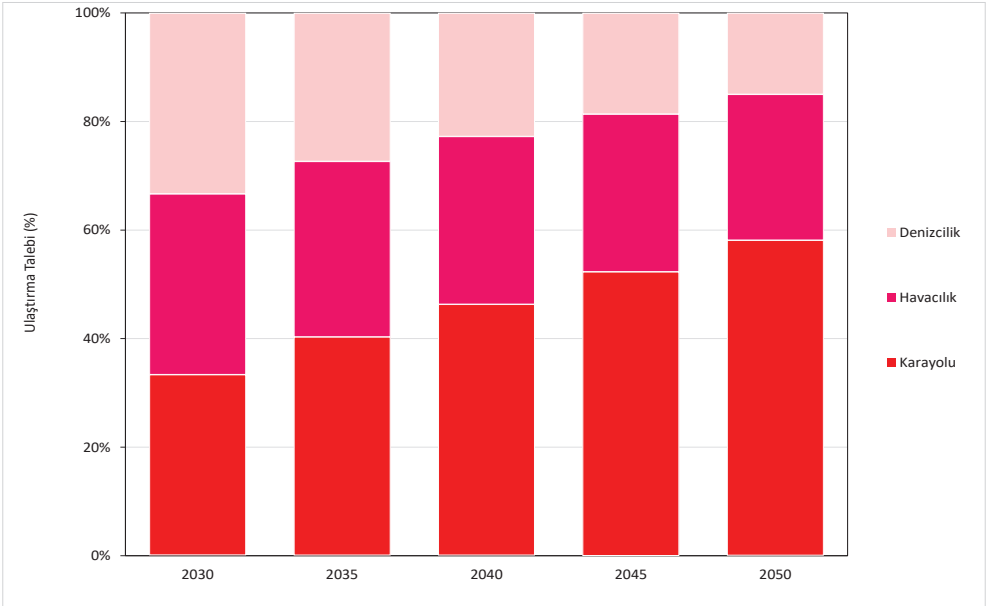


⁸ Detaylı bilgi için <https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/tevo>

Şekil 4.23. Ulaştırma Yeşil Hidrojen Talebinin Gelişimi (2023-2050, Mt)



Şekil 4.24. Ulaştırma Yeşil Hidrojen Talebinin Gelişimi (2023-2050, %)



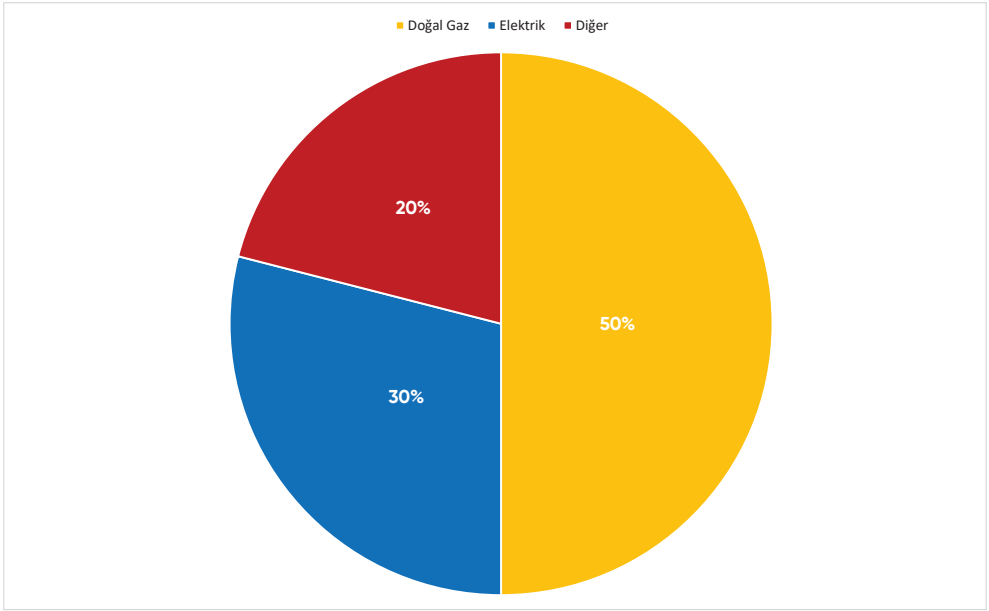
Rafineri ve petrokimya sektörleri, gübre sektörü ile birlikte Türkiye'nin mevcut hidrojen tüketiminin ağırlıklı bileşenlerini oluşturmaktadır. Günümüzde 0,5-0,6 Mt/yıl seviyesinde olan gri hidrojen talebinin yarısından fazlası rafinerilerde ve petrokimyada gerçekleşmektedir. Bu sektörlerde yeşil hidrojene dönüşümün hızı talep büyümesi dinamiklerinde oldukça belirleyici olacaktır.

Enerji sektörünün genelinde karbon azaltımına yönelik hedefler ve stratejiler içerisinde önümüzdeki dönemde enerji talebi içerisinde petrol ürünlerinin payında önemli bir azalma beklenmektedir. Bu yönde gelişmeler rafinerilerde hidrojen talebini uzun vadede azaltıcı yönde etki yapabilecektir. Bununla birlikte karayolu, denizcilik ve havacılıkta düşük emisyonlu yakıtlara olan yönelimin artması ve yeşil hidrojen talebinde büyüme ve lojistikte yeni uygulamaların gelişimi neticesinde birlikte rafinerilerin ekosistemin gelişiminin kritik bileşenlerinden birini oluşturmaya devam etmesi beklenmektedir. Petrokimyada ithalatı azaltmaya ve büyümeye yönelik hedefler de hidrojen talebinde büyümeyi destekleyebilecektir. IICEC analizlerinde rafineri ve petrokimya sektörlerinde yeşil hidrojen talebinin 2050 yılında 0,3 Mt'u geçebileceği görülmektedir. Yeşil hidrojene dönüşümün 2030-2035 döneminde gerçekleşmesi durumunda bu talep daha erken gerçekleşebilecektir.

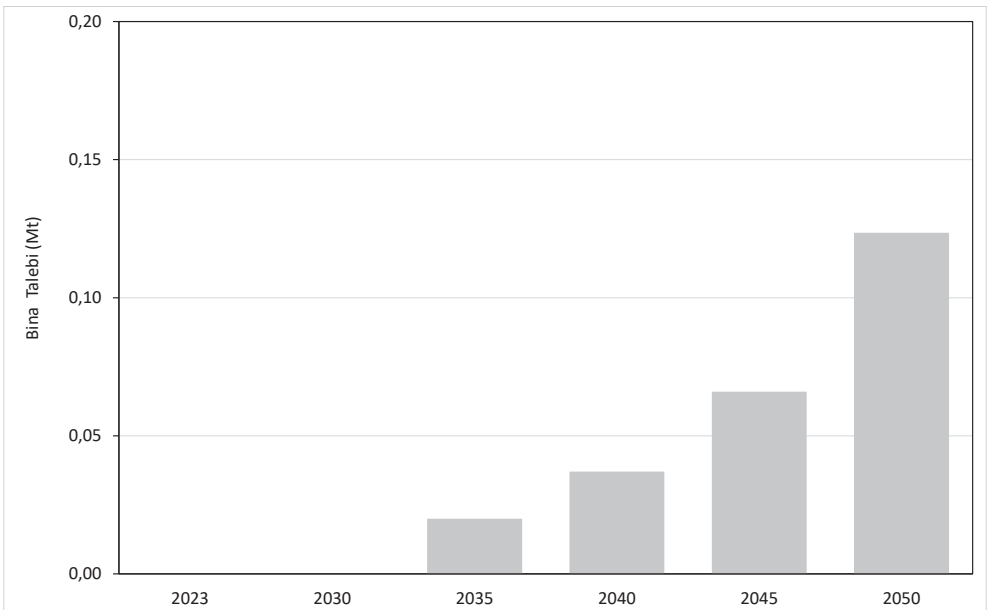
Günümüzde binalarda enerji talebinin yarısı doğal gazdan, yaklaşık %30'u ise elektrik enerjisinden sağlanmaktadır (Şekil 4.25). Yeşil hidrojen gelecekte binaların enerji talebinin karşılanmasında rol oynayabilecektir. TUEP ve Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, hidrojenin doğal gazla karışımına ilişkin sayısal hedefler içermektedir. Bu hedefler çerçevesinde yapılan analizlerde binalarda yeşil hidrojen talebinin 2050 yılında 0,1 Mt'a ulaşabileceği hesaplanmaktadır (Şekil 4.26).

Elektrifikasyonda güçlü büyüme dinamikleri ve verimli ısı pompası çözümlerinde dünyadaki yönelimlere benzer şekilde yaygınlaşma neticesinde binalarda enerji talebi içerisinde elektriğin payının hızla artması beklenmektedir. Özellikle düşük karbonlu üretimde yaygınlaşmayla birlikte elektrifikasyon, enerji güvenliği ve temiz enerji hedefleri bakımından daha kritik bir konuma gelecektir. Analizler, karbondan arındırılması zor sanayi ve ulaşım sektörlerin yeşil hidrojen tedarikinde önceliklendirilmesine işaret etmektedir. Temiz ve verimli elektrifikasyon yatırımlarında yaygınlaşma, binalarda hidrojen tüketimi potansiyelini düşürebilecektir. Çalışmada doğal gazla karışım perspektifi içerisinde analiz edilen sanayide yeşil hidrojen talebinin, 2050 yılında yaklaşık %95'i doğrudan tedarik yöntemiyle sağlanabilecektir (Şekil 4.27).

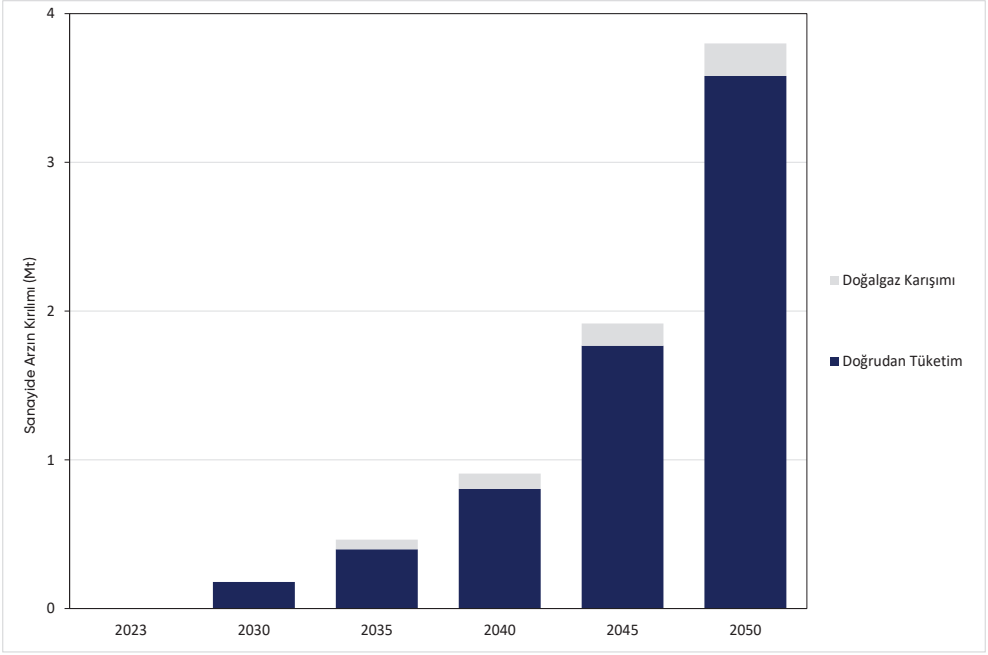
Şekil 4.25. Binalarda Enerji Talebinde Elektrifikasyon ve Doğal Gaz (2022, %)



Şekil 4.26. Binalarda Yeşil Hidrojen Talebinin Gelişimi (2023-2050, Mt)



Şekil 4.27. Sanayide Yeşil Hidrojen Arzının Kırılımı (2023 – 2050, Mt)

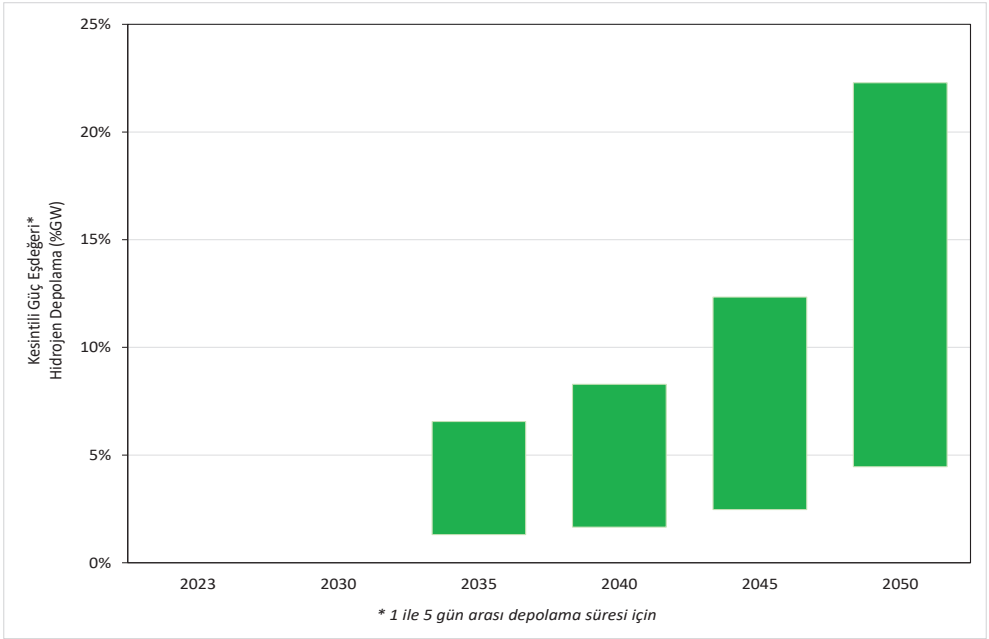


TUEP hedeflerinde ve yenilenebilir enerji geleceğine ilişkin analizlerde, güneş ve rüzgarın elektrik üretimindeki payının önemli oranda artacağı görülmektedir (ETKB, 2022; IICEC, 2022). Son dönemde enerji depolamada batarya çözümlerine ilişkin önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Bununla birlikte, gelecekte kesintili üretimin payının yüksek seviyelere ulaşması sonucunda daha uzun dönemli depolama ihtiyaçları gelişecektir. Elektrik sektörünün verimli ve teknoloji-odaklı geleceğinde, hidrojen depolamanın önemli bir fırsat alanı konumuna ulaşması beklenmektedir. Talepten daha fazla yenilenebilir elektrik arzının gerçekleştiği dönemlerde üretilen hidrojen, farklı teknolojilerle depolanarak enerji sisteminde esnekliği destekleyecektir.

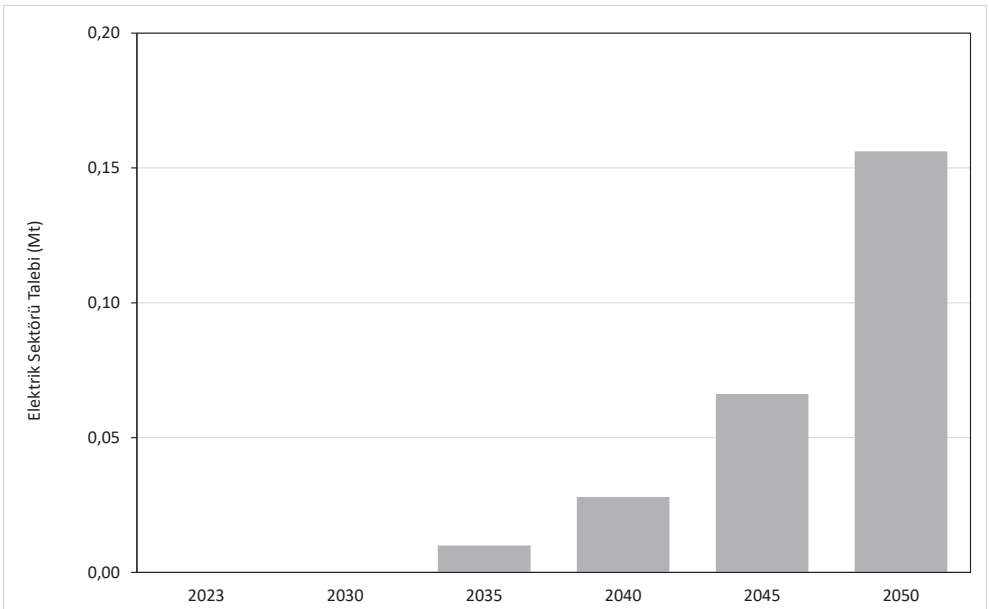
IICEC analizlerinde güneş ve rüzgarda gelecekteki büyüme analiz edilerek hidrojen depolama için talep potansiyeli irdelenmiştir. Güneş ve rüzgarın kurulu güç ve kapasite faktörlerine göre, öngörülen gelecekteki toplam üretimlerinin yaklaşık beşte-birini bir gün, yaklaşık %5'ini ise beş gün süreyle dengeleyebilecek potansiyel uzun vadede 5,2 TW-saat olarak hesaplanmaktadır (Şekil 4.28 ve Şekil 4.29).

Üretilen hidrojen, depolama olmaksızın doğrudan yakıt hücresine beslenerek de elektriğe geri dönüştürülebilmektedir. Elektrolizör ve yakıt hücresi teknolojilerinin gelecekte hedeflenen %75'lik dönüşüm verimleriyle çalışması durumunda, kombine verim %56'ya karşılık gelmektedir. Böylelikle bir tur depolamanın verimi %70'lik kompresör verimi ve %1'lik depolama kaybı varsayımları ile toplamda %39 olmaktadır.

Şekil 4.28. Elektrik Sektöründe Hidrojen Depolama Analizi (2023 – 2050, %)



Şekil 4.29. Elektrik Sektöründe Yeşil Hidrojen Talebi Gelişimi (2023 – 2050, Mt)

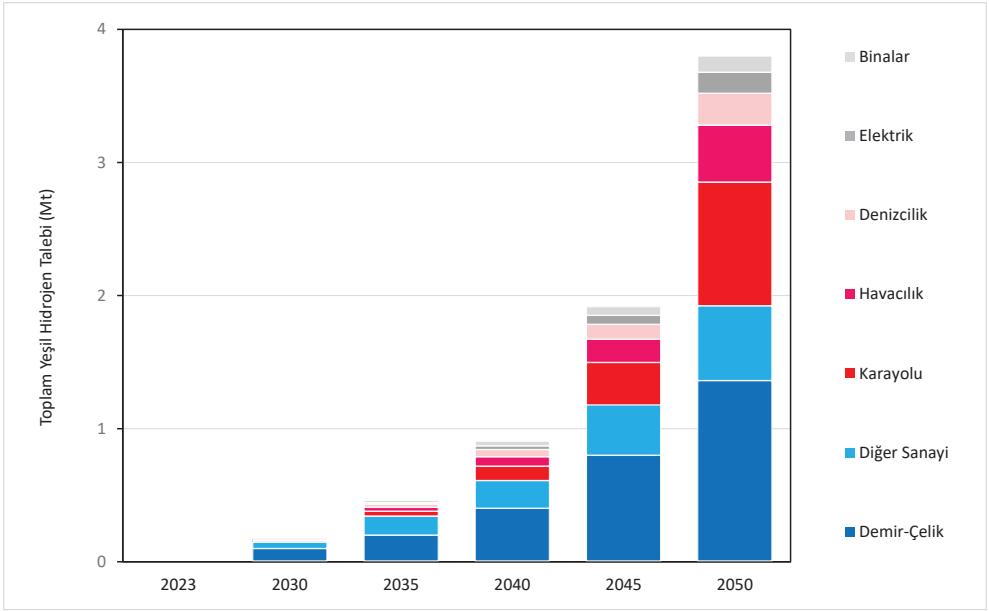


Bu nedenle, sistemin depolamasız işletilmesinin ekonomik verim bakımından yakın ve orta dönemde yeterince güçlü bir alternatif oluşturmayacağı değerlendirilmektedir. Türkiye'nin güçlü yenilenebilir enerji potansiyeli de elektrifikasyonun gelişimi içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının batarya ve hidrojen depolama ile entegre çözümlerle değerlendirilmesi zeminini güçlendirmektedir.

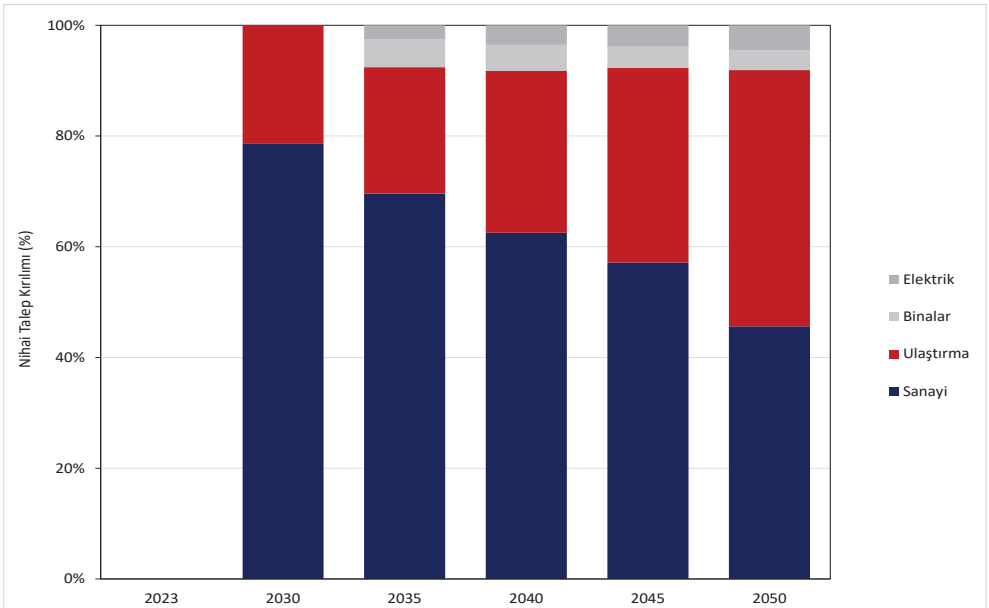
Mevcut durumda rafineri, petrokimya, gübre ve bazı sanayi kolları ile sınırlı olan hidrojen tüketim portföyü gelecekte oldukça çeşitlendirilmiş bir nitelik kazanmaktadır.

