

TÜRKİYE YEŞİL HİDROJEN GELECEĞİ | 2023



Yönetici Özeti

Executive Summary

Sabancı
Üniversitesi

IICEC

SABANCI UNIVERSITY
ISTANBUL INTERNATIONAL
CENTER FOR ENERGY AND CLIMATE

IICEC

SABANCI UNIVERSITY
ISTANBUL INTERNATIONAL
CENTER FOR ENERGY AND CLIMATE

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-university-istanbul-international-center-for-energy-and-climate

[t](#) sabanciu_iicec

Yönetici Özeti

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 yerleştirme 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 üretilmektedir. 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 tekno-ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.

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

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. Üretimin 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. 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'ı 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 konumda 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).

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

³ Seviyelendirilmiş Hidrojen Üretim Maliyeti (Levelized Cost of Hydrogen)

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).

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'sine 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.

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 hidrojen 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\$ düşüğe karşılık gelmektedir⁸ (2050 yılında 3,1 milyar 2022\$).

Aynı dönemde sera gazı emisyonlarında 287,2 Mt CO₂-eş azaltım gerçekleşmekte, yeşil hidrojen 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.

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\$.

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\$). Teknolojilerde 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.

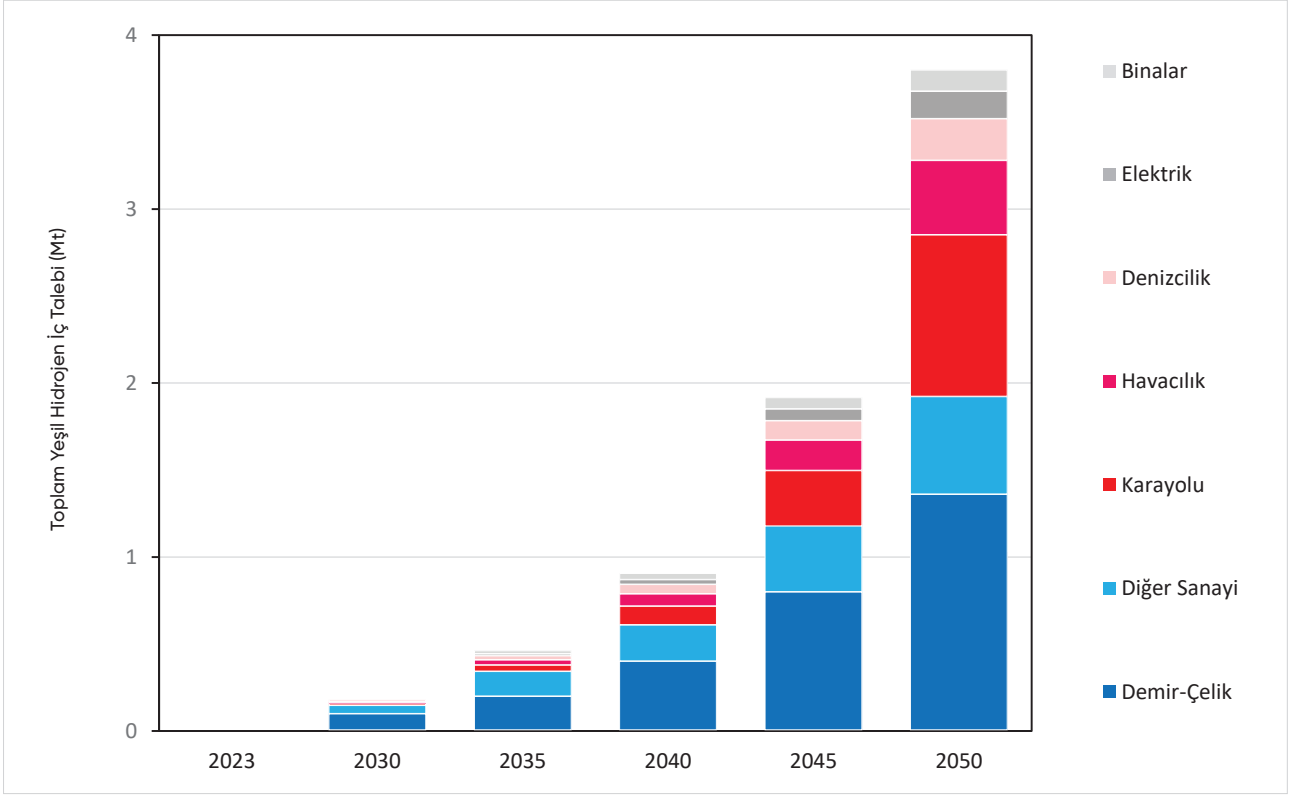
2050 yılına kadar olan dönemde yıllık ortalama 3,0 milyar 2022\$ yatırım karşılığında 3,5 milyar 2022\$ enerji ithalatı, emisyon ve yeşil hidrojen ihracatı faydası elde edilmektedir (Kümülatif 91,7 milyar 2022\$ ve 77,2 milyar 2022\$; 2050 yılında 12,3 milyar 2022\$ ve 5,2 milyar 2022\$). Fayda-maliyet 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 yakıtı 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 yukarıya taşıyacak, makro perspektifte yatırımların geri dönüşünü hızlandırabilecektir. Dünyadaki iyi uygulama örneklerine benzer mekanizmalara ilk gelişim aşamasında işlerlik kazandırılabilmesi, öngörülebilirliği ve uzun vadede kazanımları güçlendirecektir.