- İlk gelişim aşamasında özellikle SKDM ile bağlantılı sanayi sektörlerinde artan yeşil hidrojen talebi, 2030-2035 döneminden itibaren ulaştırma sektöründe de güçlenmektedir.
- Çelik sektörü, rafineriler ve petrokimya dahil diğer sanayi sektörleri ve karayolu ulaşımı, toplam yeşil hidrojen talebinin 2035 ve 2040 yıllarında %80'ini (sırasıyla 0,4 Mt ve 0,7 Mt) ve 2050 yılında dörtte-üçünü oluşturmaktadır (2,9 Mt).
- 2030 yılında talebin tamamına yakınına oluşturan sanayi ve ulaştırma sektörleri 2050 yılında talebin yaklaşık %90'una karşılık gelmektedir (Şekil 4.30 ve Şekil 4.31).
- IICEC analizlerinde talepte büyüme perspektifi içerisinde yeşil hidrojen tedarikinin bölgesel gelişimine ilişkin olarak bir yaklaşım da geliştirilmiştir. Kümelenme çözümleri, başlangıç aşamalarında hidrojen ekosisteminin verimliliğini ve rekabetçiliği destekleyerek kritik bir rol oynayacaktır. Özellikle vadi konsepti ve benzeri yaklaşımlarla, hidrojenin tüketim noktalarına yakın üretiminin öne çıkması beklenmektedir (Şekil 4.32). Orta vadede ise ulaşım talebinde büyüme, binalarda kısmi kullanım gibi dinamiklerle talep gelişiminin daha dağıtık bir nitelik kazanması beklenmektedir. Bu çerçevede dışarıdan alım seçenekleri gelişirken, bu durum altyapılarda daha yüksek büyüme ihtiyacını da beraberinde getirecektir (Şekil 4.33).
- Bu çalışmada sunulan talep perspektifi, elektrolizör kurulum hedefleri ile uyumlu, enerji güvenliği ve net-sıfır hedeflerini destekleyecek bir gelişim patikası sunmaktadır. Bununla birlikte talepte büyümenin hızı ve sektörel gelişim dinamikleri, Türkiye'nin emisyon ticaretine ilişkin atacağı adımlar, sanayide ve ulaşımda kritik hidrojen teknolojilerinin ticarileşme ivmesi, geleneksel hidrojen tüketicisi sektörlerin yeşil hidrojene dönüşüm hızı, yeşil hidrojenin geleneksel alternatiflerle maliyet farkının kapatılmasına yönelik finansal mekanizmaların hayata geçirilmesi gibi bir dizi önemli faktörle yakından ilişkili olacaktır. Gelecekte mavi hidrojen ve pembe hidrojene ilişkin fırsatların ticarileşmesi ve değerlendirilmesi de yeşil hidrojen talep büyüklüğünü kısmen azaltabilecektir.

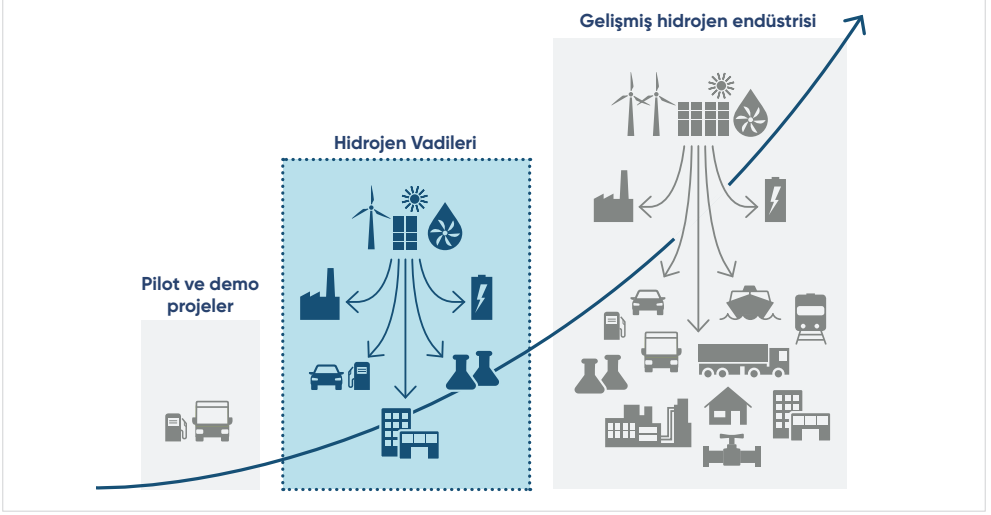
Şekil 4.30. Yeşil Hidrojen Talebinin Sektörel Gelişimi (2023 – 2050, Mt/y)



Şekil 4.31. Yeşil Hidrojen Talebinin Sektörel Gelişimi (2023 – 2050, %)

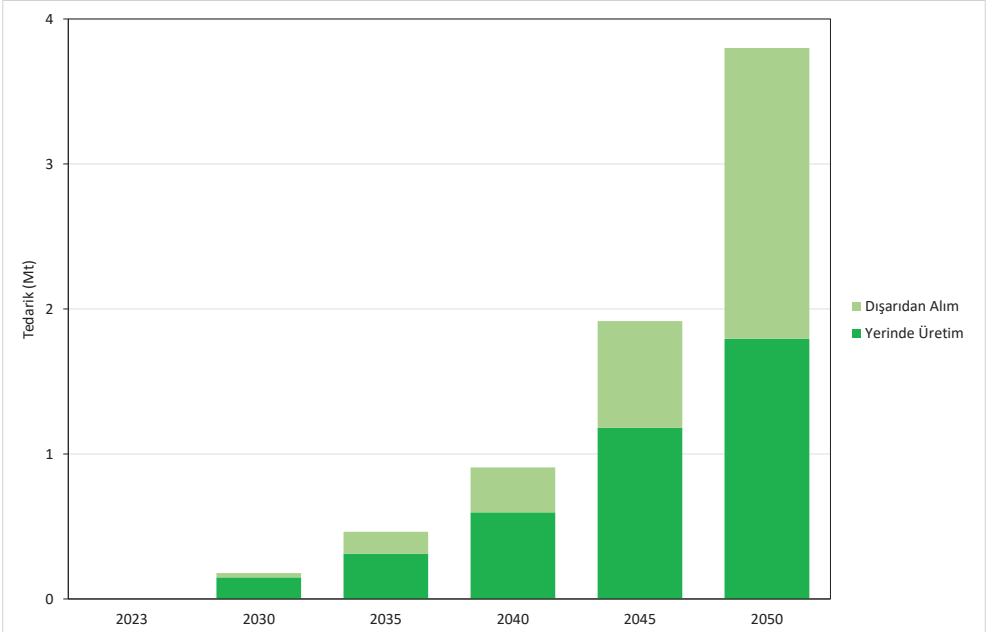


Şekil 4.32. Hidrojen Vadileri Perspektifi



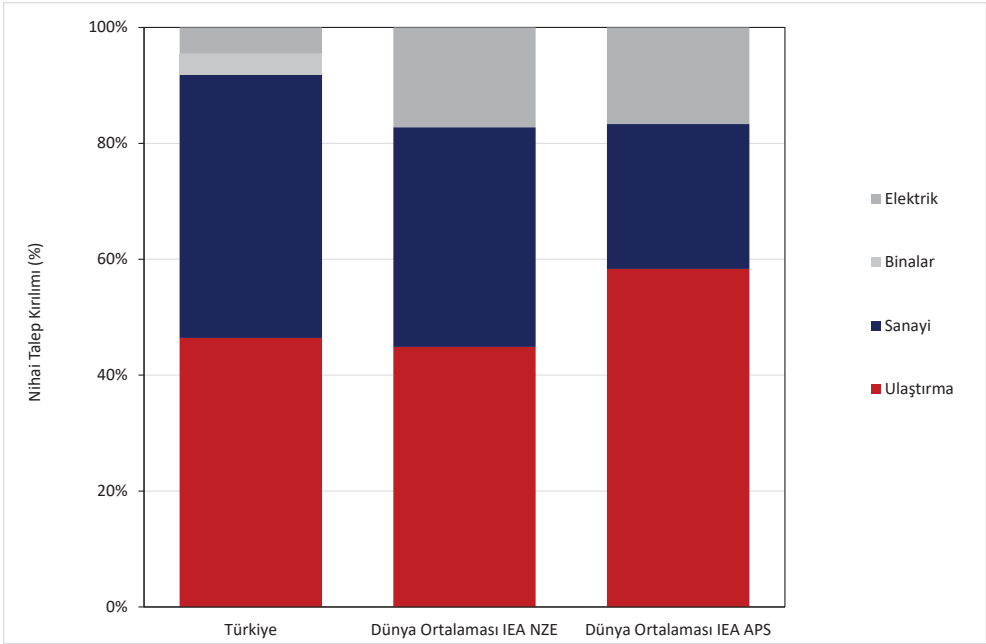
Kaynak: Clean Hydrogen Partnership

Şekil 4.33. Yeşil Hidrojen Arzının Kırılımı (2023 – 2050, Mt)

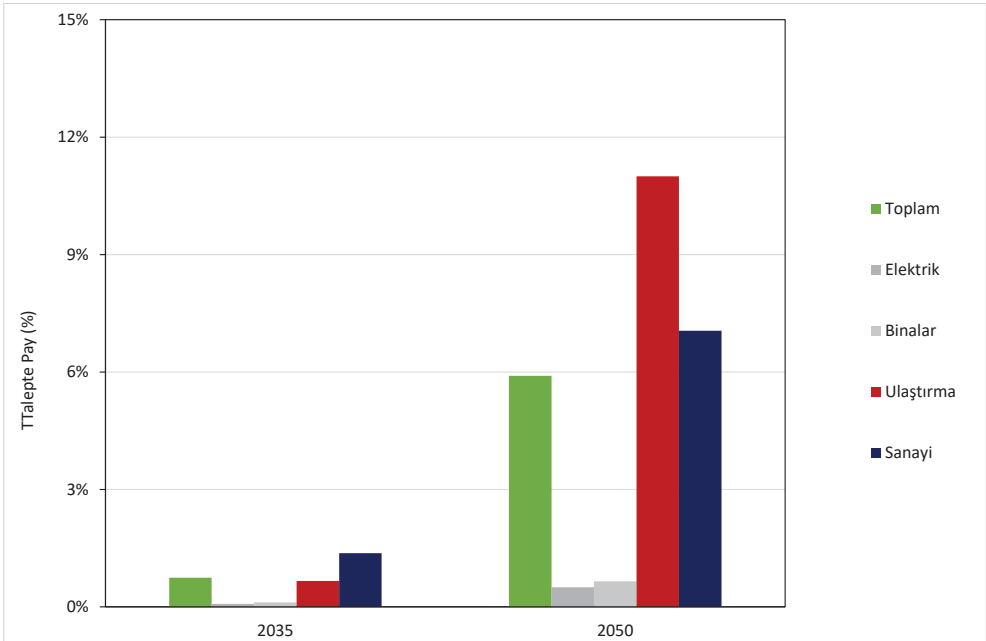


- Karşılaştırmalı analizler, ulaştırma ve sanayi sektörlerinin küresel analizler ve beklentiler ile uyumlu olarak, yeşil hidrojen geleceğinin ağırlıklı bileşenlerini oluşturacağını göstermektedir. 2050 yılında yeşil hidrojen talebinin %46'sı ulaştırmada, %45'i sanayide, yaklaşık %10'u elektrik sektöründe ve binalarda gerçekleşmektedir.
- Binalarda hidrojen tüketiminin dünya genelinde sınırlı yaygınlaşma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Verimli ısı pompası çözümlerinde yaygınlaşmayla birlikte uzun dönemde Türkiye enerji sektöründe de benzer dinamiklerin daha fazla öne çıkabileceği değerlendirilmektedir.
- Elektrik sektöründe hidrojen tüketiminin ise, elektrik sektöründe gelecekte fosil yakıt ağırlığı yüksek olan ekonomilerde kömür ve doğal gazla hidrojenin entegre edildiği üretim birimleri ve doğrudan elektrik üretimi amaçlı hidrojen kullanımından beklendiği görülmektedir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedefleri ve yüksek potansiyeli, nükleer elektrik üretiminde büyüme hedefleri çerçevesinde elektrik sektöründe kullanımın öncelikle depolama çözümleri odaklı gelişmesi öngörülmektedir (Şekil 4.34).
- Yeşil hidrojen tüketimi, ulaşımda enerji talebinin 2035 yılında binde 7'sine ve 2050 yılında %11'ine, sanayide enerji talebinin ise 2035 yılında %1'ine ve 2050 yılında %8'ine yükselmektedir.
- Yeşil hidrojen gelişim perspektifi, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin 2035 yılında binde yedisine, 2040 yılında %1'ine ve 2050 yılında %6'sına karşılık gelmektedir (IEA APS ve NZE Senaryolarında 2050 yılında dünya ortalaması sırasıyla %3 ve %8) (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36).
- IICEC analizlerine göre, temiz elektrifikasyon, doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil hidrojenin toplam nihai enerji talebine katkısı 2050-2053 yıllarına kadar %70-75'e çıkabilmektedir (Son dönemde %10-15).

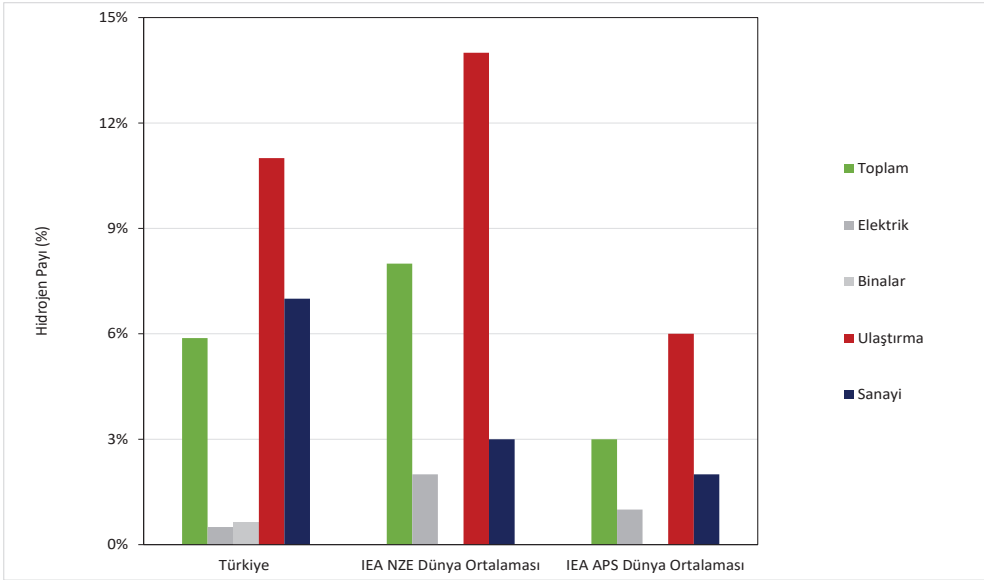
Şekil 4.34. Yeşil Hidrojenin Nihai Enerji Talebinde Payı & Dünya ile Karşılaştırma (2050, %)



Şekil 4.35. Yeşil Hidrojenin Nihai Enerji Talebinde Payı (2035, 2050, %)



Şekil 4.36. Yeşil Hidrojen Talebinin Sektörlerdeki Payı & Dünya ile Karşılaştırma (2050, %)

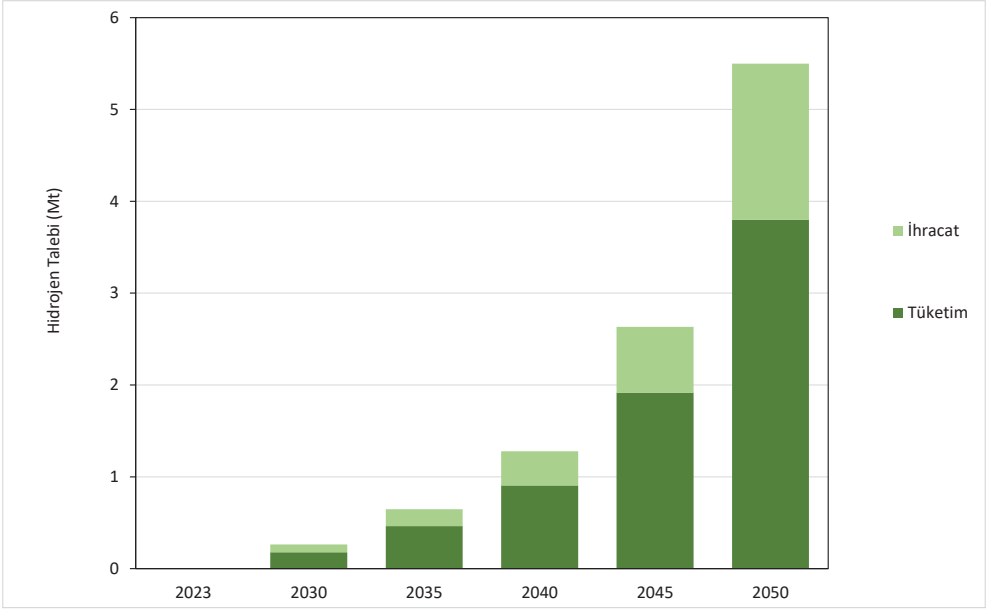


4.2.3. Yeşil Hidrojen İhracat Perspektifi

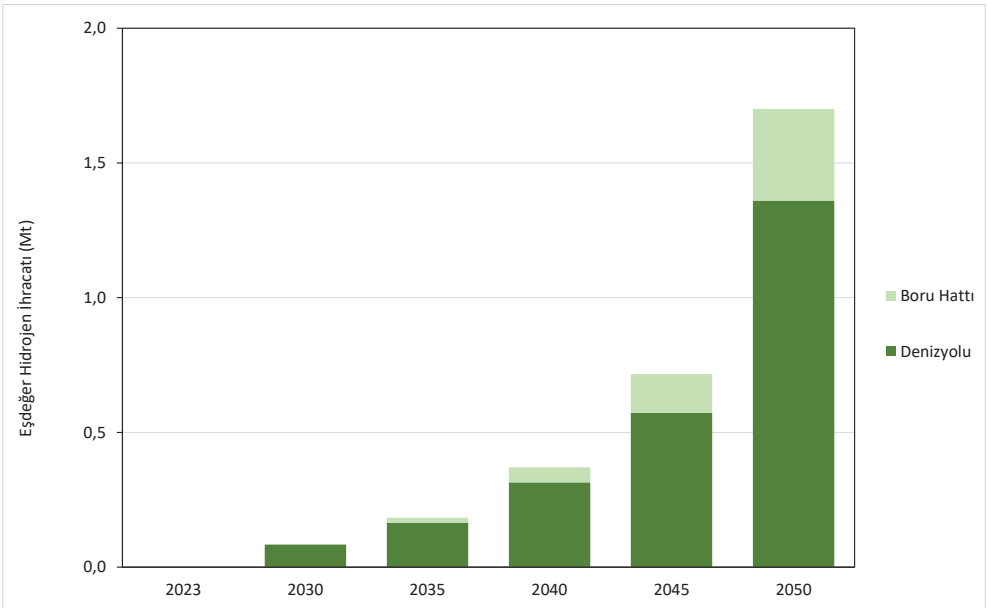
Türkiye, öncelikli olarak kendi tüketim gereksinimlerini karşılamak kaydıyla, 2050 yılına kadar olan dönemde üretilen hidrojenin yaklaşık %30'unu ihraç etme potansiyeline sahip olabilecektir (2050 yılında 1,7 Mt) (Şekil 4.37). Türkiye'de indirgenmiş yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin dış piyasada rekabetçiliğinin sağlanması yoluyla ihracatın hız kazanabileceği öngörülmektedir. Avrupa'ya ihraç edilen hidrojenin ilk yıllarda tamamının, uzun vadede ise %80'inin enerji eşdeğeri kadar amonyağa dönüştürülerek yaklaşık 20 tankerlik bir ticaret filosu ile denizden taşınabileceği değerlendirilmektedir. Avrupa amonyak piyasasındaki dinamikler, bu potansiyeli desteklemektedir.

Avrupa'ya doğal gaz arzına yönelik altyapıların gelişimiyle bağlantılı olarak kalan %20'lik kısım, hacmen %20 oranında doğalgaz boru hatlarına karıştırılarak taşınabilecektir. Bunun için gelecekte 20 milyar m³'lük boru hattı ve ilave 2 TW-saat'lik kompresör kapasitesi gerekeceği hesaplanmaktadır. TANAP altyapısının önemli bir fırsat oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Avrupa talebinde yüksek artış ve hidrojenin ekonomisinde daha güçlü iyileşmeler sağlanması durumunda hidrojene özel boru hattı gelişimi de daha uzun vadede bir seçenek durumuna gelebilecektir. Tamamen Avrupa pazarına yönelik ihracat yapılması durumunda, 2050 yılında AB için öngörülen ithalat gereksiniminin %8'i karşılanabilecektir (2050 yılına kadar olan dönemde ortalama %3) (Şekil 4.38 ve Şekil 4.39). İhracat miktarlarının gelişiminde, Türkiye'de sanayi ve ulaştırma başta olmak üzere talep sektörlerinin ihtiyaçlarına ek olarak, elektrifikasyon hedefleri içerisinde yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik stratejiler de belirleyici olacaktır.

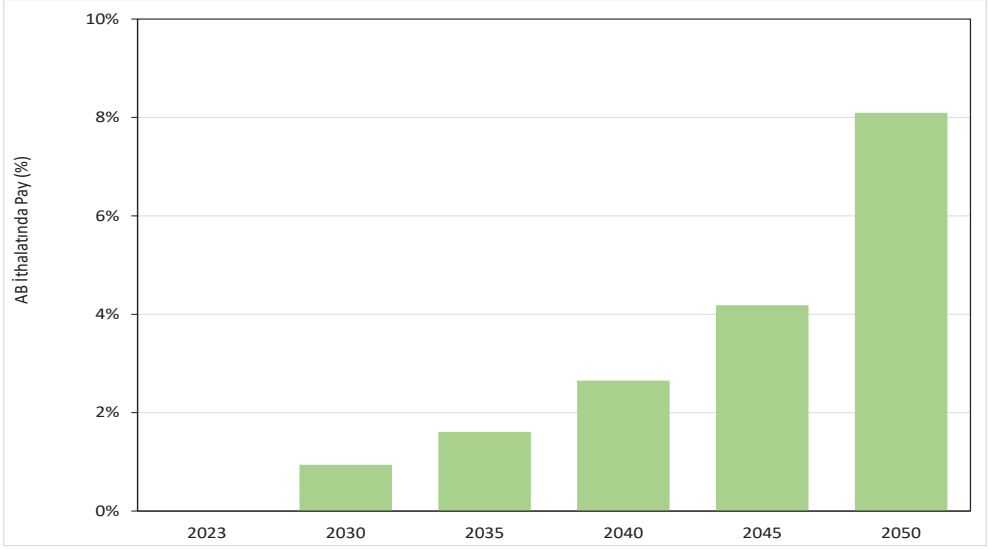
Şekil 4.37. Yeşil Hidrojen Üretim, Tüketim ve İhracat Perspektifi (2023 - 2050, Mt/y)



Şekil 4.38. Yeşil Hidrojen AB'ye İhracat Perspektifi (2050, Mt/y)



Şekil 4.39. Yeşil Hidrojen İhracatının AB Yeşil Hidrojen İthalatına Katkısının Gelişimi (2023-2050, %)



4.3. IICEC Analizlerinde Yeşil Hidrojen Geleceğinin Çok Boyutlu Enerji ve İklim Faydaları

4.3.1. Enerji Arzında Yerleşme ve Çeşitlendirme

Türkiye'nin artan enerji talebi çerçevesinde enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi, enerji arz ve talep portföylerinde kaynak ve teknoloji çeşitlendirilmesinin sağlanması ve enerji arzında yerlilik oranının yükseltilmesi en kritik öncelik durumundadır. Bu çalışmada sunulan, yeşil hidrojenle politika hedefleri ile uyumlu ve sürdürülebilir büyüme perspektifi, 2050 yılına kadar olan dönemde nihai enerji talebinin ortalama %2'sini karşılamaktadır. 2050 yılında nihai tüketimin %6'sı yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretimi ile sağlanabilmektedir. Böylelikle yeşil hidrojen, düşük karbonlu elektrifikasyonda güçlü gelişme, enerji verimliliği performansında artış, doğrudan yenilenebilir enerji kullanımında yaygınlaşma ve yerli petrol ve doğal gaz üretiminde artış ile birlikte enerji sisteminde daha az ithalata dayalı bir enerji geleceğinin temel bileşenlerinden birisi konumuna gelecektir. Karbondan arındırılması zor sektörlerin gelecekteki talepleri için ithal fosil yakıt yükünde sağlanacak azalma, enerji maliyetlerinde ithal yakıt fiyatlarındaki dalgalanmaların etkilerini azaltacak, enerji ithalat faturasını düşürerek enerji fiyatlarında öngörülebilirliği güçlendirerek makro ekonomik hedefleri destekleyecektir⁹ (Detaylar için lütfen Bölüm 4.4'e bakınız).

⁹ Detaylar için lütfen Bölüm 3'e bakınız.

<https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Odemeler+Dengesi+ve+İlgili+Istatistikler/Odemeler+Dengesi+Istatistikleri/>

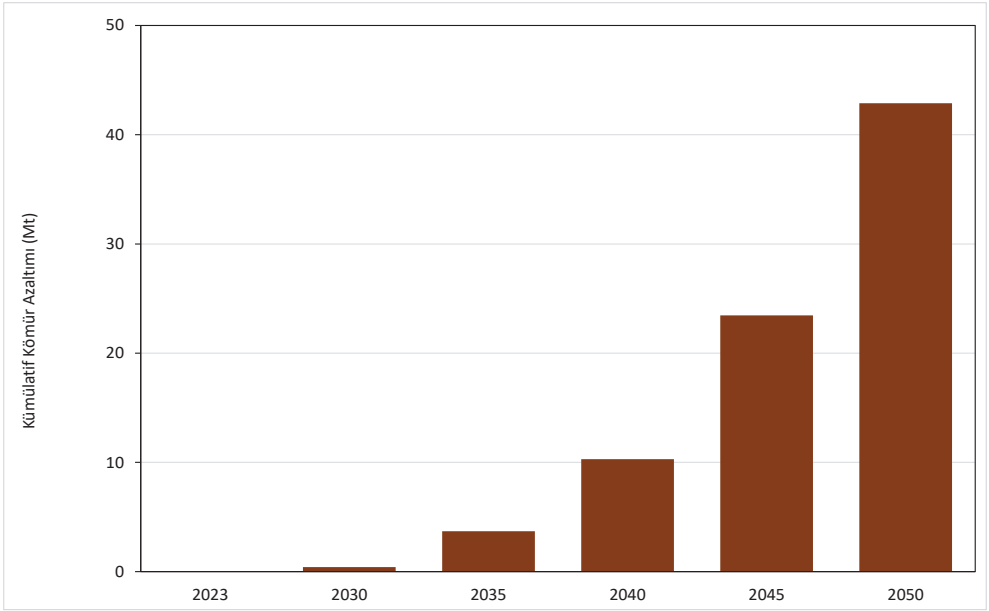
4.3.2. Enerji İthalat Tasarrufu

Yeşil hidrojenle elektrolizör kurulum hedefleri ile uyumlu büyüme patikası, fosil yakıtların tüketimini karbondan arındırılmış tüm sektörlerde giderek artan oranlarda ikame etmektedir.

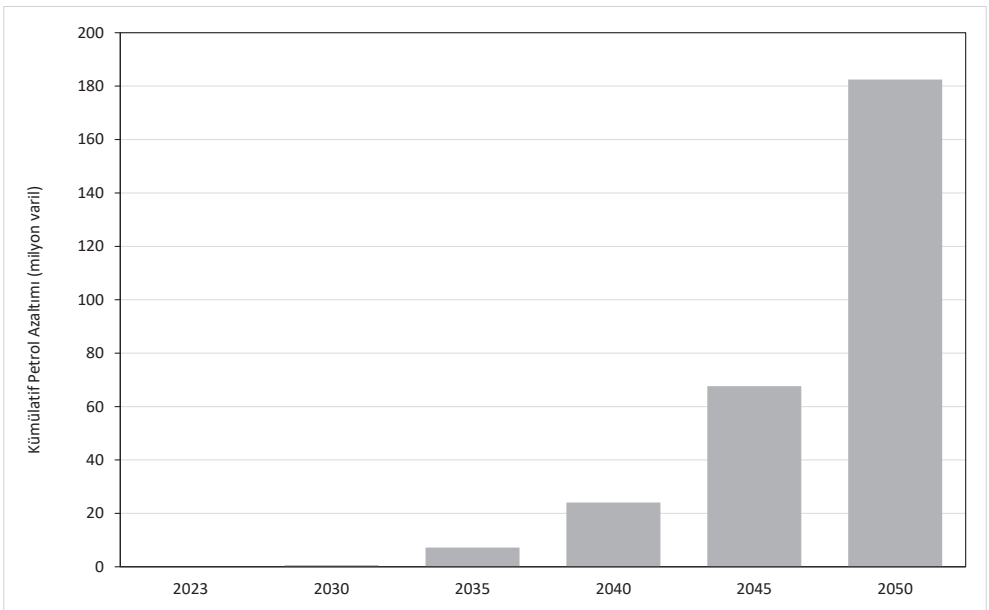
- IICEC analizlerinde, 2050 yılına kadar olan dönemde kömür tüketiminde kümülatif azalma 42,9 Mt olarak hesaplanmaktadır (Şekil 4.40).
- Yeşil hidrojen aynı dönemde 182,5 milyon varil petrolü ve 28,1 milyar m³ doğal gazı ikame etmektedir (Şekil 4.41 ve Şekil 4.42).
- Yıllık fosil yakıt tasarrufu 2050 yılında 11 Mtep'e yaklaşmakta, analiz döneminde kümülatif tasarruf ise kömürde 30 Mtep, petrolde 25,6 Mtep ve doğal gazda 25,5 Mtep olmak üzere toplam 80 Mtep seviyesine ulaşmaktadır (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). Bu büyüklük 2022 yılı nihai enerji talebindeki toplam fosil yakıt tüketimine yakındır.
- 2050 yılına kadar olan dönemde ithal fosil yakıt tüketiminde azalmayla sağlanan ortalama tasarruf 800 milyon 2022ABD\$ olarak gerçekleşmekte, 2050 yılında yıllık tasarruf 3,1 milyar 2022ABD\$'a çıkmaktadır (2035, 2040 ve 2045 yıllarında sırasıyla 0,3, 0,6 ve 1,4 milyar 2022ABD\$)¹⁰.
- 2050 yılı tasarruf tutarı 2023 yılında öngörülen toplam fosil yakıt enerji ithalatının yaklaşık %5'ine karşılık gelmektedir. Bu gelişim, yeşil hidrojenin nihai enerji tüketiminde gelecekteki payı ile uyum göstermektedir (Şekil 4.45). 2050 yılına kadar ithalat faturasında kümülatif azaltım 20,7 milyar 2022ABD\$'a ulaşmaktadır (2023 yılında öngörülen toplam enerji ithalat faturasının yaklaşık üçte- biri).
- Toplam ekonomik tasarrufun sektörler bazında kırılımı Şekil 4.46'da sunulmaktadır. Karayolu ulaşımında dizelin ikamesinin tasarruftaki payı %35 olmakta, havacılık ve denizcilik sektörleri ise tasarrufun sırasıyla %13 ve %7'sini oluşturmaktadır. Böylelikle 2050 yılına kadar olan dönemde ithalat faturasında sağlanacak düşüşün yarısından fazlası ulaşımında gerçekleşmektedir (Toplam 11,5 milyar 2022ABD\$). Çelik, rafineri ve petrokimya dahil diğer sanayi sektörleri ithalat tasarrufunun üçte-birini oluştururken kalan kısım elektrik ve binalarda kaydedilen tasarruflarda gerçekleşmektedir (Sırasıyla %3 ve %9).

¹⁰ Çalışmanın bazı analizlerinde IEA STEPS Senaryosu fosil yakıt ve karbon fiyat serileri kullanılmıştır. IEA APS Senaryosu fiyat serilerinde ve mevcut fiyat seviyelerinin devamı durumunda ithalat tasarrufu analizi Bölüm 4.4'de sunulmaktadır.

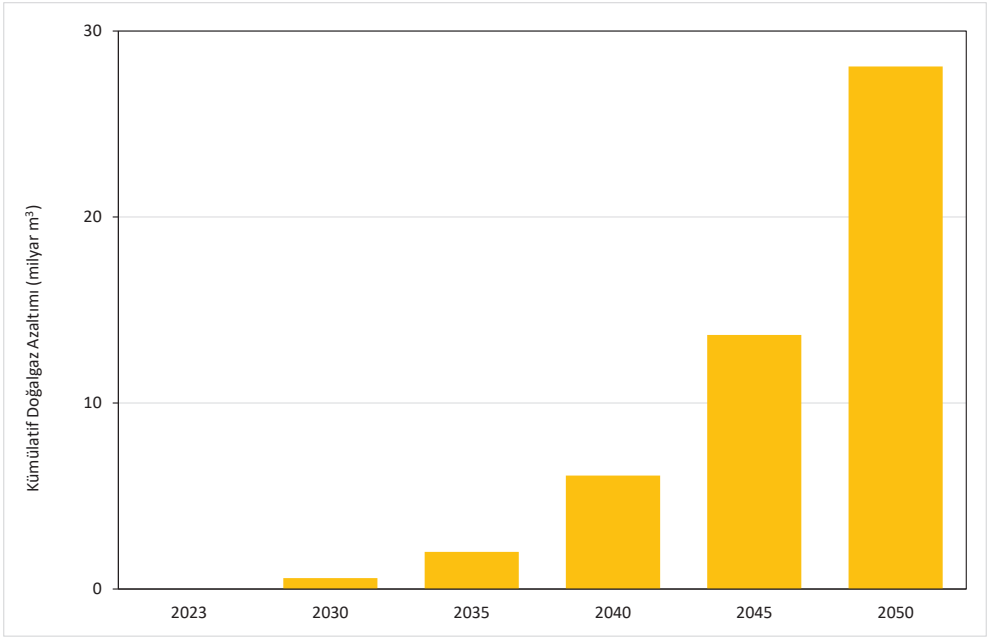
Şekil 4.40. Kömür Tüketiminde Kümülatif Azalma (2023-2050, Mt)



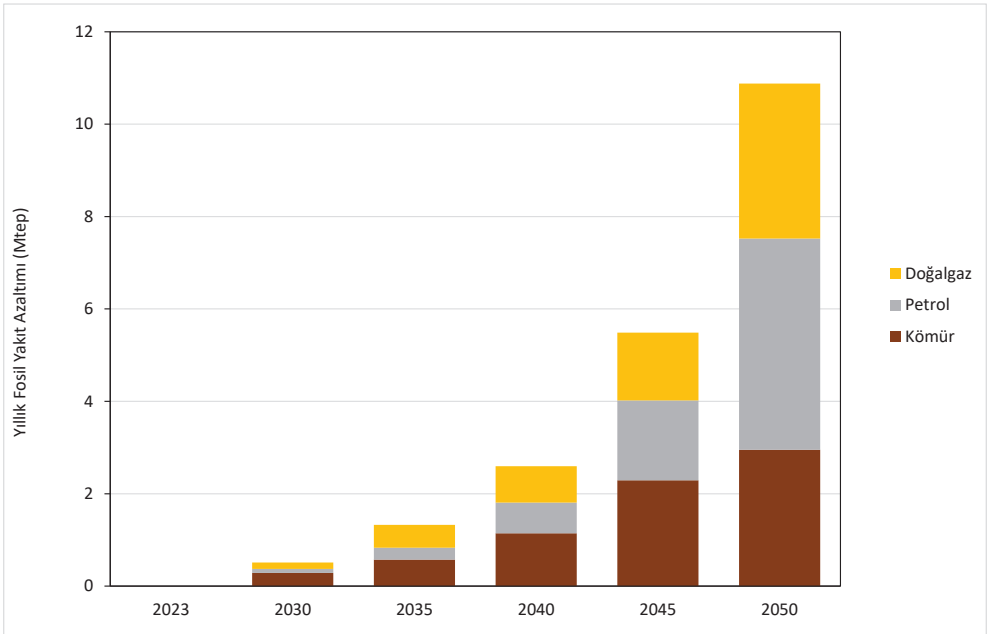
Şekil 4.41. Petrol Tüketiminde Kümülatif Azalma (2023-2050, milyon varil)



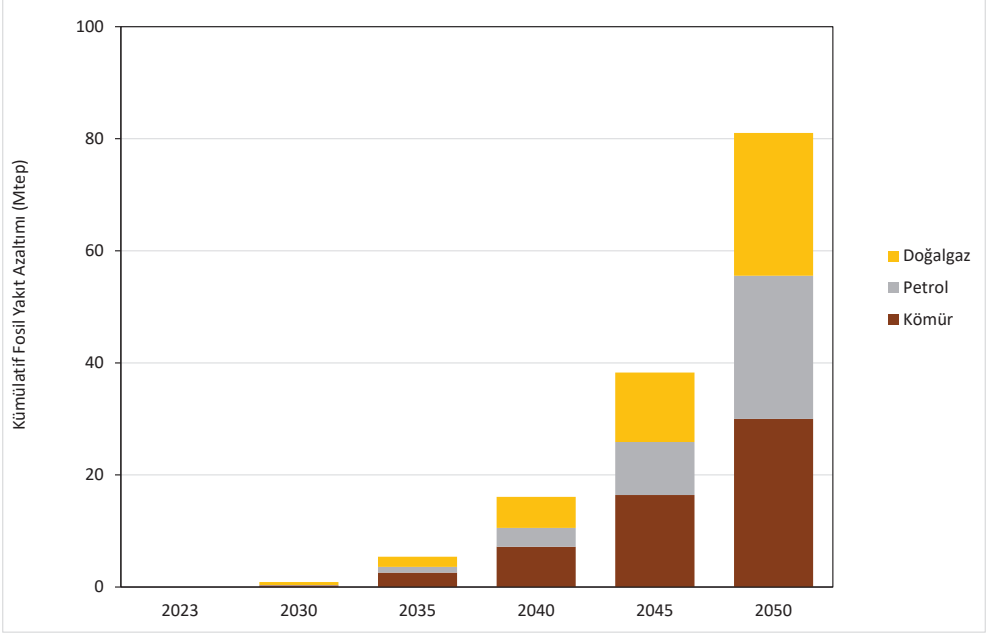
Şekil 4.42. Doğal Gaz Tüketiminde Kümülatif Azalma (2023-2050, Milyar m³)



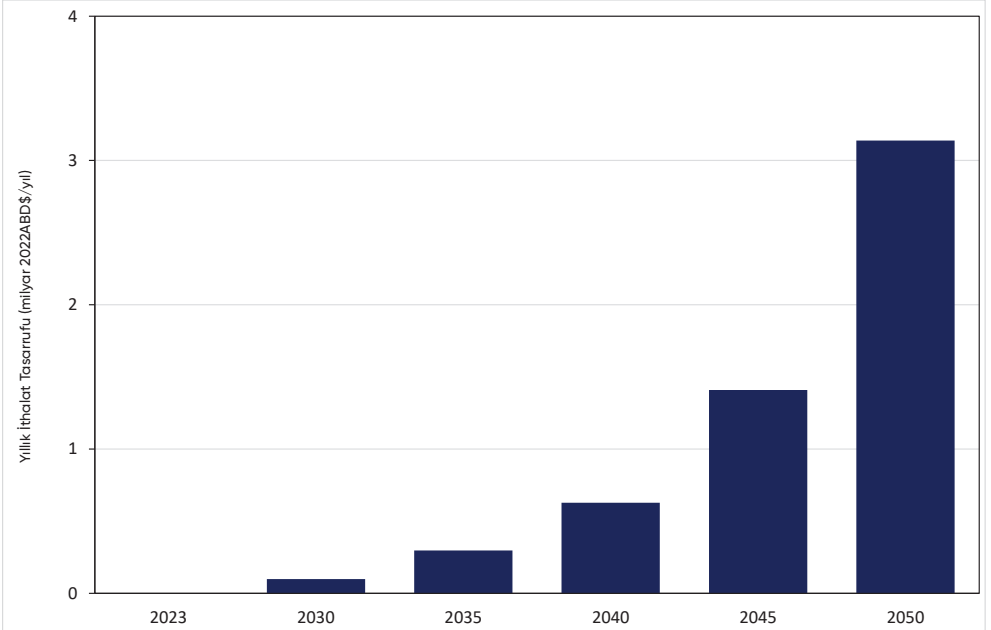
Şekil 4.43. Yıllık Fosil Yakıt Azaltımı (2023-2050, Mtep/y)



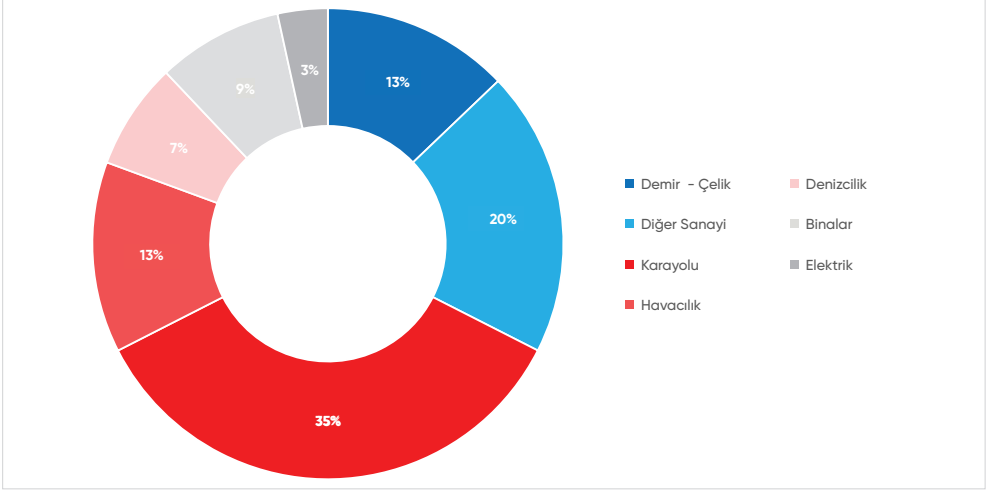
Şekil 4.44. Kümülatif Fosil Yakıt Azaltımı (2023-2050, Mtep)



Şekil 4.45. Yıllık Fosil Yakıt İthalat Tasarrufu (2023-2050, Milyar 2022ABD\$/yıl)



Şekil 4.46. Kümülatif Fosil Yakıt İthalat Tasarrufunun Sektörel Kırılımı (%)

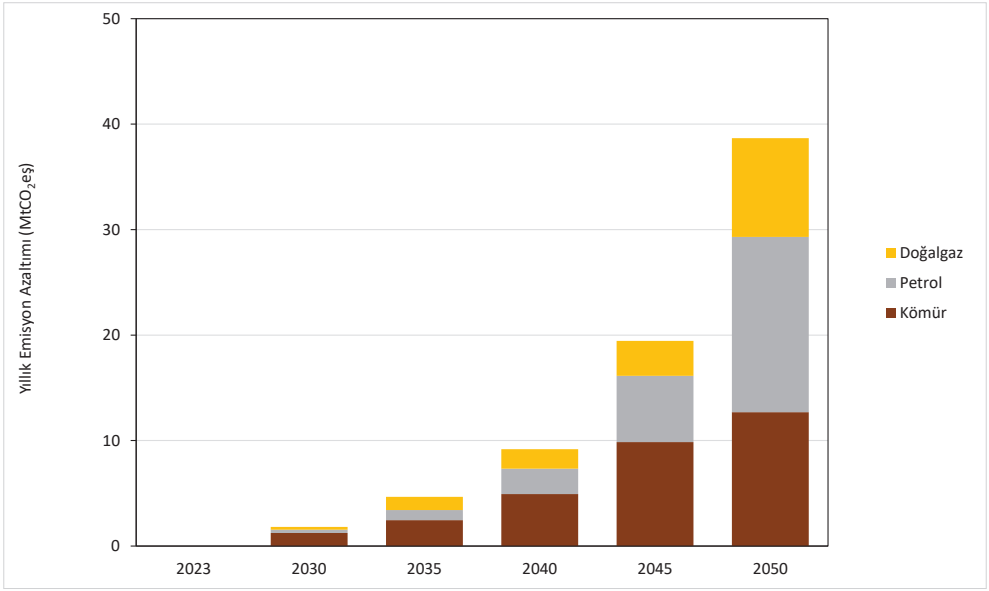


4.3.3. Sera Gazı Emisyonları Azaltımı

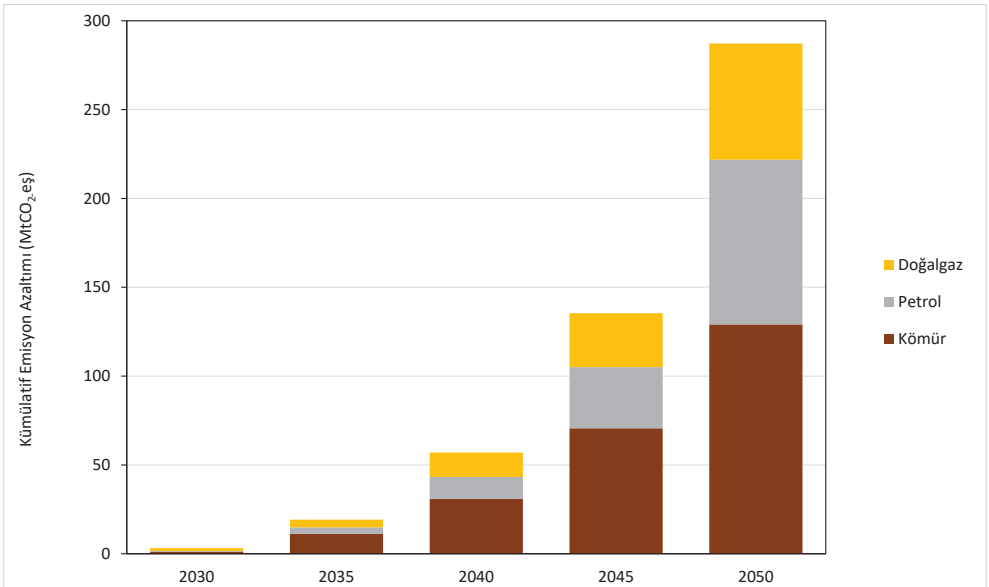
Yeşil hidrojenin karbondan arındırılması zor sektörlerde tüketiminde yaygınlaşma, sera gazı emisyonlarında kritik azaltımlar sağlamaktadır.

- 2050 yılına kadar olan dönemde sera gazı emisyonlarında yıllık azaltım 40 Mt CO₂-eş yaklaşmakta, kümülatif azaltım ise 287,2 Mt CO₂-eş seviyesine ulaşmaktadır.
- Kömürün ikamesiyle 129,1 Mt CO₂-eş toplam tasarruf sağlanırken, petrol ve doğal gazda azaltım kümülatif emisyon envanterini sırasıyla 92,8 ve 61,4 Mt CO₂-eş düşürmektedir (Şekil 4.47 ve Şekil 4.48). Yeşil hidrojenle büyüme, Türkiye'nin net-sıfır hedefini desteklemektedir (Mevcut durumda karbondan arındırılması zor sektörlerin emisyon envanteri 79,5 Mt CO₂-eş).
- 2050 yılına kadar olan dönemde emisyon maliyetlerinde yıllık tasarruf 4,8 milyar 2022ABD\$'ına çıkmaktadır (2035, 2040 ve 2045 yıllarında sırasıyla 0,6, 1,1 ve 2,4 milyar 2022ABD\$'ı) (Şekil 4.49). Bu dönemde emisyon tasarrufunun parasal karşılığı kümülatif olarak 35,9 milyar 2022ABD\$'ına ulaşmaktadır (Yıllık ortalama 1,4 milyar 2022ABD\$).
- Şekil 4.50'de sunulduğu üzere, toplam emisyon tasarrufunun yaklaşık %40'ı çelik üretiminde kömürün ikamesinden sağlanmaktadır (14,1 milyar 2022ABD\$). Diğer sanayi sektörleri ve karayolu ulaşımı ise toplam tasarrufun sırasıyla %22 ve %20'sini oluşturmaktadır. Havacılık ve denizcilik sektörlerinde toplam emisyon tasarrufu %12 olarak gerçekleşmektedir. 2050 yılına kadar olan dönemde toplam emisyon tasarrufunun yaklaşık %60'ından fazlası sanayi sektörlerinde gerçekleşmektedir.

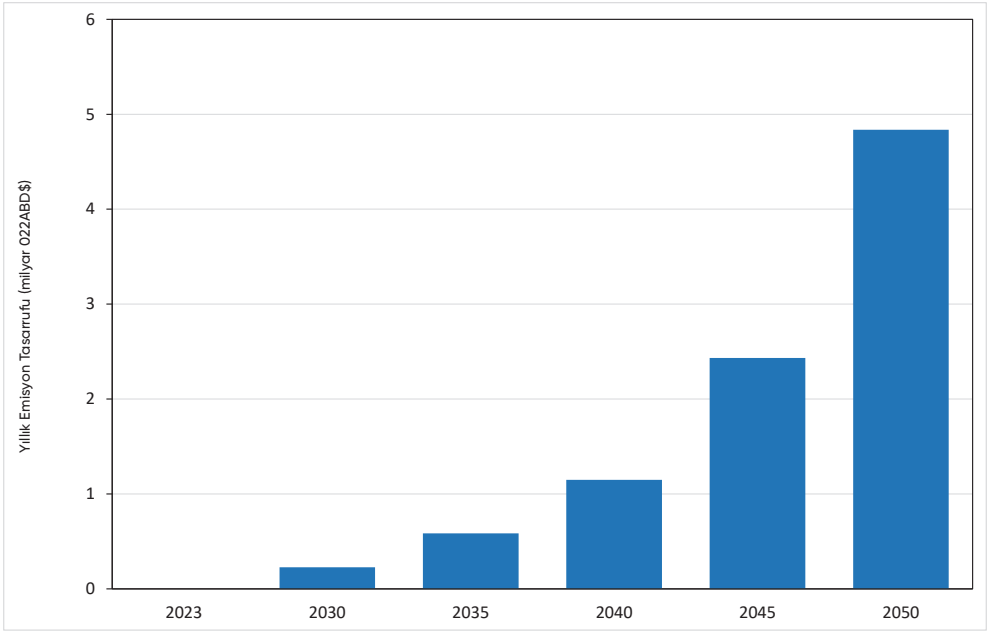
Şekil 4.47. Yıllık Sera Gazı Emisyonu Azaltımı (2023 – 2050, Mt CO₂-eş)



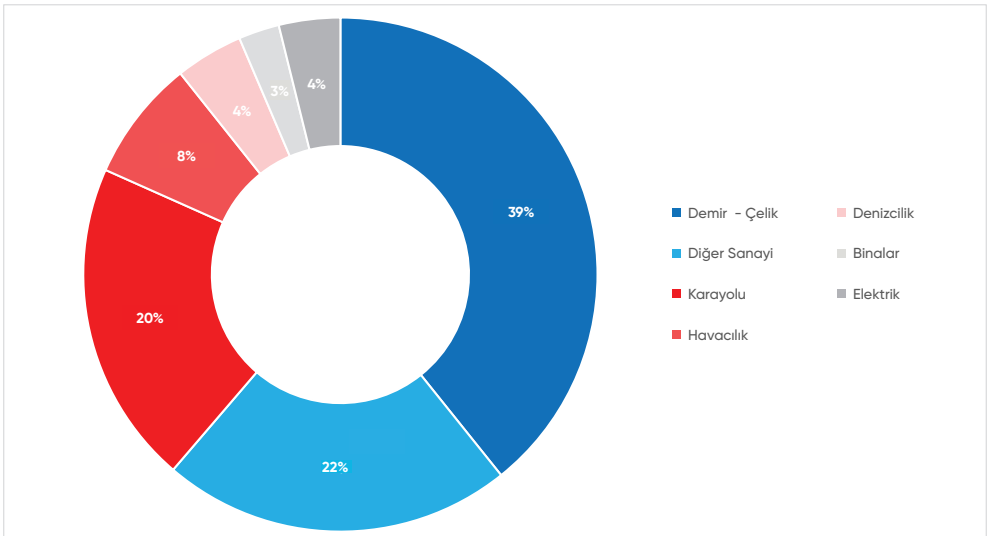
Şekil 4.48. Kümülatif Sera Gazı Emisyonu Azaltımı (2030 – 2050, Mt CO₂-eş)



Şekil 4.49. Yıllık Emisyon Tasarrufu (2023-2050, Milyar 2022ABD\$)



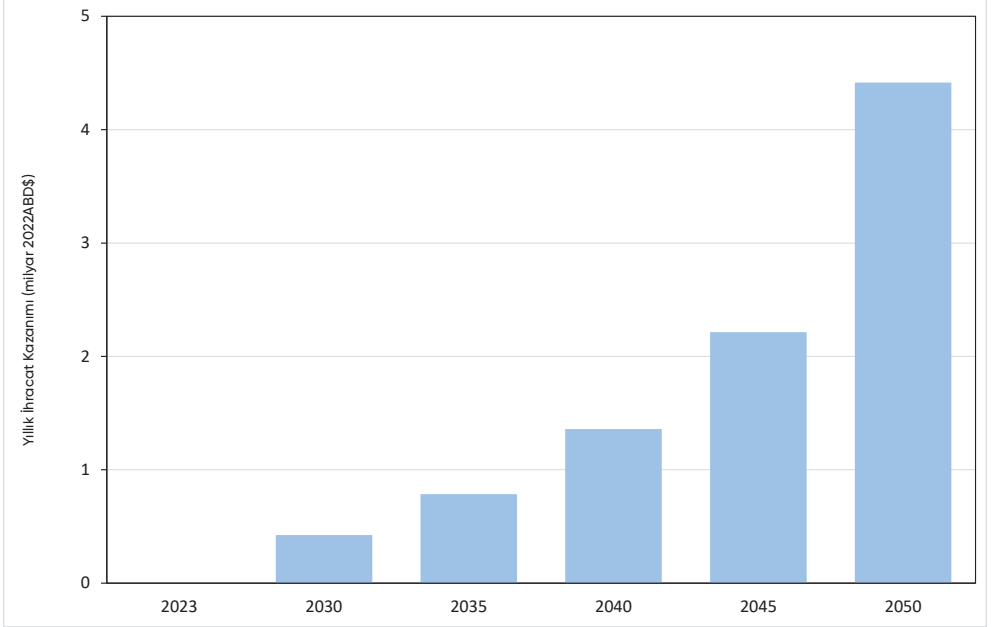
Şekil 4.50. Kümülatif Emisyon Tasarrufunun Sektörel Kırılımı (2023-2050, %)



4.3.4. İhracat Kazanımı

IICEC analizlerinde üretimde öncelik, Bölüm 4.3'te sunulduğu gibi, sektörlerin gelecekteki taleplerinin karşılanmasına verilmektedir. Yeşil hidrojenle elektrolizör kapasitesi hedefleri ve muhtemel talep gelişim perspektifi, üretim maliyet dinamiklerinin AB pazarındaki gelişmelere yakın seviyelerde gerçekleşmesi durumunda 2050 yılına kadar olan dönemde toplam arzın yaklaşık %30'luk bölümünün ihracat yoluyla değerlendirilmesini sağlarken, ihracat kazanımı 2035 yılında 800 milyon 2022ABD\$/yıl ve 2050 yılında 4,4 milyar 2022ABD\$/yıl olarak gerçekleşmektedir. 2050 yılına kadar olan dönemde yıllık ortalama ihracat kazanımı 1,3 milyar 2022ABD\$ olmaktadır¹¹ (Kümülatif olarak 35,1 milyar 2022ABD\$ veya mevcut yıllık enerji ithalat faturasının yarısına yakın) (Şekil 4.51).

Şekil 4.51. Yıllık İhracat Kazanımı (2023-2050, Milyar 2022ABD\$)



¹¹ Analizlerde yaklaşık 1,0 ABD\$/kg amonyak ve 6,5 ABD\$/kg hidrojen fiyatlarının uzun vadede sırasıyla 0,5 ABD\$/kg ve 1,8 ABD\$/kg'a düşeceği varsayılmıştır

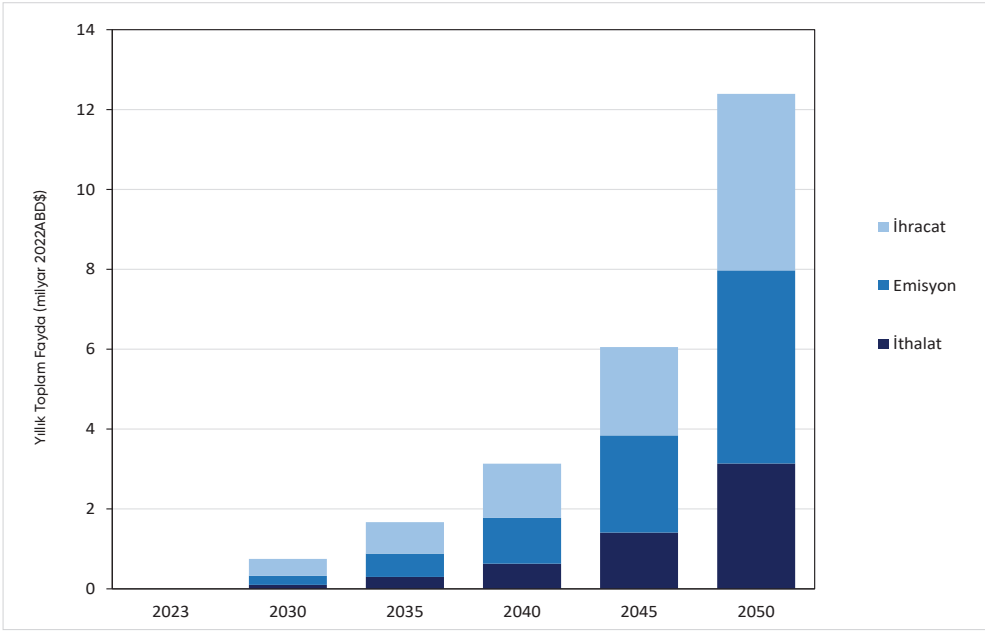
4.4. Bütüncül Fayda-Maliyet Gelişimi Analizleri

IICEC analizleri, yeşil hidrojen üretiminde ve kullanımında yaygınlaşmanın, enerji güvenliğini güçlendirme ve net-sıfır hedeflerine sağlayacağı katkılara ek olarak önemli ekonomik kazanımlar sunacağını göstermektedir. 2050 yılına kadar olan dönemde enerji ithalatında azalma, emisyonla ilişkili maliyetlerde tasarruf ve ihracat yoluyla sağlanabilecek kazanım toplamda 91,7 milyar 2022ABD\$'ına ulaşmaktadır (yıllık ortalama 3,5 milyar 2022ABD\$). Yıllık kazanım 2035 yılında 4,4 milyar 2022ABD\$ ve 2050 yılında 12,4 milyar 2022ABD\$ olarak gerçekleşmektedir. 2030-2050 döneminde ortalama yıllık 4,6 milyar 2022ABD\$ kazanım sağlanabilmektedir. Kümülatif kazanımların %23'ü ithal fosil yakıt tüketiminin ikamesinden, %38'i ise emisyon maliyetlerinde düşüşten sağlanmaktadır. 2050 yılına kadar olan dönemde toplam üretimin yaklaşık %30'una karşılık gelen ihracat yoluyla ekonomik kazanım, toplam ekonomik faydanın %39'una karşılık gelmektedir (Kümülatif 35,1 milyar 2022ABD\$, 2050 yılında 4,4 milyar 2022ABD\$) (Şekil 4.52 ve Şekil 4.53).

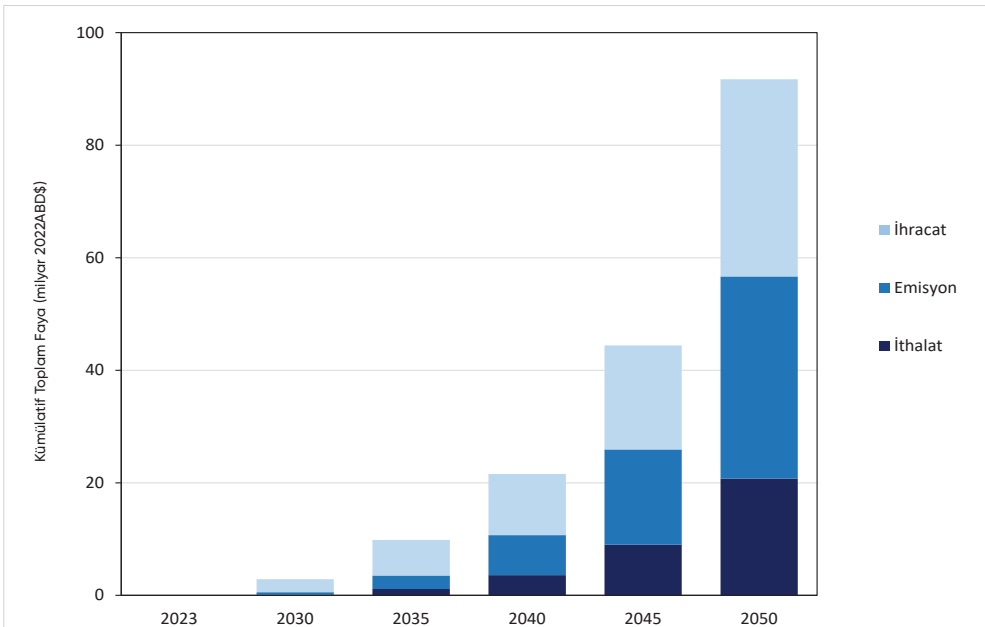
IICEC analizlerinde somut ekonomik faydaların yanı sıra maliyetlere ilişkin dinamikler de irdelenmiştir (Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56). Bu çerçevede, elektrolizör birim yatırım maliyetlerindeki gelecek öngörülerini ve rüzgar ve güneş yatırım maliyetlerine ilişkin beklentiler analiz edilmiş, ekosistemin üretimle tüketim arasındaki bileşenlerinde altyapı yatırımlarının muhtemel gelişimine yönelik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Teknolojilerde gelişim beklentileri, elektrolizör maliyetlerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Değer zincirinde en önemli belirsizliklerden olan altyapıda gelişimin hızının ve optimizasyonunun toplam maliyet seviyeleri bakımından kritik olacağı tespit edilmiştir.

- 2050 yılına kadar olan dönemde ağırlıklı bölümü elektrik üretimine odaklı olmak üzere, yıllık ortalama yaklaşık 3,0 milyar 2022ABD\$ yatırım gereksinimi bulunmaktadır (Elektrik üretimine 1,6 milyar 2022ABD\$, elektrolizör kurulumuna 0,8 milyar 2022ABD\$ ve diğer altyapılar için 0,6 milyar 2022ABD\$). Yıllık maliyet 2035 yılında 1,7 milyar 2022ABD\$ ve 2050 yılında 5,2 milyar 2022ABD\$ olarak gerçekleşmektedir.
- 2050 yılına kadar kümülatif yatırım gereksinimi 77,2 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmaktadır. Kümülatif yatırımların yarısından fazlasını temiz elektrik girdisini sağlayacak elektrik üretim yatırımları oluşturmaktadır (elektrik üretimi %56, elektrolizör ve diğer hidrojen altyapı yatırımları %44).
- Dönemsel elektrik talebinin üzerinde kesintili elektrik üretiminin gerçekleştiği, böylelikle mevcut kapasitelerde üretim fazlasının yeşil hidrojen üretim fırsatları için değerlendirilebileceği bir arz-talep gelişim senaryosunda ise, hidrojen üretimine özel kurulu güç gelişim ihtiyacında azalma, sunulan toplam maliyet seviyelerini düşürebilecektir.

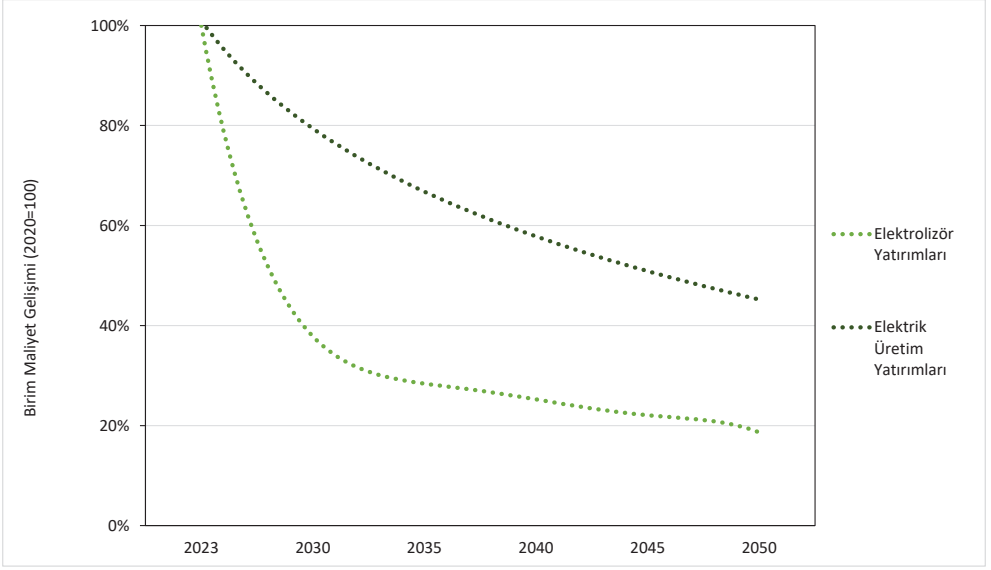
Şekil 4.52. Yıllık Toplam Fayda Gelişimi (2023–2050, Milyar 2022ABD\$)



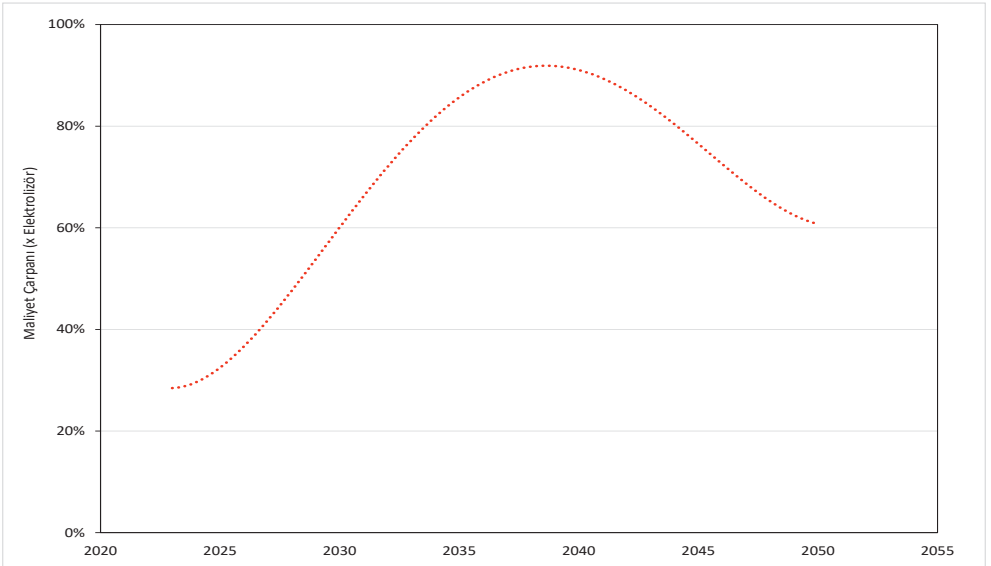
Şekil 4.53. Kümülatif Toplam Fayda Gelişimi (2023–2050, Milyar 2022ABD\$)



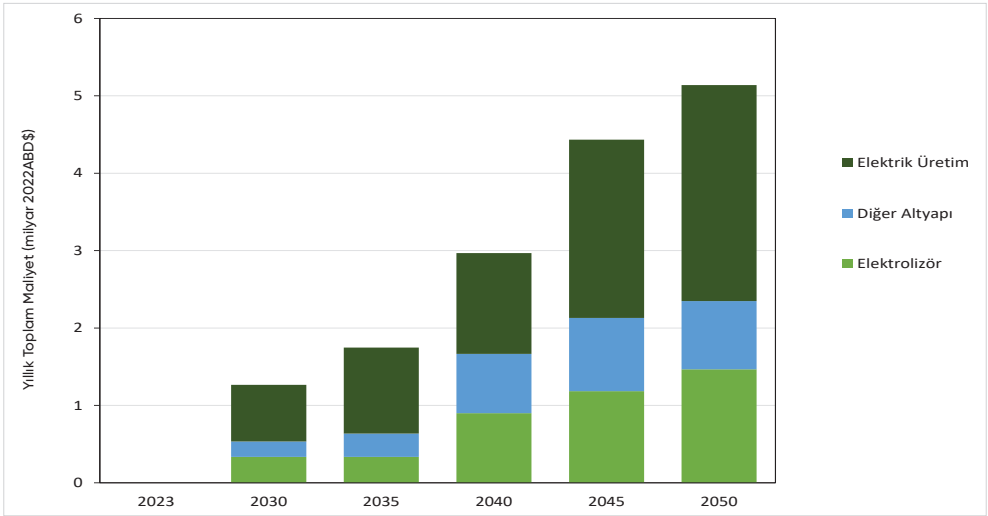
Şekil 4.54. Elektrolizör ve Elektrik Üretim Birim Maliyetlerinde Gelişim (2023-2050, 2023=100)



Şekil 4.55. Altyapı Maliyetleri Gelişim Perspektifi (2023-2050, Elektrolizör maliyeti çarpanı ile)



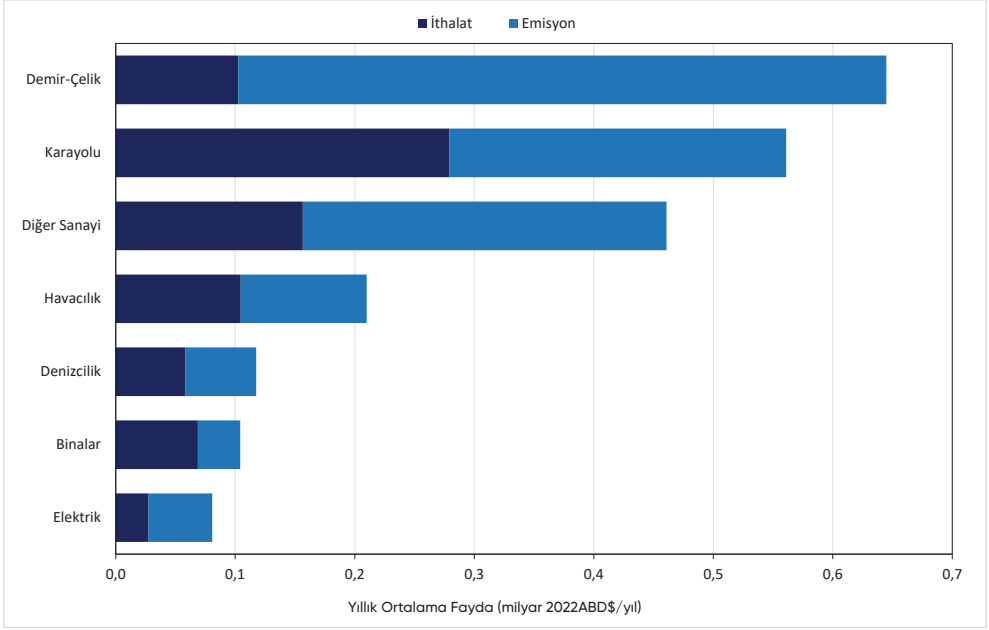
Şekil 4.56. Yıllık Toplam Maliyet Gelişimi (2023-2050, Milyar 2022ABD\$)



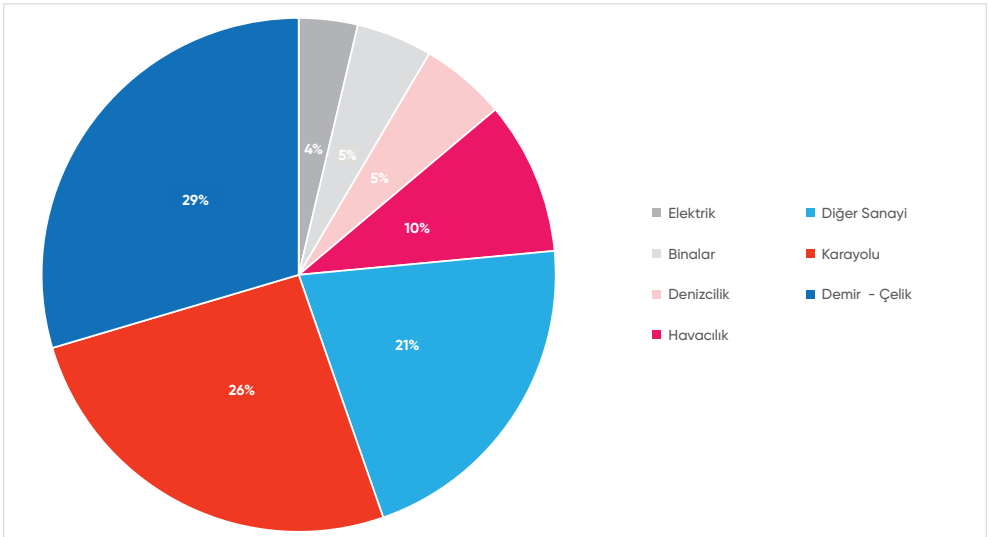
2050 yılına kadar olan dönemde sektörler bazında ithalat ve emisyon tasarruflarından ortalama yıllık kazanımlar Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de sunulmaktadır.

- Çelik sektörü en yüksek toplam yıllık ortalama kazanımı oluşturmaktadır (640 milyon 2022ABD\$/yıl veya yaklaşık %30). Bunu, talep büyüklüklerinin kırımına benzer şekilde karayolu ulaşımı ve diğer sanayi sektörlerinde yeşil hidrojen tüketiminde yaygınlaşmanın sağladığı ekonomik kazanımlar takip etmektedir (karayolu ulaşımı 560 milyon 2022ABD\$/yıl ve diğer sanayi sektörleri 460 milyon 2022ABD\$/yıl). Bu üç sektör, 2050 yılına kadar olan dönemde ortalama talebin yaklaşık %80'ini ve ortalama yıllık kazanımın yaklaşık dörtte-üçünü oluşturmaktadır.
- Çalışmadaki temel analizlere baz oluşturan fiyat serilerinde, fosil yakıt tasarrufundan kaynaklı kazanımlarda karayolu ulaşımı 280 milyon 2022ABD\$/yıl ile öne çıkarırken, çelik ve diğer sanayi sektörlerinde bu tutar sırasıyla 100 milyon 2022ABD\$/yıl ve 180 milyon 2022ABD\$/yıl olarak gerçekleşmektedir. Emisyon tasarruflarında ise, kömür tüketiminin yüksek karbon yoğunluğu ve ikame miktarı çerçevesinde çelik sektörü ilk sırada yer almaktadır (540 milyon ABD\$/yıl). Bunu sırasıyla diğer sanayi sektörleri (300 milyon 2022ABD\$/yıl) ve karayolu ulaşımı (280 milyon 2022ABD\$/yıl) izlemektedir. Havacılık ve denizcilikte toplam ithalat ve emisyon tasarrufu faydası yıllık ortalama 330 milyon 2022ABD\$ seviyesinde gerçekleşmektedir (%15). 2050 yılına kadar kümülatif 56,6 milyar 2022ABD\$ faydanın yaklaşık %90'ı ulaşım ve sanayi sektörlerde sağlanmaktadır. Binalar ve elektrik sektörü ise kazanımların yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir.

Şekil 4.57. Sektörler Bazında İthalat ve Emisyon Tasarruflarından Yıllık Ortalama Kazanımlar (2023-2050, Milyar 2022ABD\$/yıl)



Şekil 4.58. İthalat ve Emisyon Tasarruflarından Yıllık Ortalama Toplam Kazanımın Sektörel Dağılımı (2023-2050, %)

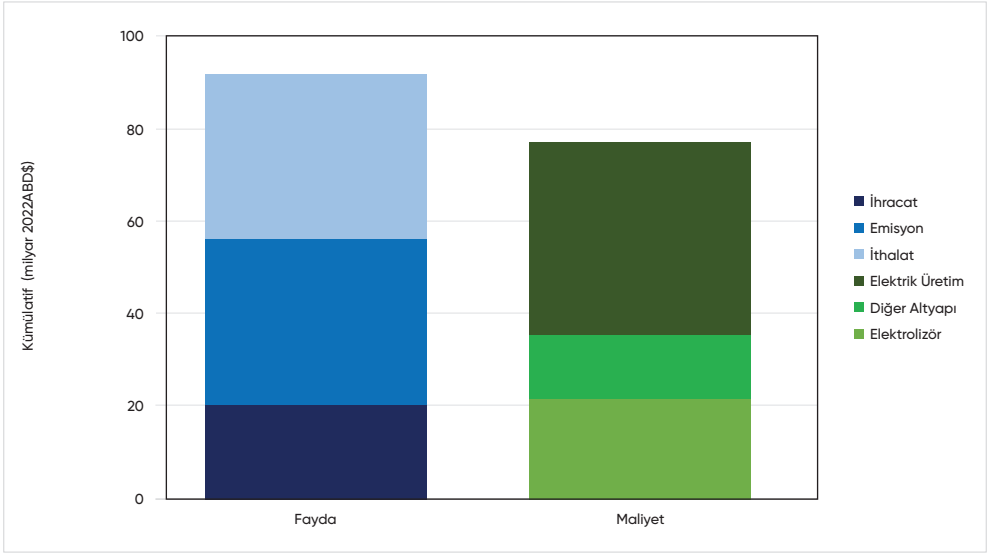


- 2050 yılına kadar olan dönemde yeşil hidrojenle gelişim perspektifiyle kümülatif olarak 77,2 milyar 2022ABD\$ yatırıma karşın 91,7 milyar 2022ABD\$ ekonomik fayda sağlanmaktadır.
- Yıllık fayda-maliyet çarpanı¹² 2035 yılında 1,0'e, 2045 yılında 1,5'a yükselmekte, 2050 yılında ise yatırımların çok yönlü faydalar yoluyla geri dönüşü sonucunda 2,4'e ulaşmaktadır.
- Kümülatif fayda-maliyet çarpanı ise 2045 yılında 1,0'e yaklaşmakta, 2050 yılında ise 1,2 olarak gerçekleşmektedir.
- 2050 yılına kadar olan dönemde ortalama yıllık 3,0 milyar 2022ABD\$ yatırım karşılığında 3,5 milyar 2022ABD\$ enerji ithalatı, emisyon ve yeşil hidrojen ihracatı faydası elde edilmektedir (Şekil 4.59, Şekil 4.60 ve Şekil 4.61).
- Fosil yakıtların ikamesiyle yıllar içerisinde artan ekonomik faydanın orta ve uzun dönemde gelişimi, petrol, doğal gaz, kömür ve karbon fiyatlarındaki dinamiklere bağlı olacaktır. IICEC analizlerinde fosil yakıt ve karbon fiyatlarının geleceğinde farklı fiyat gelişim serilerinin bütüncül ekonomik faydalara etkisi de irdelenmiştir. Yukarıda sunulan analizlere baz oluşturan IEA STEPS Senaryosu ile karşılaştırıldığında, IEA APS Senaryosunda yıllık ortalama ithalat ve emisyon tasarrufu faydası yaklaşık 200 milyon ABD\$/yıl daha yüksek gerçekleşmektedir (Kümülatif 4,4 milyar 2022ABD\$). Bu durumda yıllık fayda-maliyet çarpanı 1,3'e yaklaşmaktadır. Fosil yakıt ve karbon fiyatlarının mevcut seviyelerde devam etmesi durumunda ise toplam ekonomik fayda, baz analize oldukça yakın seviyede gerçekleşmektedir (Şekil 4.62).
- Çalışmada, orta ve uzun vadede enerji ve karbon fiyatları gelişimine ilişkin farklı fiyat serilerine ek olarak, fosil yakıt ithalat ağırlığının değişimi, hidrojen ve amonyak fiyatlarının bölgesel gelişimi, talep ve altyapıların gelişim hızı gibi önemli belirsizlikler de dikkate alınarak arz ve talebin fayda ve maliyet boyutlarına ilişkin çeşitli hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Yeşil hidrojen üretiminin öncelikle sektörlerin gelecekteki taleplerinin karşılanmasında değerlendirilmesine, ihracat yoluyla da üretim hacimlerindeki payın üzerinde ekonomik fayda sağlanabilmesine öncelik verilen IICEC analizlerinde, iç talepte \pm %20 değişim fayda-maliyet çarpanını $-$ %16 değiştirmektedir. IICEC analizleri, son dönemde yoğunlaşan çalışmalar neticesinde petrol ve doğal gazda ithalat payının önümüzdeki dönemde belirgin şekilde azalmasına yönelik hedefleri yansıtmaktadır¹³. İthal fosil yakıt oranının mevcut seviyelerde kalması durumunda fayda-maliyet çarpanı 1,3'e yükselmektedir. Altyapı maliyetlerinde %20 artışta fayda-maliyet çarpanı yaklaşık %5 düşerken, hidrojen ve amonyak ihracat fiyatlarında +%20 değişim durumunda fayda-maliyet çarpanı %8 farkla yaklaşık 1,3 olarak gerçekleşmektedir (Şekil 4.63).

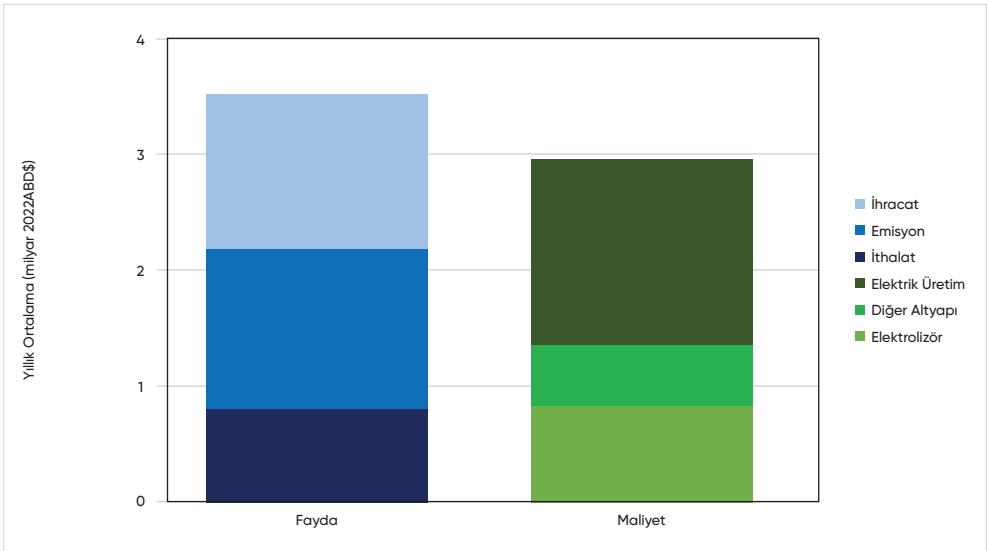
¹² Fayda-maliyet çarpanı, yıllık ve kümülatif ekonomik faydanın yıllık ve kümülatif maliyete oranını göstermektedir.

¹³ Petrol ve doğal gazda sırasıyla %90 ve %99'dan 2050 yılına kadar olan dönemde gelecekteki taleplerin %60-65'ine.

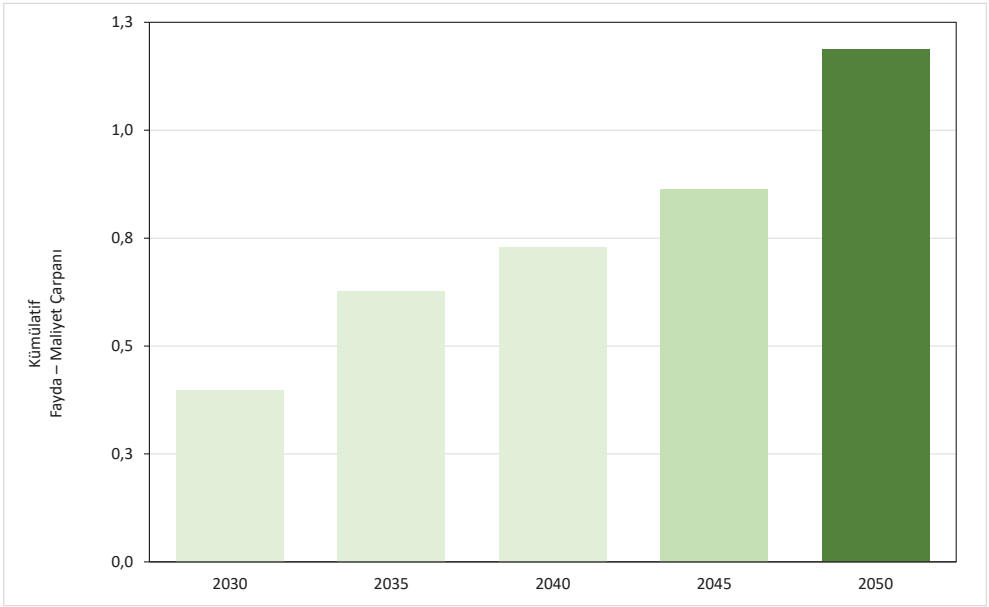
Şekil 4.59. Kümülatif Fayda-Maliyet Gelişimi (2023-2050, Milyar 2022ABD\$)



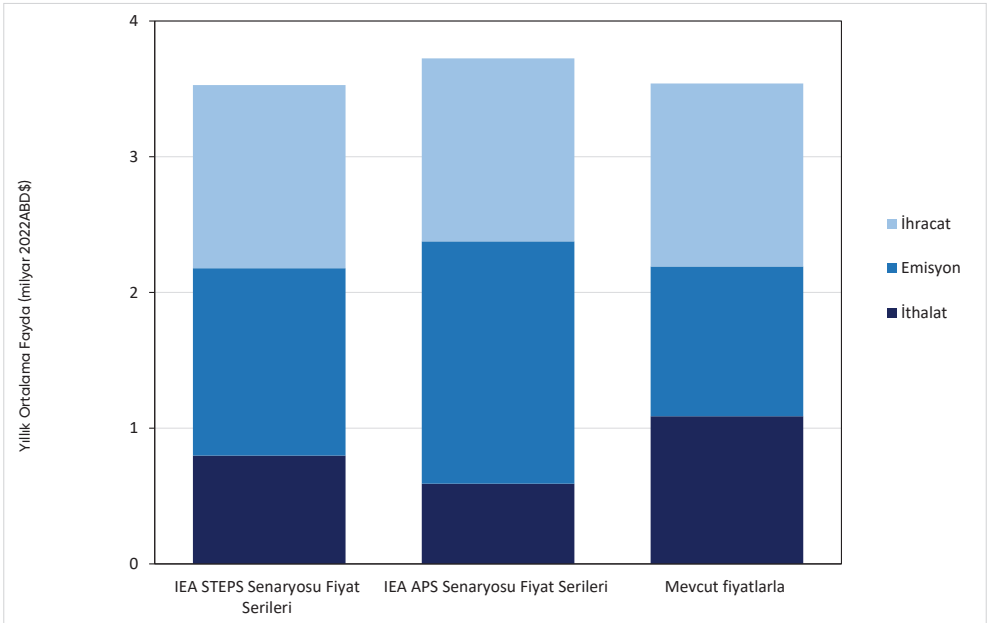
Şekil 4.60. Yıllık Ortalama Fayda-Maliyet Gelişimi (2023-2050, Milyar 2022ABD\$/y)



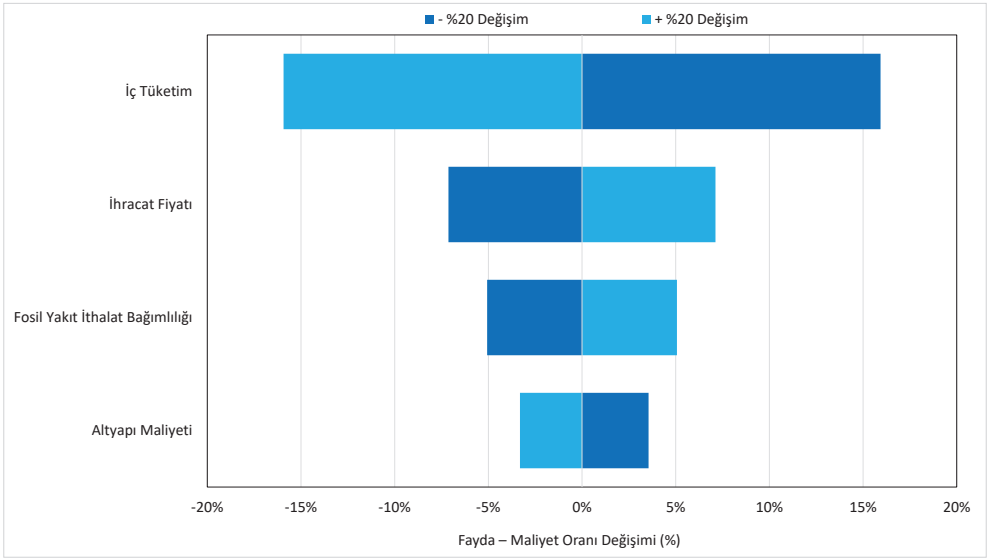
Şekil 4.61. Kümülatif Fayda-Maliyet Çarpanı Gelişimi (2023-2050)



Şekil 4.62. Farklı Fosil Yakıt ve Karbon Fiyat Serilerinde Yıllık Ortalama Fayda (2023-2050, milyar 2022ABD\$/y)



Şekil 4.63. Fayda-Maliyet Çarpanı Hassasiyet Analizleri



4.5. Diğer Kritik Faydalar

Yeşil hidrojenle büyüme fırsatları, teknolojik gelişim ve yerleşme bakımından önemli fırsatları da beraberinde getirecektir. IIcec, teknoloji geliştirme ve yerleşme alanlarının Türkiye'nin enerji güvenliği, enerji dönüşümü ve geniş ölçekte sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyecek bir hidrojen gelişim stratejisinde en kritik unsurlardan birini oluşturacağını değerlendirmektedir. Dünyada teknoloji gelişim yarışının hız kazandığı bir dönemde, hidrojen ekosisteminde teknoloji-odaklı büyüme Türkiye için çok yönlü kazanımları beraberinde getirecektir. Yerli kaynaklara dayalı hidrojen üretimi yoluyla enerji güvenliğinde sağlanacak iyileşmeler, teknoloji ve ekipman üretimi gelişmeleri ile desteklenmesi durumunda daha fazla pekişecektir.

Özellikle elektrolizör, depolama ve yakıt hücresi teknolojilerinde son dönemde gelişmeye başlayan kamu, sanayi ve teknoloji girişimlerinin ve iş birliklerinin sürdürülmesi önemlidir. Bölüm 2'de sunulduğu gibi, hidrojen teknolojileri bütüncül değer zinciri içerisinde geniş bir spektrumda gelişmektedir. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasında tanımlanmış teknoloji öncelik alanları ve ölçeklenme hedefleri, hidrojen teknolojilerinde çok yönlü fırsatlar için önemli bir zemin oluşturmaktadır. Elektrolizör, depolama ve diğer kritik teknolojilerde yenilikçi yerli imalat fırsatlarını destekleyecek yatırım ve iş modelleri, hidrojen ekosisteminin büyümesinde yerleşme ve rekabetçiliği artırılabilecektir. Rüzgar ve güneşte son dönemde sağlanan imalat yetkinliklerinin bu kapsamda önemli bir deneyim süreci oluşturduğu düşünülmektedir.

4.6. Özet Değerlendirme

- Yeşil hidrojen üretiminde Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki elektrolizör kurulum hedeflerini temel alan IICEC modeli ve analizlerinde (2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW ve 2053 yılında 70 GW), 2050-2053 yıllarına kadar olan dönemde 50-70 GW¹⁴ elektrolizör kapasitesine ulaşan bir büyüme patikasında teknolojilerin, talep sektörlerinin, üretimde ve tüketimde kapasite kullanım oranlarının, hidrojen üretiminin ekonomisinin, rekabetçiliğinin ve diğer ilgili faktörlerin gelişimine ilişkin teknolojik analizler gerçekleştirilmiştir.
- Mevcut teknolojilerle günümüzde yeşil hidrojenin şebeke elektriğinden üretim maliyeti 8,5-9 ABD\$/kg¹⁵ aralığında olup, mevcut doğal gaz maliyetlerinin enerji eşdeğeri cinsinden 5-6 katına karşılık gelmektedir. Üretimin rekabetçiliği için en kritik unsur elektrik girdi maliyetlerinin gelişimi olacaktır. Hedeflenen maliyet seviyeleri (2035 yılında 2,4 ABD\$/kg ve 2053 yılında 1,2 ABD\$/kg), sırasıyla 30 ABD\$/MW-saat ve 10-15 ABD\$/MW-saat elektrik maliyetleri gerektirmektedir. Yeşil hidrojen, mevcut doğal gaz fiyat seviyelerinde gri hidrojenle 2030, doğal gazla 2040 civarında başa baş noktasına gelmektedir. Karbon maliyetlerinde daha hızlı yükseliş veya fosil yakıt fiyatlarının gelecekte daha yüksek seyretmesi halinde rekabetçilik daha erken gerçekleşebilecektir.
- Karbondan arındırılması zor olan sektörlerde hidrojen talebinin muhtemel gelişimi, sektörel dinamikler çerçevesinde analiz edilmiştir. Elektrolizör kapasitesinde, özellikle 2035 sonrası dönemde çok hızlı büyüme hedefini yansıtan analizlerde, üretim 2030 yılından itibaren her beş yılda yaklaşık iki kat artış göstermektedir. Türkiye yeşil hidrojen üretiminin 2035 yılında 0,6 Mt ve 2050 yılında 5,5 Mt seviyesinde gerçekleşebileceği öngörülmektedir. 2050 yılında öngörülen talep, küresel yeşil hidrojen talebinin yaklaşık %2'sine karşılık gelmektedir.
- Mevcutta gri hidrojen tüketicileri olan rafineri ve gübre sektörlerinde dönüşümün ve AB Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının etkileriyle özellikle 2030 sonrası dönemde, çelik başta olmak üzere fosil yakıt yoğunluğu yüksek, aynı zamanda Türkiye'nin ihracatta rekabetçiliği bakımından kritik olan sanayi sektörlerinin talepteki ilk önemli büyüklükleri oluşturması beklenmektedir. Otomotiv sektörünün dünyadaki ve Avrupa'daki gelişmeler ile uyumlaşması, lojistikte Türkiye'nin konumu, mobilitede temiz enerji yönelimleri gibi dinamikler neticesinde karayolu, havacılık ve denizcilikte talebin de özellikle 2030-2035 sonrasında hızlanması öngörülmektedir.

¹⁴ IEA NZE (Net Zero Emissions) Senaryosunda 2050 yılında öngörülen küresel elektrolizör kapasitesinde %1,5 pay.

¹⁵ Seviyelendirilmiş Hidrojen Üretim Maliyeti (Levelized Cost of Hydrogen)

2050 yılında 3,8 Mt toplam yeşil hidrojen talebinin yaklaşık %90'ının rafineri ve petrokimya dahil sanayi sektörlerinde ve ulaşımda gerçekleşmesi beklenmektedir.

- Yeşil hidrojen tüketimi 2050 yılında ulaşımda enerji talebinin %11'ine, sanayide enerji talebinin ise %8'ine yükselmektedir. Yeşil hidrojenin, Türkiye'nin toplam nihai enerji tüketiminin 2035 yılında binde yedisine, 2040 yılında %1'ine ve 2050 yılında %6'sına karşılık geleceği hesaplanmaktadır. IICEC analizlerine göre, temiz elektrifikasyon, doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil hidrojenin toplam nihai enerji talebine katkısı 2050-2053 yıllarına kadar %70-75'e çıkabilmektedir (Son dönemde %10-15).
- Üretim ve tüketimde gelişim perspektifi, Türkiye'nin yeşil hidrojen potansiyel tüketici sektörlerin talebinin karşılanması öncelikli olacak şekilde ihracatçı konum da sağlayabileceğini göstermektedir (2035 yılında 0,2 Mt ve 2050 yılında 1,7 Mt hidrojen eşdeğeri ihracat). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki ihracat vizyonu da uyumlu olan bu büyüme patikasında 2050 yılına kadar kümülatif üretiminin yaklaşık %30'u, ağırlıklı bölümü amonyak olmak üzere Avrupa'ya ihracat yoluyla değerlendirilebilmektedir. Orta ve uzun vadede boru hatlarındaki gelişmeler de ihracatı çeşitlendirebilecektir. İhracatta gelişim yoluyla Türkiye AB'nin toplam yeşil hidrojen ithalatında 2050 yılına kadar ortalama %3 pay alabilecektir (2050 yılında %8).
- Sunulan yeşil hidrojen gelişimi patikası, 2035 yılına kadar yaklaşık 15 GW ve 2050 yılına kadar 90 GW'ın üzerinde ilave yenilenebilir enerji kurulu gücü geliştirilmesini gerektirmektedir. Yeşil hidrojen üretimini temin edecek elektrik girdisi, Türkiye toplam brüt elektrik üretiminin 2035 yılında %6'sına ve 2050 yılında yaklaşık %20'ine karşılık gelmektedir. Hidrojen depolamanın, elektrik sektörünün artan esneklik gereksinimleri içerisinde orta ve uzun dönemde elektrik arz güvenliği ve yenilenebilir enerjide güçlü büyüme bakımından önemli bir seçenek konumuna ulaşması beklenmektedir.
- Yeşil hidrojen arz ve talep dengesinin gelişiminden azami ekonomik faydanın sağlanabilmesinde, elektrik sisteminde yakın, orta ve uzun dönem büyüme hedeflerinin ve arz güvenliği önceliklerinin de mutlaka gözetilmesi, elektrik ve hidrojen üretimi için entegre planlama yaklaşımlarının ve yol haritalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, yenilikçi nükleer teknolojilerinden pembe hidrojen üretimi potansiyeli, yerli fosil kaynaklara entegre karbon teknolojilerindeki gelişime dayalı mavi hidrojen üretimi fırsatları ve talepte büyüme hızına ilişkin bazı belirsizlikler yeşil hidrojen arz-talep dengesinin orta ve uzun vadede gelişimini etkileyebilecektir.

- Türkiye, yeşil hidrojen gelişim patikasında özellikle 2030-2035 sonrası dönemden itibaren çok boyutlu enerji ve iklim faydaları sağlayabilecektir. 2050 yılına kadar olan dönemde yeşil hidrojenin petrol ürünleri, doğal gaz ve kömürü ikamesi yoluyla fosil yakıt tüketiminde toplam 81 Mtep tasarruf gerçekleştirilebilmektedir (nihai enerji tüketiminin mevcut yıllık fosil yakıt tüketimine eşdeğer). Bu tasarruf, 2050 yılına kadar enerji ithalat faturasında yıllık ortalama 0,8 milyar 2022ABD\$ düşüğe karşılık gelmektedir¹⁶ (2050 yılında 3,1 milyar 2022ABD\$). 2050 yılında, aynı dönemde sera gazı emisyonlarında 287,2 Mt CO₂-eş azaltım gerçekleşmekte, yeşil hidrojenle büyüme net-sıfır hedefini desteklemektedir (Mevcut durumda karbondan arındırılması zor sektörlerin emisyon envanteri 79,5 Mt CO₂-eş). 2050 yılına kadar olan dönemde bunun karşılığı ise 1,4 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmaktadır¹⁷ (2050 yılında 4,8 milyar 2022ABD\$). Dolayısıyla, bu iki alanda yılda ortalama 2,2 milyar 2022ABD\$ ekonomik fayda sağlanabilmektedir. AB'ye ihracat ile sağlanabilecek ekonomik fayda ise yıllık ortalama 1,3 milyar 2022ABD\$ olarak hesaplanmaktadır (2050 yılında 4,4 milyar 2022ABD\$). Üretimin %30'una karşılık gelen AB'ye ihracat, 2050 yılına kadar toplam ekonomik faydanın yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır.
- Hidrojen ekosisteminde büyümeyi sağlayacak yatırımların maliyetlerinin irdelendiği IICEC analizlerinde, 2050 yılına kadar yaklaşık yarısı elektrik üretimine odaklı olmak üzere, yıllık ortalama yaklaşık 3 milyar 2022ABD\$ yatırım gereksinimi tespit edilmiştir (Elektrik üretimine 1,6 milyar 2022ABD\$, elektrolizör kurulumuna 0,8 milyar 2022ABD\$ ve diğer altyapılar için 0,6 milyar 2022ABD\$).
- 2050 yılına kadar olan dönemde yıllık ortalama 3 milyar 2022ABD\$ yatırım karşılığında 3,5 milyar 2022ABD\$ enerji ithalatı, emisyon ve yeşil hidrojen ihracatı faydası elde edilmektedir (Kümülatif 91,7 milyar 2022ABD\$ ve 77,2 milyar 2022ABD\$). Yıllık fayda-maliyet çarpanı 2,4'e, kümülatif fayda-maliyet çarpanı 1,2'ye ulaşmaktadır. Yıllık fayda-maliyet çarpanı 2035 yılında 1'e yaklaşmakla birlikte, kümülatif olarak maliyetlerin üzerinde fayda sağlanması 2045 civarında gerçekleşmektedir. Bu analizler, yeşil hidrojenin geleneksel, fosil yakıtı dayalı alternatiflerle maliyet bazında tam rekabetçi konuma gelmesinin zamanlamasıyla da geniş ölçüde uyum göstermektedir. Teknolojide daha hızlı gelişme, altyapı planlamasında verimlilik gibi faktörler bunu daha erkene çekebilecektir.

¹⁶ IEA STEPS Senaryosu emtia fiyat serileriyle. IEA APS Senaryosuna göre 0,6 milyar 2022ABD\$. IICEC analizleri petrol ve doğal gazda yerli üretimde artış perspektifini dikkate almakta, fosil yakıt ithalat oranları zaman içerisinde üçte-ikiye düşmektedir. Fosil yakıt arzında mevcut ithalat yoğunluğu oranlarının devam etmesi durumunda 1,1 milyar 2022ABD\$.

¹⁷ IEA STEPS Senaryosu karbon fiyat serileriyle. IEA APS Senaryosuna göre 1,8 milyar 2022\$.

- Yeşil hidrojenin büyüyen enerji sektörüne en önemli katkılarından birisi, enerji arzında yerleşme ve çeşitlendirme yoluyla enerji arz güvenliğinin desteklenmesi olacaktır. Ekosistemin gelişimiyle birlikte teknolojilerde yerleşme gibi alanlardaki kritik kazanımların da fayda-maliyet çarpanını yükselteceği, makro perspektifte yatırımların geri dönüşünü hızlandıracağı değerlendirilmektedir.

Referanslar

- European Commission (2023), Customs & Tax EU Learning Portal
<https://customs-taxation.learning.europa.eu/course/view.php?id=757§ion=10>
- International Energy Agency (IEA) (2023a), Global Hydrogen Review 2023
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023b), World Energy Outlook 2023
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Energy Agency (IEA) (2023c), Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach, 2023 Update
<https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2020), Turkey Energy Outlook 2020
<https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/teo>
- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2021), Türkiye Elektrikli Araçlar Görünümü
<https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/tevo>
- Sabancı University Istanbul International Center for Energy and Climate (IICEC) (2022), Türkiye Yenilenebilir Enerji Görünümü
<https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/treo>
- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) (2023) On İkinci Kalkınma Planı
https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/11/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_17112023.pdf
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) (2023), Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri
<https://iklim.gov.tr/tuik-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri-yayinlandi-haber-1122>

- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) (2022), Türkiye Ulusal Enerji Planı
https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf
- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (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
- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Enerji Denge Tabloları
<https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2023), Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990–2021
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672&dil=1>
- Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (TCMB) (2023), Ödemeler Dengesi İstatistikleri
<https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Odemeler+Dengesi+ve+Ilgili+Istatistikler/Odemeler+Dengesi+Istatistikleri/>
- Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı (TB) (2023a), Yeni Başımızdaki Dev Pazar Avrupa Birliği
<https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/avrupa-birligi/yani-basimizdaki-dev-pazar-avrupa-birligi>
- Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı (TB) (2023b), Ticaret Bakanlığı SKDM Bilgilendirme Sunumları
<https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/ab-sinirda-karbon-duzenleme-mekanizmasi/ticaret-bakanligi-skd-m-bilgilendirme-sunumlari>
- Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM) (2023), İhracat 2023 Raporu
https://tim.org.tr/files/downloads/Strateji_Raporlari/TIM_Ihracat_2023_Raporu.pdf

BÖLÜM 5:
Gelişim Alanları
&
Öneriler

5.1. Yeşil Hidrojende Verimli, Teknoloji-Odaklı, Sürdürülebilir Büyüme için Destekleyecek Gelişim Alanları

Dünyada son dönemde enerji, iklim, sanayi ve teknoloji politikalarında ve yatırımlarında öne çıkan dinamikler, Türkiye'nin çok yönlü kalkınma, enerji, iklim ve teknoloji-odaklı sanayi stratejilerinde yeşil hidrojenin önemini artırmıştır. Yeşil hidrojenin güçlü yönlerini ve yüksek gelişim potansiyelini odağına alan bu çalışmada sunulan çok boyutlu katkıların gerçekleştirilmesi için çeşitli alanlarda önemli iyileşmeler sağlanması gerekmektedir. Türkiye'nin enerji arz güvenliği ve net-sıfır hedefleri içerisinde yeşil hidrojen gelişimine yönelik mevcut stratejilerin, ekosistemdeki yönelimlerin, yeni girişimlerin, fırsatların ve zorlukların, dünyadaki iyi uygulama örneklerinin, trendlerin irdelenmesi ve IICEC tekno-ekonomik analizlerinin çıktılarını kapsamında tespit edilen kritik gelişim alanları aşağıda özetlenmektedir (Şekil 5.1):

1. Politika hedefleri ve yol haritaları
2. Bütüncül planlama ve altyapılarda gelişim
3. Piyasalarda gelişim
4. Teknolojiler ve yerleşme
5. Uluslararası ve bölgesel iş birlikleri
6. Geniş ölçekte sürdürülebilirlik
7. İnsan kaynakları ve girişimcilik

Şekil 5.1. Gelişim Alanlarına Genel Bakış

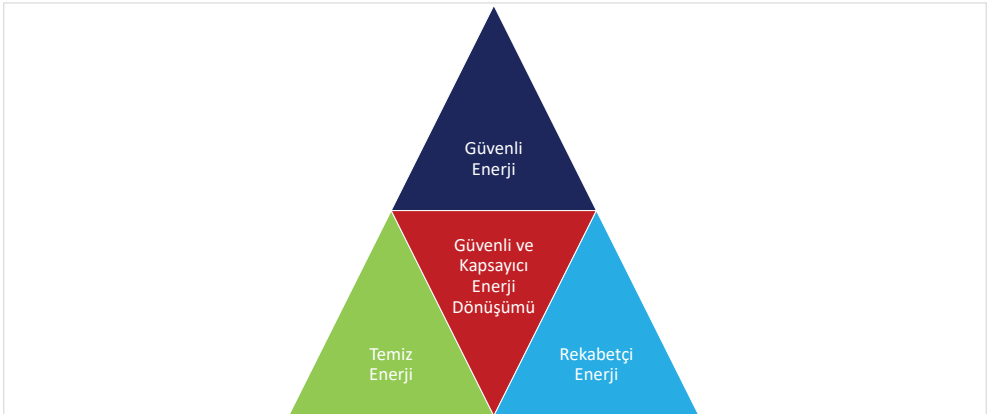


5.2. Politika Hedefleri ve Yol Haritaları

Türkiye'nin enerji stratejilerinde, arz güvenliği, yerleşme, rekabetçilik hedefleri doğrultusunda önemli adımlar atılmaya devam ederken net-sıfır hedefi ile birlikte daha güvenli ve temiz enerji geleceğine yönelik kapsamlı bir enerji dönüşümü sürecine girilmiştir (Şekil 5.2). Bu dönüşüm içerisinde, yenilenebilir enerjide güçlü büyüme, enerji verimliliği performansında artış, batarya ve e-mobilite ekosistemlerinde teknoloji-odaklı büyüme, nükleer elektrik üretiminde gelişme, temiz elektrifikasyonun tüm sektörlerde yaygınlaşması gibi bileşenler öne çıkmaktadır. Enerji sektöründe ithal fosil yakıt yoğunluğunun ve enerji ithalat faturasının azaltılmasını, kaynak ve teknoloji çeşitlendirmesini ve arz güvenliğinin güçlendirilmesini ve sektörün net-sıfır hedeflerine yönelik dönüşümünü eş zamanlı olarak destekleyebilecek bu alanlarda, teknoloji-odaklı gelişme ve çok yönlü büyüme fırsatları bulunmaktadır.

Yeşil hidrojenin de, karbondan arındırılması zor olan sanayi sektörlerinde, ulaşım kollarında ve geleceğin elektrik sistem dinamikleri içerisinde yer almasına yönelik önemli fırsatlar bulunmaktadır. Küresel ve bölgesel gelişmeler, ulusal kalkınma, enerji, iklim ve sanayi politikalarında belirlenen öncelikler, sanayide son dönemdeki yeni girişimler çerçevesinde hidrojen ekosisteminde gelişim odağı da güçlenmektedir. Türkiye'nin dinamik enerji piyasası, enerji talebindeki büyüme ve güçlü yenilenebilir enerji potansiyeli, yeşil hidrojen üretimi ve ilgili teknolojilerin gelişimi bakımından önemli bir zemin oluşturmaktadır. Yeşil hidrojen talebi ve ithalat ihtiyacı yüksek olan Avrupa pazarlarına yakınlık da gelecekte iç tüketim sektörlerinin kullanımı öncelikli olmak üzere yeşil hidrojeninde ihracat bakımından enerji ticaret merkezi perspektifi içerisinde yeni fırsatlar getirmektedir. Politika belgelerindeki öncelikler de bu vizyonu desteklemektedir. 12. Kalkınma Planı ve Türkiye Ulusal Enerji Planı, yeşil hidrojenin üretimi, tüketimi ve ilgili teknolojilerde gelişimine yönelik önemli perspektifler içermektedir. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, teknolojilerin gelişimine yönelik kritik ihtiyaçları tespit ederken bazı alanlarda sayısal hedefler de sunmaktadır.

Şekil 5.2. Enerji Dönüşümü için Kritik Başarı Faktörleri



Bu çalışmada sunulan yeşil hidrojenle büyüme perspektifi ve sağlanabilecek çok boyutlu kazanımlar, üretimde, talepte ve ilgili altyapılarda sürdürülebilir gelişimi destekleyecek detaylı stratejilerin ve yol haritalarının, sektörler ve bölgeler bazında belirlenmesi ve uygulanması ile sağlanabilecektir (Şekil 5.3). Bu yönde gelişmeler ekosistemin genelinde öngörülebilirliği artıracak, sürdürülebilir yatırım ve iş modellerini temin ederek enerji güvenliği, temiz enerji dönüşümü ve teknoloji-odaklı ve yüksek katma değerli büyüme hedeflerini destekleyecektir.

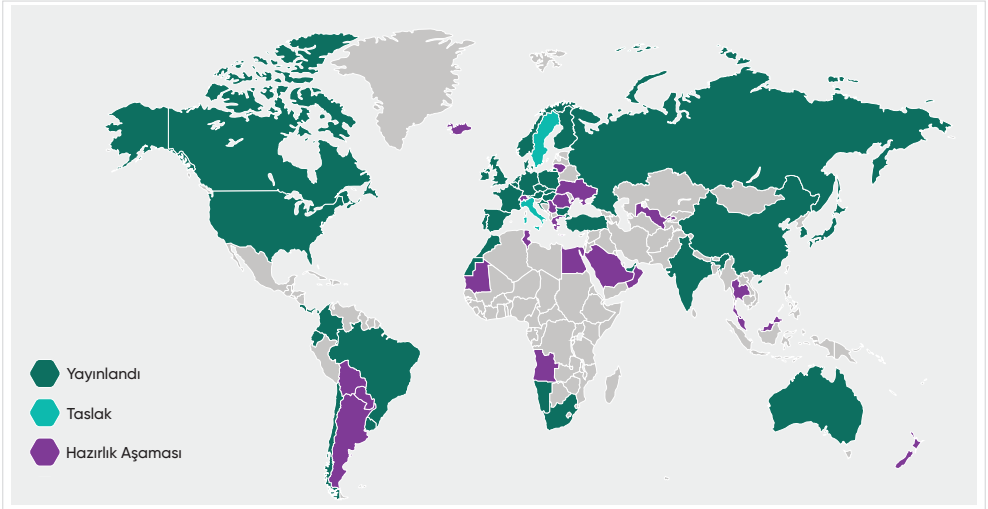
IICEC, dünyadaki iyi uygulama örnekleri ve Türkiye'nin güçlü yönleri dikkate alınarak yol haritalarının gelişiminde aşağıdaki unsurların yer almasını önermektedir (Şekil 5.4):

- Yakın, orta ve uzun dönemde hedeflenen arz ve talep büyüklükleri, bunu karşılayacak yenilenebilir elektrik ve su girdisi,
- Talebin potansiyel tüketici sektörlerine göre gelişimine ilişkin öncelikler ve sayısal hedefler,
- Elektrifikasyon ve doğal gaz altyapıları ile etkileşimler,
- Optimal altyapı gelişimi planlaması,
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasında belirlenen teknolojik gelişim ihtiyaçlarına ve fırsatlara yönelik yatırım ihtiyaçları ve iş birlikleri modelleri,
- Su kullanımı, tedarik zincirlerinin güvenliği, verimli kaynak kullanımı gibi, enerji ve doğal kaynaklarda güvenlik, enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik bakımından kritik diğer alanlarda öncelikli eylemler,
- Yönetişime, kurumsal kapasitelere ve insan kaynağı gelişimine ilişkin öncelikler,
- Sistem seviyesinde azami güvenliğe ilişkin ilkeler ve uygulamalar,
- Yeşil hidrojenle gelişimle sağlanabilecek çok yönlü ekonomik kazanımlar ile desteklenebilecek teşvikler ve diğer teknik ve finansal destek modelleri.

Şekil 5.3. Yeşil Hidrojen Geleceğinde Sürdürülebilir Büyüme ile Çok Boyutlu Fırsatlar



Şekil 5.4. Hidrojen Politika ve Stratejilerinin Küresel Gelişimine Bakış¹



Kaynak: Hydrogen Europe, 2023

¹ https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2023/10/Clean_Hydrogen_Monitor_11-2023_DIGITAL.pdf

5.3. Bütüncül Planlama ve Altyapı Gelişimi

Yeşil hidrojeninde bu çalışmada sunulan gelişim perspektifinin ve çok yönlü faydaların sağlanabilmesi için bütüncül bir planlama perspektifine ve kapsamlı bir altyapı gelişimine gereksinim bulunmaktadır. Yeni bir gelişim alanında büyüme alanlarının planlanması, rasyonel kaynak kullanımını sağlayacak ve arz-talep dengesinde sürdürülebilir gelişimi temin edecektir. Bu durum, değer zincirinin tamamını kapsayan bir master planlamanın uygulamaya geçirilmesi ile olanaklı olabilecektir.

IICEC, yenilenebilir enerji kaynaklarında öncelik verilecek alanlar, su tüketiminin planlanması, büyük talep merkezleri ve tüketim ihtiyaçları gibi faktörlerin bütüncül bir yaklaşım içerisinde dikkate alınmasını, bölgesel ve sektörel öncelikleri belirleyen bir planlama yaklaşımı içerisinde değer önermesi yüksek alanlardan başlanacak şekilde altyapı ve yatırım gereksinimlerinin detaylı olarak belirlenmesini önermektedir. Üretimden nihai tüketime kadar olan süreçlerde ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları kapsayan bir master planlamanın hazırlıkların da geniş paydaş katılımının sağlanmasının da önemli bir başarı faktörü olacağı düşünülmektedir.

Bütüncül planlama perspektifi ve altyapılarda gelişim bakımından kritik gelişim alanları aşağıda sunulmaktadır (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6):

Öncelikli sektörler ve kullanım alanlarının belirlenmesi: Master planlama yaklaşımının ilk aşamada yeşil hidrojen kullanımından azami faydayı sağlayacak sektörler ve kullanım alanlarına ilişkin öncelikleri içermesi ve tedrici büyüme alanlarına doğru genişlemesinde yarar görülmektedir.

Öncelikli üretim ve arz fırsatlarının belirlenmesi: Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bölgeleri yeşil hidrojeninde büyümenin ana omurgasını oluşturacaktır. Bu kapsamda rüzgar ve güneş üretim birimleri, ilgili elektrik altyapıları, su kullanımına ilişkin analizler ve planlamalar, depolama ve taşıma seçenekleri, bütüncül arz planlamasının ana bileşenlerini oluşturacaktır.

Elektrik ve doğal gaz sistemleri ile entegrasyon sağlanması: Yeşil hidrojeninde gelişiminden hedeflenen çok yönlü katkıların sağlanabilmesi için elektrik ve doğal gaz sistemleri ile entegrasyona ilişkin planlamalar kritik role sahip olacaktır. Elektrik sektöründe kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarında yüksek büyüme esneklik ihtiyaçlarını artırırken, hidrojen çözümleri özellikle uzun dönemli depolama avantajları ile öne çıkacaktır. Elektrik talebinin de elektrikli araçlarda yaygınlaşma ve ısı pompası piyasasının gelişimi gibi faktörlerle zamana bağlı olarak daha değişken özelliklere sahip olmasıyla, hidrojen depolamanın kısa dönemli sistem esnekliğine katkısı da pekişecektir. Doğal gaz sistemine hidrojen karışımına yönelik tekno-ekonomik çalışmaların sürdürülmesi bütüncül sistem perspektifi içerisinde arz altyapılarında çeşitlendirmeye katkı sunabilecektir. Avrupa'da son dönemde önemli gelişmeler sağlanan European Hydrogen Backbone² girişimine entegrasyona ilişkin fırsatların irdelenmesinde de yarar görülmektedir.

² <https://ehb.eu/>

TANAP boru hattına hidrojen entegrasyonu orta ve uzun vadede Türkiye enerji sistemi ve Avrupa ile entegrasyon alanlarında çok yönlü fırsat alanları sunabilecektir.

Mevzuat altyapısının geliştirilmesi: Hidrojene ilişkin standartlar, sertifikasyon ve diğer düzenlemeler, mevzuat çerçevesinin ilk adımlarını oluşturacaktır. Uluslararası iyi uygulama örneklerinden yararlanılması, teknolojilerde ve uygulamalarda gelecekteki gelişime paralel gelişebilecek yeni ihtiyaçların dinamik bir düzenleyici çerçevede içerisinde yönetilebilmesi, verimli, öngörülebilir ve sürdürülebilir büyüme için önemli bir unsur olacaktır.

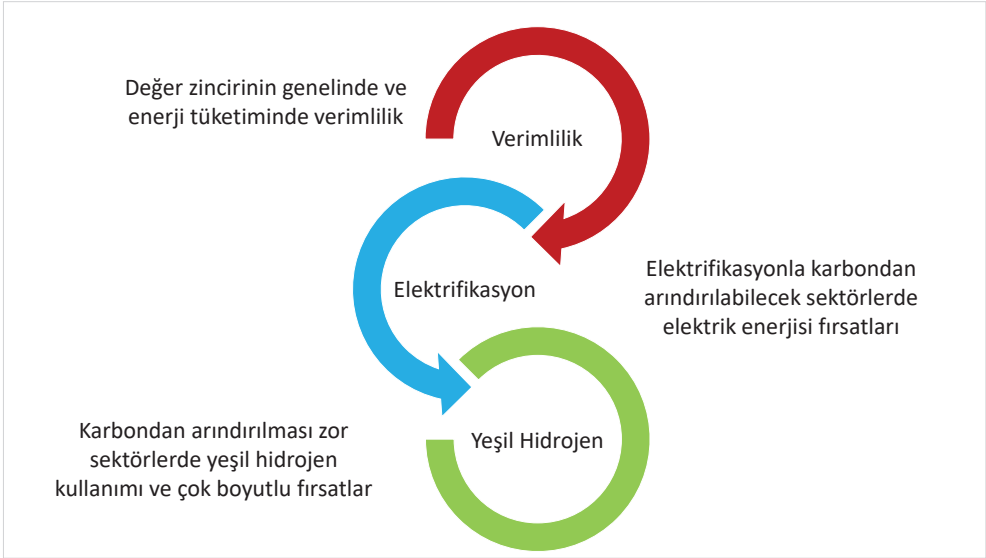
Yetkin mühendislik ve azami güvenlik yaklaşımları: Yeşil hidrojenin üretiminden tüketimine tüm süreçlerinde kapsamlı mühendislik çözümleri gerekmektedir. Sanayide tüketim alanlarında yeşil hidrojen kullanımını temin edecek teknik ve ekonomik fizibilite çalışmalarının gerçekleştirilmesi, karayolu ulaşımı planlamalarının hidrojen dolum tesislerini içerecek şekilde geliştirilmesi, lojistik altyapılarında gerekli düzenlemelerin sağlanması gibi eylemler, sürdürülebilir talep gelişimini temin edecektir. Yeşil hidrojenin havacılık ve denizcilik sektörlerinde yaygınlaşabilmesi için amonyak ve diğer çözümlerle birlikte sürdürülebilir havacılık yakıtlarında geliştirmeler ve diğer hidrojen teknoloji çözümleri öne çıkacaktır. Son dönemde bu alanlarda dünya genelinde patent aktivitelerinde ve sanayi proje envanterinde büyüme görülmekte olup, ulusal mühendislik yetkinliklerinde gelişim Türkiye'yi geleceğin hidrojen ekosisteminde daha rekabetçi bir konuma taşıyabilecektir. Bütüncül planlama perspektifi, hidrojene ilişkin tüm uygulamalarda azami güvenlik ilkesini gözetmeli, bu perspektif sistem yaklaşımı içerisinde güvenliğe ilişkin standartlar ve iyi uygulama örneklerinde gelişim yoluyla da güçlendirilmelidir.

Kümelenme ve ölçeklenme yaklaşımları: Yeşil hidrojeninde gelişimin ilk aşamalarında kümelenme yaklaşımları, özel ihtisas bölgeleri, vadi konsepti gibi çözümler önemli katkı sunacaktır. Talebe yakın noktalarda üretimin sağlanması taşıma altyapılarına olan gereksinimi kısmen azaltacak, bu durum toplam maliyetler ve güvenlik yönlerinden önemli avantajlar sağlayabilecektir. Gelecekte talep sektörlerinin çeşitlenmesiyle ekosistem coğrafi olarak daha dağıtık bir nitelik kazanırken, kümelenme modelleri yoluyla sağlanacak deneyimler, ölçeklenme fırsatlarını destekleyecektir.

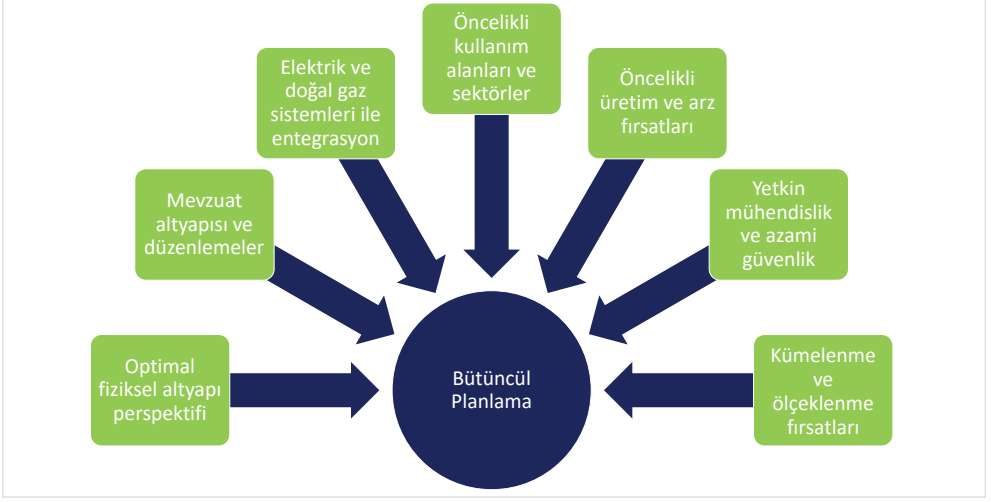
Optimal fiziksel altyapı hedeflemesi: Bu çalışmada sunulan bütüncül planlama çerçevesi, fiziksel altyapılarda optimal gelişimi önceliklendirmektedir. Yeşil hidrojeninde gelişimin çok boyutlu enerji güvenliği, temiz enerji ve teknoloji-odaklı büyüme katkılarını desteklemek üzere arz ve talebin birbirleriyle uyumlu gelişimi yoluyla atıl kapasite veya arz kısıtları oluşmamasının temin edilmesi önemlidir. Bu yönde hedefler, ekonomik ve teknik bakımdan avantajlı arz seçeneklerinin talep merkezlerinin tüketim gereksinimleri ile uyumlu şekilde ve bölgesel planlama yöntemleriyle hayata geçirilmesini sağlayacaktır.

“Önce verim” ilkesi: Türkiye'nin daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerji geleceğine yönelik fırsatları içerisinde enerji verimliliği potansiyeli önemli bir yer tutmaktadır. Ekonomide enerji yoğunluğunu düşürecek yönde stratejiler ve yatırımlar, Bölüm 3'te sunulan *enerjide karekod* için daha rekabetçi ve sürdürülebilir gelişime ve buna ilişkin performans göstergelerine kritik katkılar sunacaktır. Hidrojen tüketimine ilişkin planlamalarda da özellikle talep tarafında ve tüketim birimlerinde verimlilik potansiyelinin öncelikli olarak değerlendirilmesi kaynakların etkin kullanımını sağlayacaktır. Bu çalışmada sunulan genel gelişim perspektifi, hidrojenin elektrifikasyon yoluyla karbondan arındırılması zor olan sektörlerde gelişimini ve ilgili alanlarda hammadde olarak kullanıldığı sektörlerde önceliklendirilmesi böylelikle enerji sektörü ve enerji tüketicisi sektörlerde azami ekonomik ve çevresel değer sağlanabilmesini esas almaktadır. Yeşil hidrojen elektrik enerjisinin bir türevi olup, toplam verim bakımından doğrudan elektrik kullanımına göre bazı dezavantajlar taşımaktadır. Dolayısıyla, tüketici sektörler ve birimlerin gelecekteki ihtiyaçlarının belirlenmesinde enerji verimliliği ve temiz elektrifikasyon çözümleri ile sağlanabilecek kazanımlar da dikkate alınmalıdır.

Şekil 5.5. Enerjide ve Yeşil Hidrojende Verim-Odaklı Gelişim Perspektifi



Şekil 5.6. Yeşil Hidrojende Master Planlama Çerçevesi



5.4. Piyasa Gelişimi

Yeşil hidrojende büyüme için en önemli zorluklardan birisini, tüm dünyada olduğu gibi mevcut maliyet seviyelerinin, arz ve talebin gelişimine ilişkin bazı belirsizlikler oluşturmaktadır. Bununla birlikte, ilk gelişim aşamasından itibaren verimli bir piyasanın gelişimi ve yatırım ortamında sürekli iyileştirmeler yoluyla sürdürülebilir değer yaratılabilmesi için kritik fırsat alanları bulunmaktadır (Şekil 5.7).

Emisyon Ticareti Sistemi'nin (ETS) işlerlik kazanması ve karbon fiyatlandırma düzenlemeleri, yeşil hidrojenin rekabetçiliğini güçlendirecektir. Sektörde kümelenme yaklaşımları yoluyla sağlanacak iş birlikleri yoluyla deneyimlerin artması, ölçeklenme ve maliyet düşüşleri için önemli baz oluşturabilecektir. AB'ye yönelik ihracat fırsatları ve Türkiye'nin enerji ticareti merkezi vizyonu da yeşil hidrojende rekabetçi büyüme zeminine katkı sağlayabilecektir. Avrupa'daki yönelimlere benzer şekilde, enerji borsası yapısı içerisinde EPIAŞ'ın hidrojene yönelik fiyat sinyallerinin oluşumu yoluyla piyasanın gelişiminde gelecekte önemli rol oynayabileceği düşünülmektedir.

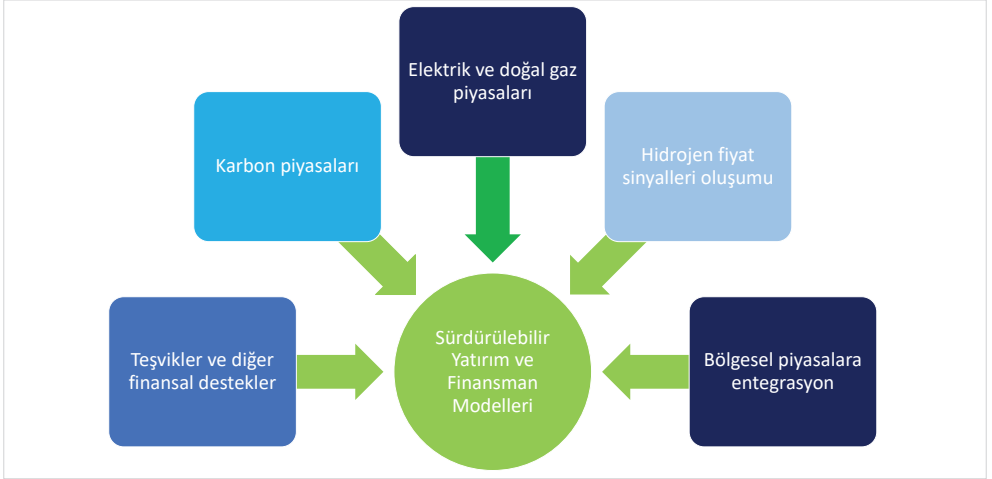
Enerji dönüşümü genelinde ve yeşil hidrojen projeleri özelinde etkili finansman mekanizmalarının oluşturulması en kritik başarı faktörü olarak değerlendirilmektedir. Yeşil hidrojende büyümeyi temin edecek kritik gelişim alanları, üretime odaklı kapsamlı teşvikler, talep tarafında da yeşil enerji dönüşümünü ve hidrojen kullanımını kolaylaştıracak mekanizmalar ve destekler olacaktır. IICEC, ilk gelişim aşamasında arz ve talep gelişimini sağlayacak öngörülebilir bir yatırım çerçevesi olarak fark sözleşmeleri (CfD³) modelini önermektedir.

³ Contract for Differences

Enerji ithalatında ve emisyonlarda azaltımlar ve rekabetçi ihracat yoluyla sağlanacak ekonomik kazanımların potansiyeli bu yönde bir çerçeve oluşturabilecektir. Bu çalışmada sunulan analizler, 2050 yılına kadar olan dönemde fayda-maliyet çarpanının 1,2 olarak gerçekleşebileceğine ve 2050 yılında 2,4'e ulaşabileceğine işaret etmektedir. Özellikle SKDM ve gelecekte bu kapsamda gelişecek dinamikler, yeşil hidrojenin çok yönlü katkıları bakımından kritik olacaktır.

Yeşil hidrojen fırsatlarında gelişim, yenilenebilir enerji kurulu gücünde hedeflenen yüksek artışların sağlanabilmesi ile yakından ilişkili olacaktır. Hidrojen üretimine ilişkin fırsatların, elektrik arz güvenliği ve temiz elektrifikasyonda yaygınlaşma hedefleri ile uyumlu şekilde değerlendirilmesi için hidrojen yatırımlarının, yenilenebilir enerji yatırımlarının ve genel olarak elektrik piyasasına yönelik hedeflerin bütüncül şekilde planlanması önem arz etmektedir. Arz güvenliği, enerji dönüşümü ve elektrifikasyon perspektifi içerisinde hidrojen depolama çözümlerinin geleceğin enerji sistemlerine kritik katkılar sunabileceği değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, elektrik sisteminin esnekliğini artırmaya yönelik planlamalara ve piyasa kurgularına hidrojenin de şimdiden entegre edilmesi önerilmektedir.

Şekil 5.7. Yeşil Hidrojen Yatırım Ortamının Gelişimi için Kritik Gelişim Alanları



5.5. Teknolojiler ve Yerleşme

Yeşil hidrojenin sürdürülebilir bir gelecek hedeflerine ulaşmada önemli rolünün hayata geçirilmesi, teknik performansı yüksek, uygun maliyetli ve çevresel etkileri düşük teknolojilerin gelişimi ve uygulanması ile olanaklı olabilecektir. Dünyadaki yönelimler ve Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasındaki hedefler çerçevesinde özellikle üç teknoloji alanı yüksek büyüme ve etki potansiyeli ile öne çıkmaktadır: elektrolizör teknolojileri, depolama teknolojileri ve yakıt hücresi teknolojileri.

Son dönemde yeşil hidrojen ekosisteminin en kritik bileşeni elektrolizörlere olan yüksek talep ile bölgesel elektrolizör piyasası satıcı piyasası niteliği kazanmıştır. IICEC, elektrolizör alanında ticarileşmede yaygınlaşan teknolojilerde entegrasyon ve adaptasyon seçeneklerinin hızla hayata geçirilmesini, AEM ve SOEC⁴ gibi teknolojilerde gelişim fırsatlarının da Türkiye hidrojen ekosisteminin gelecekteki ihtiyaçlarına paralel olarak değerlendirilmesini, elektrolizör kurulum hedefleri ile uyumlu ve uygulanabilir bir yerleşme stratejisinin rekabetçilik analizleri ile desteklenerek hayata geçirilmesini önermektedir.

Hidrojen depolamada çok yönlü zorluklar ve fırsatlar çerçevesinde, farklı depolama seçeneklerinin gelişimi ve uygulanması kritik olacaktır. Türkiye'nin bor rezervlerinde avantajlı konumu, sıcaklık ve basınç avantajları çerçevesinde NaBH₄ (sodyum bor hidrür) teknolojisinde gelişim için önemli bir baz oluşturmaktadır. Bu çerçevede ETİ MADEN tarafından sürdürülen çalışmaların geliştirilmesi teknolojilerde yerleşme hedefleri bakımından önem taşımaktadır. Yenilikçi malzemelere odaklı depolama çözümleri ve gelişmiş depolama tankları da teknolojik gelişim ve yerleşme bakımından önemli potansiyele sahip alanlardır. Yakıt hücresi teknolojileri ise tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de uzun süredir çalışılan alanların başında gelmektedir. Bu alanda sanayi-akademi işbirliklerinde uygulama alanlarına yönelik geliştirmeler önem arz etmektedir.

Son dönemde hidrojene yönelimin güçlenmesi ile birlikte uygulamalarda çeşitlenme ve yaygınlaşma kapsamında ilerlemelerin sürdürülmesi önemlidir. Karayolu ulaşımında son dönemde öne çıkan sanayi girişimleri sürdürülerek, temiz enerji geleceği ve fosil yakıt yükünde azalma fırsatları desteklenmelidir. Bu yönde gelişmeler, otomotiv sektörünün bölgesel dinamikler ile uyumu ve sürdürülebilir rekabetçiliği bakımından da kritiktir. Araçlarda doğrudan yakma teknolojisi alanında çalışmaların sürdürülmesinin de yeşil hidrojen geleceğine katkı sunacağı değerlendirilmektedir. Havacılık ve denizcilikte hidrojen kullanımına yönelik uygulamalar, çelik, gübre ve diğer sanayi sektörlerinde yeşil dönüşümü destekleyecek teknoloji çözümleri de öncelikli gelişim alanları olarak değerlendirilmelidir. Bu sektörlerin net-sıfır patikası ile uyumlu gelişim dinamikleri, yakıt verimliliğinde artışı, sürdürülebilir enerji ve hammadde girdisi teminini ve yeni teknoloji uygulamalarının yaygınlaşmasını gerektirecektir.

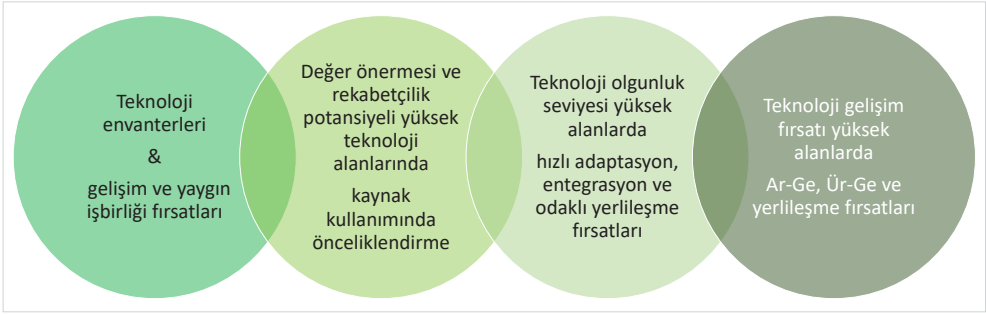
Son dönemde teknolojilerde gelişimi ve sanayi-akademi iş birliklerini destekleyecek yeni girişimler hayata geçirilmektedir. TENMAK ve TÜBİTAK SAYEM tarafından oluşturulan fon mekanizmalarının teknoloji ekosisteminin oluşumuna önemli katkılar sağlaması beklenmektedir. Bununla birlikte, özellikle yüksek etki ve uzun dönemli rekabetçi avantajlar sağlayacak teknoloji alanlarına odaklı önceliklendirme yoluyla teşvik edici fon kaynaklarında büyüme fırsatlarının değerlendirilmesinde yarar görülmektedir.

⁴ AEM, Anion Exchange Membrane; SOEC, Solid Oxide Electrolyzer Cell

Yeşil hidrojeninde gelişimi destekleyecek bir diğer faktör de teknoloji altyapılarına ilişkin bir envanter çalışmasının yayımlanması olacaktır. Kritik teknolojilere ek olarak yardımcı bileşenlerde durum tespitini de içerecek bu envanter çalışması, diğer alanlarda kullanımı olan bileşenlerin adaptasyonuna katkı sağlayabilecek ve yerleşme bakımından kazanımları artıracaktır. Envanter yoluyla Türkiye'deki teknoloji altyapılarının teknoloji gelişim seviyeleri ile karşılaştırmalı analizleri, gelişim alanlarının tespitini, odaklanmayı ve ekosistemde ve araştırma portföylerinde iş birliklerinin artırılmasını destekleyecektir. Türkiye'nin rüzgar ve güneş ekipmanlarında yerleşme deneyiminin de, hidrojen teknolojilerinde yerleşme perspektifine ve fırsatlara önemli girdi sunabileceği düşünülmektedir.

IICEC, Türkiye'nin yeşil hidrojeninde makro stratejisinde emtia ticaretinin ötesinde, belirlenmiş alanlarda güçlü bir teknoloji ve tedarik merkezi hedefine sahip olmasını önermektedir. Bu perspektif, yetkin insan kaynakları ve finansal kaynaklarla desteklenerek bölgesel ölçekte teknoloji oyuncuları oluşturulması vizyonunu da içerebilecektir. Yerleşme fırsatları, ABD'deki Enflasyon Düşürme Yasası ve AB İnovasyon Fonu gibi teşviklere benzer mekanizmaların odak alanlarda geliştirilmesi ile güçlenebilecektir. Türkiye'nin mavi ve pembe hidrojen üretimine yönelik teknolojilerde de gelişim fırsatlarını güçlendirmesi, yerleşme ve kaynak çeşitlendirmesi perspektiflerinden önem arz etmektedir. Hidrojeninde güçlü ve rekabetçi bir teknoloji ekosistemi, kamu-özel sektör-akademi iş birliklerinin yaygınlaştırılmasıyla daha etkin şekilde işlerlik kazanabilecektir (Şekil 5.8).

Şekil 5.8. Teknoloji Fırsatları Perspektifi



5.6. Uluslararası ve Bölgesel İşbirlikleri

Dünyada kapsayıcı bir enerji dönüşümüne yönelik adımlar hızlanırken, Türkiye enerji politikalarındaki öncelikler de daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerji geleceği fırsatlarını desteklemektedir. Yeşil hidrojeninde büyüme potansiyeline odaklı olarak son dönemde gelişmeye başlayan stratejik öncelikler, ekosistemde yeni girişimler ve iş birlikleri, zengin yenilenebilir enerji potansiyeli, coğrafi konum enerji piyasalarında büyüme ve gelişim fırsatları, Türkiye'yi önümüzdeki dönemde hidrojen ekosisteminde önemli bir bölgesel aktör konumuna ulaştırabilecek güçlü bir zemin oluşturmaktadır.

Bu çalışmada sunulan IIcec analizlerinde, finansman ve teknoloji alanları, uluslararası iş birlikleri için kritik başlıklar olarak öne çıkmaktadır. Teknolojik gelişimi destekleyecek finansman modellerine ilişkin iyi uygulama örneklerinin benzerlerinin Türkiye koşullarına uygun şekilde tasarlanarak işleyişe geçirilebilmesinin, yeşil hidrojen teknoloji-odaklı ve sürdürülebilir gelişim patikası hedeflerine önemli girdi oluşturabileceği düşünülmektedir. Mevzuat altyapılarında gelişmeler, sertifikasyon ve diğer regülasyon alanları, piyasa oluşuma yönelik modeller, güvenlik perspektifinden yürütülen çalışmalar, fiziksel altyapıların planlanması ve işletilmesine yönelik deneyimler gibi başlıkların da ilgili bölgesel ve uluslararası platformlarda iş birliği fırsatları bakımından önemli odak alanları olarak gelecekte daha fazla öne çıkabileceği değerlendirilmektedir.

Daha geniş bir perspektiften değerlendirildiğinde, temiz enerji proje stokunu destekleyecek uluslararası ve bölgesel finansman seçeneklerinin yaygınlaşması ve çeşitlendirilebilmesi, Türkiye'nin yenilenebilir enerjide ve yeşil hidrojen büyüme hikayesini ve çok boyutlu enerji güvenliği, enerji dönüşümü ve diğer sürdürülebilirlik fırsatlarını destekleyecektir.

Türkiye'nin yeşil hidrojen geleceğinde AB ile iş birlikleri ve ortak projeler önemli fırsatlar ve büyük bir potansiyel sunmaktadır. AB tarafından yeşil hidrojen üretimine ve kullanımına yönelik belirlenen iddialı hedefler, Türkiye'nin yeşil hidrojen ihracatçı olma vizyonu ile uyumlu, önemli bir fırsat alanıdır. Bu çalışmada sunulan gelişim perspektifi içerisinde, Türkiye karbondan arındırılması zor sektörlerinin taleplerinin karşılanması öncelikli olarak yeşil hidrojen ihracatından da önemli kazanımlar sağlayabilecektir. AB'ye ihracat 2050 yılına kadar olan dönemde üretimin %30'una, toplam kazanımların yaklaşık %40'ına karşılık gelmektedir. Hidrojen ticaretine yönelik ortak standartların, çerçeve sözleşmelerin, alım ve fiyat garantisi sunan anlaşmaların gelişimi yönünde atılacak adımlar, Türkiye'nin enerjide bölgesel ticaret merkezi hedeflerine katkı sunarken, hidrojenin ilk gelişim aşamalarında Türkiye'de ekosistemin gelişimini de destekleyecektir. AB tarafından genelde yeşil enerji geleceğine ve enerji dönüşümüne, özelde de yeşil hidrojen güçlü bir ekosistemin gelişimine yönelik hızla büyüyen fonlar ve diğer finansal mekanizmaları da Türkiye'nin yeşil hidrojen projelerine finansal destek sağlanması bakımından önemli fırsatlar olarak değerlendirilmesi önerilmektedir⁵.

2023 yılı içerisinde başlayan HYSouthMarmara projesi⁶, bugüne kadarki en yüksek AB katkılı hibe desteği özelliği ile öne çıkarken, önümüzdeki dönemde hidrojen vadileri ve benzeri projelerin gelişimi ve finansman kaynaklarının artırılması için de önemli bir zemin oluşturmaktadır. Hazar, Orta Doğu, Kuzey Afrika bölgeleri ile iş birlikleri de önümüzdeki dönemde yeşil hidrojen ekosisteminde ortak projeler ve deneyim paylaşımları bakımından önemli fırsatlar sunabilecektir.

⁵ https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en

https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen/funding-guide/eu-programmes-funds/innovation-fund_en

⁶ <https://www.linkedin.com/company/hysouthmarmara-hydrogen-valley/>

5.7. Geniş Ölçekte Sürdürülebilirlik

Yeşil hidrojen üretiminin su yoğunluğu yüksektir. İklim değişikliği ve artan nüfusun ihtiyaçları su kaynakları üzerinde baskısını artırırken Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz havzası, gelecekte muhtemel kuraklık risklerine duyarlı bölgeler içerisinde öne çıkmaktadır. IICEC analizlerindeki bütüncül sürdürülebilirlik perspektifi içerisinde, artan kuraklık risklerinin ve su stresinin yönetilebilmesi, aynı zamanda yeşil hidrojen değer zincirinin genelinde sürdürülebilir kaynak kullanımının gerçekleştirilebilmesi bakımından deniz suyu ağırlıklı bir büyüme patikası sunulmaktadır. Bu çerçevede, Bölüm 4'te sunulduğu gibi, desalinasyon tesislerinin şimdiden planlanması önem taşımakta, 2050 yılına kadar olan dönemde elektrolizör hedeflerini desteklemek üzere toplam su gereksinimi, ağırlıklı bölümü deniz suyu olmak üzere 1,5 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır. Yeşil hidrojen üretiminin tamamının yeraltı suyu olması durumunda oluşacak ihtiyaç ise mevcut yeraltı suyu tüketiminin %6'sına eşdeğer olacaktır.

Hidrojen üretiminde desalinasyona ağırlık verilmesi, Türkiye'de tatlı su çekimi üzerindeki ilave etkinin oldukça sınırlı seviyede tutulabilmesini sağlayacaktır. Desalinasyon tesislerinin planlamasının ve neden olacağı ilave elektrik tüketimin de bütüncül enerji sistemi içerisinde ayrıca irdelenmesi önem taşımaktadır. Türkiye'nin denizcilik ekosistemi, önümüzdeki dönemde yeşil hidrojen amonyak ve diğer seçenekler için gelişen bir talep alanı olmanın yanı sıra su tüketiminde sürdürülebilir yaklaşımlar için önemli bir paydaş durumuna gelecektir. Güney Marmara bölgesinde hidrojen vadisi ve Hidrojen Kıyısı Platformu ilk adımları bu yönde gelişim için önemli bir zemin oluşturacak ve gelecekte iyi uygulama örneklerinin yaygınlaşmasını destekleyecektir.

Yeşil hidrojen sürdürülebilir gelişim için önemli bir diğer başlık ise kritik minerallere ve tedarik zincirlerine ilişkin planlamalar ve risk yönetimidir. Covid-19 pandemisi ve son dönemdeki jeopolitik gelişmelerin sonucunda temiz enerji dönüşümü ve ilgili yatırımlar bakımından küresel ölçekte önemli bir mücadele ve gelişim alanı olarak öne çıkan bu başlıklar, enerjide güvenlik paradigmasına yeni bir boyut kazandırmakta, teknoloji ve ekipman gelişiminde yerleşme odağını da oldukça güçlendirmektedir.

Bu çerçevede, Türkiye'nin teknoloji gelişimi için belirlediği kritik fırsat alanları arasında öne çıkan elektrolizör ve yakıt hücresi teknolojileri başta olmak üzere değer zincirinde sürdürülebilir gelişimi sağlayacak şekilde, ilgili minerallere erişime, tedarik zincirlerinde yerleşme ve çeşitlendirme fırsatlarına yönelik planlamaların şimdiden oluşturulması önem arz etmektedir. Bu yönde gelişmeler, talep artışlarının, olası fiyat dalgalanmalarının ve fiziksel arz-talep dinamiklerinin dengeli yönetimi bakımından gelecekte daha fazla önem taşıyabilecektir.

Yeşil hidrojenin Türkiye'nin enerji arzında fosil yakıt tüketimini ve ithalat faturasını azaltarak enerji güvenliği güçlendirmeye, emisyon envanterinde sağlayacağı düşüşlerle net-sıfır hedefine sağlayacağı katkılar, arzdan talebe sürdürülebilir bir büyüme perspektifi içerisinde yüksek değer kazanabilecektir. Bu kapsamda yeşil hidrojen üretiminde, teknolojik gelişimde ve yaygınlaşmasında sürdürülebilir büyümenin en önemli değer önermelerinden birisi, tüketici sektörlerin sürdürülebilir rekabetçiliğine küresel ve bölgesel trendlerle uyumlu şekilde dönüşümüne sağlayacağı katkılar olacaktır.

Farklı sektörlerdeki çeşitli deneyimlerin ve gelecek projeksiyonlarının da sıklıkla gösterdiği gibi, sürdürülebilir bir geleceğe yolculuk, ancak insanı odağına alan stratejiler ve iş modelleri ile gerçekleşebilecektir. Bu çerçevede, Türkiye'nin yeşil hidrojen ve ilgili sektörlerde güçlü ve sürdürülebilir büyüme fırsatlarının temel taşlarından birisini de insan kaynaklarında sürdürülebilir gelişim yoluyla yetenek havuzlarını geliştirebilmek oluşturacaktır (Şekil 5.9).

Şekil 5.9. Yeşil Hidrojende Geniş Ölçekte Sürdürülebilirlik Bakımından Kritik Odak Alanları



5.8. İnsan Kaynakları ve Girişimcilik

Son dönemde enerji ve iklim güvenliğine ilişkin risklerin artışı, temiz enerji stratejilerinde güçlenme ve ilgili yatırım portföylerinde hızlı gelişim ile birlikte enerji dönüşümünde yeni bir döneme girilmiştir. Dünya genelinde enerji arzında temiz enerji seçeneklerinin rolü artarken, uzun bir dönem konvansiyonel fosil kaynaklara dayalı gelişimlerle şekillenen ekosistemin, nitelikli insan kaynağı perspektifini de içerecek şekilde dönüşümü gereksinimi öne çıkmaktadır. Güvenli, rekabetçi ve teknoloji-odaklı enerji dönüşümü yoluyla enerjide, iklimde ve daha geniş bir perspektiften ekonomilerin genelinde sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesinde en kritik başarı faktörlerinden birisini yetkin insan kaynaklarının ve yetenek havuzunun gelişimi oluşturacaktır. Temiz enerjide istihdam son dönemde hızla artmakla birlikte, ilgili teknolojilerin geliştirilmesi, uygulanması, gerekli altyapıların verimli dönüşümü, kurulumları, işletilmesi bakımından yeni yetenek setlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Enerjide ve teknolojide değer önermesi yüksek yeni bir gelişim alanı olan hidrojen bu ihtiyaç daha belirgin durumdadır.

Fosil yakıtlar bakımından zengin olmayan Türkiye enerjide ithalatından kaynaklı olarak cari işlemler dengesi başta olmak üzere makro ekonomik dengelere ve nihai enerji maliyetlerine etki eden önemli zorluklar yaşamaktadır. Artan enerji talebi ve enerji tüketicisinin gelişen ihtiyaçları çerçevesinde, Türkiye enerji sistemini daha güvenli, verimli ve temiz enerji geleceğine taşıyacak güçlü yönler bulunmaktadır: Genç ve dinamik nüfus, yenilenebilir enerjide yüksek ve yaygın büyüme potansiyeli, teknoloji-odaklı geniş bir ekosistemin gelişimi fırsatları. Hidrojen, bu çalışmada sunulan çok yönlü karakteristikleri, daha güvenli, temiz ve sürdürülebilir enerji geleceği için sağlayabileceği çok boyutlu kazanımlar ile önümüzdeki dönemde söz konusu güçlü yönlere eklenecek yeni bir gelişim aksı olarak daha fazla öne çıkacaktır. Yeşil hidrojen potansiyeli daha yüksek performansta ve artan hızlarda harekete geçirecek teknolojilerin önemli bir bölümünün henüz dünya genelinde gelişim aşamasında olması da Türkiye'nin bu alanda teknoloji-odaklı insan kaynakları altyapısına daha fazla yatırım yapması için önemli bir gerekçe oluşturmaktadır.

Dünyada son dönemde öne çıkan gelişmeler ve iyi uygulama örnekleri, üniversite – sanayi iş birlikleri içerisinde, hidrojen-odaklı araştırma ve profesyonel eğitim programlarının geliştirilmesinin, farklı ihtiyaçlara yönelik mesleki gelişim programlarının oluşturulmasının, Türkiye için yetenek havuzunun oluşumunu ve sürdürülebilir büyümesini destekleyecek kritik gelişim alanları olduğunu göstermektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynak potansiyelinin ve yeşil hidrojen gelişimin güçlü dinamiklere sahip olduğu bölgelerde, yerel sanayi paydaşları ile eğitim kurumları arasında iş birlikleri yoluyla ilk uygulama örneklerine baz oluşturulabilmesi, sürdürülebilirlik hedefleri içerisinde sosyal ve ekonomik kalkınmaya da önemli destek sağlayabilecektir. Bu yönde programlar, değer zincirinin geneline yönelik bütüncül bir perspektif içerisinde geliştirilebileceği gibi, hidrojenin üretim, depolama, taşıma ve son kullanım alanlarında yüksek değer önermesi sunabilecek fırsatlara özel olarak tasarlanacak detaylı müfredat ve programlarla da desteklenebilecektir.

Hidrojen teknolojileri, özellikle girişimcilik ve yatırım ekosistemi güçlü bölgelerde, son dönemde e-mobilite, batarya ile enerji depolama, ileri veri analitiği, siber güvenlik ve dijitalleşme çözümleri gibi alanlarla birlikte girişim sermayesinin sürdürülebilir değer yaratmak üzere odaklandığı alanlar arasında daha fazla öne çıkmaktadır. Türkiye'nin yeşil hidrojen sürdürülebilir değer hikayesinin ana aktörlerinden birisinin de girişimcilik ekosistemi olabileceği değerlendirilmektedir. Uluslararası işbirliği fırsatları da, sanayi paydaşları arasında iyi uygulama örneklerinde deneyim paylaşımından ortak eğitim programlarının, araştırma ve uygulamalı eğitimi de destekleyecek teknoloji platformlarının oluşturulmasına kadar geniş bir spektrumda çok yönlü faydalar sağlayabilecektir.

Türkiye'nin yeşil hidrojeninde yüksek potansiyelinin, sürdürülebilir koşullarda, rekabetçiliği ve katma-değeri yüksek fırsatlarla değerlendirilebilmesi, teknoloji ve girişimcilik odaklı kamu-sanayi-akademi iş birliklerinin yaygınlaşması ile sağlanabilecektir. Enerji güvenliği, temiz enerji dönüşümü ve yerleşme gibi kritik kazanımları temin edecek yüksek potansiyele sahip alanlarda önceliklendirme, insan kaynağının ve yetenek havuzunun da bu perspektifte gelişimini sağlayacak, bu çalışmada sunulan çok boyutlu kazanımları temin edecek gelişimin en kritik bileşenini oluşturacaktır (Şekil 5.10).

Şekil 5.10. Yeşil Hidrojen Potansiyeli Sürdürülebilir ve Rekabetçi Gelişim Fırsatlarına Dönüştürecek İnsan Kaynakları ve Girişimcilik Alanları



5.9. IICEC Önerileri

IICEC, Türkiye'nin yeşil hidrojende ve ilgili teknolojilerde sahip olduğu avantajları çerçevesinde, enerji güvenliği, temiz enerji dönüşümü, rekabetçilik, yerleşme ve teknoloji-odaklı sanayi gelişimi için çok boyutlu fırsatlar sunan yüksek potansiyelinin değerlendirilmesi için,

1. Üretimde, talepte ve ilgili altyapılarda gelişim perspektifine ilişkin yol haritalarının, öncelikli sektörler ve bölgeler bazında belirlenmesini,
2. Teknik ve düzenleyici altyapıların oluşturulmasını, optimal kaynak kullanımını ve azami güvenliği temin edecek uzun vadeli master planlamaların hazırlanarak hayata geçirilmesini,
3. Değer zincirinde verimli ve öngörülebilir büyüme için piyasa ve destek mekanizmalarının, elektrik, doğal gaz, karbon piyasaları ile etkileşimler ve elektrik arz güvenliği de gözetilerek oluşturulmasını,
4. Elektrolizör, depolama ve yakıt hücresi başta olmak üzere kritik teknolojilerde fırsatların değerlendirilmesini, yerleşme ve imalat kabiliyetlerinin geliştirilmesini,
5. Uluslararası ve bölgesel iş birliklerinin güçlendirilmesini, Avrupa'nın artan talebine yönelik ihracat imkanlarının azami fayda sağlayacak değerlendirilmesini,
6. Ekosistemin genelinde, rüzgar ve güneş kaynakları ve su kullanımı, kritik mineraller ve tedarik zincirleri gibi alanlarda geniş ölçekte sürdürülebilirlik perspektifinin gözetilmesini,
7. Sürdürülebilir büyümeyi ve rekabetçiliği destekleyecek, nitelikli insan kaynağı ve yetenek havuzunun geliştirilmesini ve güçlü bir girişimcilik ekosisteminin hayata geçirilmesini önermektedir.

EKLER

- **EK A:** Temel Politika Belgeleri ve Veri Kaynakları
- **EK B:** Dönüşüm Faktörleri
- **EK C:** Kısaltmalar
- **EK D:** Fosil Yakıt ve Karbon Fiyat Serileri
- **EK E:** Analiz Sonuçları Özeti

EK A:

Temel Politika Belgeleri ve Veri Kaynakları

- 12. Kalkınma Planı (2024-2028)
- Türkiye Ulusal Enerji Planı
- ETKB Enerji Denge Tabloları (1990 – 2022)
- UNFCCC'ye sunulan Türkiye Emisyon Envanteri Raporları
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası
- ETKB Raporları
- EPDK Sektör Raporları
- TEİAŞ İstatistikleri ve Raporları
- EPIAŞ Şeffaflık Platformu
- TCMB Raporları ve istatistikleri
- TÜİK İstatistikleri
- IEA İstatistikleri
- OECD İstatistikleri
- UN İstatistikleri
- Eurostat İstatistikleri
- World Bank Group İstatistikleri
- Hydrogen Europe verileri
- IICEC Türkiye Energy Outlook Modeli
- IICEC veri tabanı ve pazar araştırmaları
- Sektör paydaşları ile görüşmeler ve diğer sektörel raporlar

EK B:

Dönüşüm Faktörleri

	EJ	Gcal	Mtep	Mbtu	GWh
EJ	1	$2,388 \times 10^{-8}$	23,88	$9,478 \times 10^8$	$2,788 \times 10^5$
Gcal	$4,1868 \times 10^{-9}$	1	10^{-7}	3,968	$1,163 \times 10^{-3}$
Mtep	$4,1868 \times 10^{-2}$	10^7	1	$3,968 \times 10^7$	11630
Mbtu	$1,0551 \times 10^{-9}$	0,252	$2,52 \times 10^{-8}$	1	$2,931 \times 10^{-4}$
GW-saat	$3,6 \times 10^{-6}$	860	$8,6 \times 10^{-5}$	3412	1

1 kg Hidrojen = 120,1 MJ (LHV)=33,3 kW saat

$$\text{Hidrojen Üretimi (Mt)} = \text{Elektrolizör Kurulumu (GWe)} \times \text{Elektrolizör Kapasite Kullanımı (\%)} \times \frac{8760}{(33,3 \times 1000)}$$

$$\text{Elektrik Gereksinimi (TWh)} = \text{Elektrolizör Kurulumu (GWe)} \times \text{Elektrolizör Kapasite Kullanımı (\%)} \times \frac{8760}{1000}$$

$$\text{Kurulu Güç Gereksinimi (GW)} = \text{Elektrolizör Kurulumu (GWe)} \times \frac{\text{Elektrolizör Kapasite Kullanımı (\%)}}{\text{Elektrik Üretimi Birim Kapasite Faktörü (\%)}}$$

¹ Alt Isıl Değer

EK C:

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ACEA	Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği
AEM	Anyon Değişim Membran
AlH ₃	Alüminyum Hidrit
ALK	Alkalın Elektrolizör
APC	Açıklanan Taahhütler Senaryosu
ASPİLSAN	Askeri Pil Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
CDD	Soğutma Gün Derecesi
CH ₃ OH	Metanol
CH ₄	Metan
CN	Karbon Nanotüp
CO ₂	Karbon Dioksit
CYO	Cumhurbaşkanlığı Yatırım Ofisi
ÇŞİDB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPİAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
Fe	Demir
FeO	Demir Oksit
GMKA	Güney Marmara Kalkınma Ajansı
GSYİH	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
H ₂	Hidrojen
HDD	Isıtma Gün Derecesi
HRS	Hidrojen Dolum İstasyonu
IATA	Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği

ICCT	Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IMF	Uluslararası Para Fonu
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KOH	Potasyum Hidroksit
KYKD	Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama
LiBH ₄	Lityum Borhidrür
LOHC	Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcıları
METI	Japonya Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı
MgH ₂	Magnezyum Hidrit
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MOF	Metal Organik Yapı
N ₂	Azot
NaBH ₄	Sodyum Borhidrid
NaOH	Sodyum Hidroksit
NDC	Ulusal Katkı Beyanı
NH ₃	Amonyak
NZE	Net-Sıfır Emisyon
O ₂	Oksijen
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OSD	Otomotiv Sanayicileri Derneği
OVP	Orta Vadeli Program
PEM	Polimer Elektrolit Membran
PV	Fotovoltaik
SAOM	Sermayenin Ağırlıklı Ortalama Maliyeti
SBB	Strateji ve Bütçe Başkanlığı

SHÜM	Seviyelendirilmiş Hidrojen Üretim Maliyeti
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SMR	Buhar Metan Reformasyonu
SOEC	Katı-Oksit Elektrolizör
SOHT	Sıvı Organik Hidrojen Tankerleri
STEPS	Açıklanan Politikalar Senaryosu
TB	Ticaret Bakanlığı
TCMB	Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
TİM	Türkiye İhracatçılar Meclisi
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri
TRL	Teknoloji Hazırlık Seviyesi
TUEP	Türkiye Ulusal Enerji Planı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜBİTAK MAM	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi
TÜBİTAK SAYEM	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Sanayi Yenilik Ağ Mekanizması
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UAB	Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı
UN	Birleşmiş Milletler
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
US DOE	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı
US EERE	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi
US EIA	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi İdaresi
WB	Dünya Bankası
WRI	Dünya Kaynakları Enstitüsü

EK D:

Fosil Yakıt ve Karbon Fiyat Serileri

		2022	STEPS		APS		NZE	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Kömür	2022ABD\$/t	290	67	69	68	53	57	43
Petrol	2022ABD\$/varil	98	85	83	74	60	42	25
Doğalgaz	2022ABD\$/m ³	1,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
Karbon	2022ABD\$/tCO ₂ -eş	100	120	135	135	200	140	250

IEA Senaryoları

EK E:

Analiz Sonuçları Özeti

Yeşil Hidrojen Arz Talep Dengesi (2023 - 2050)						
	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrolizör Kurulu Gücü (GW)	-	1,9	5,0	15,0	30,0	50,0
Yeşil Hidrojen Üretimi (Mt)	-	0,3	0,6	1,3	2,6	5,5
Tüketim (Mt)						
Sanayi	-	0,1	0,3	0,6	1,2	1,9
Ulaşım	-	0,0	0,1	0,2	0,6	1,6
Binalar	-	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Elektrik	-	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
İhracat	-	0,1	0,2	0,4	0,7	1,7
Toplam	-	0,3	0,6	1,3	2,6	5,5
Fayda-Maliyet Çarpanları	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Yıllık	-	0,6	1	1,1	1,4	2,4
Kümülatif	-	0,4	0,6	0,7	0,9	1,2
2023 - 2050 (milyar 2022ABD\$*)	Ortalama	Kümülatif				
Fayda	3,5	91,7				
İthalat Tasarrufu	0,8	20,7				
Emisyon Tasarrufu	1,4	35,9				
İhracat Kazanımı	1,3	35,1				
Maliyet	2,9	77,2				
Elektrik Üretimi	1,6	41,8				
Elektrolizör	0,8	21,4				
Diğer Altyapı	0,5	14				
Fayda-Maliyet Çarpanı	1,2					
Fayda-Maliyet Farkı	0,6	14,5				

* IEA STEPS Senaryosu fosil yakıt ve karbon fiyat serileri ile

Notlar



Notlar

TÜRKİYE YEŞİL HİDROJEN GELECEĞİ | 2023



Sabancı
Üniversitesi

IICEC

SABANCI UNIVERSITY
İSTANBUL INTERNATIONAL
CENTER FOR ENERGY AND CLIMATE