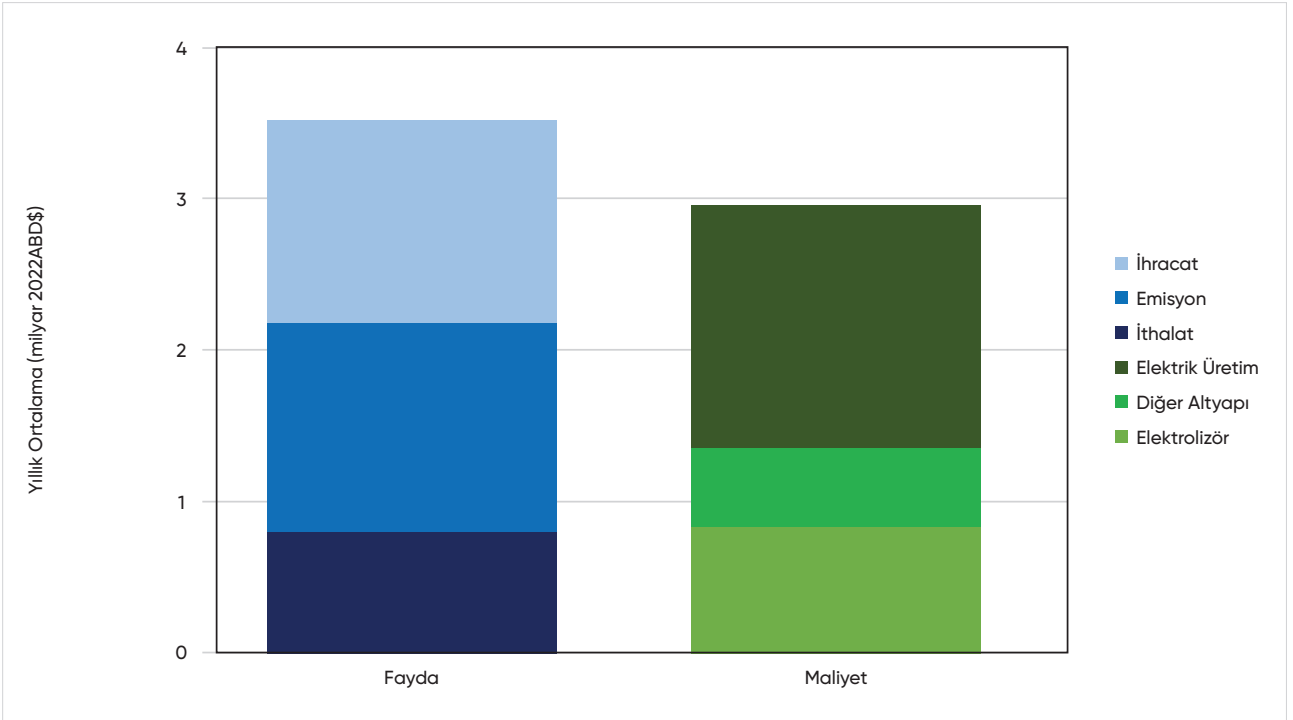
Çalışmada orta ve uzun vadede enerji ve karbon fiyatları gelişimine ilişkin farklı fiyat serilerine ek olarak, fosil yakıt ithalat ağırlığının değişimi, hidrojen ve amonyak fiyatlarının bölgesel gelişimi, talep ve altyapıların gelişim hızı gibi önemli belirsizlikler de dikkate alınarak arz ve talebin 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 hidrojende, 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 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 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 hidrojen 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 şekilde 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.

Executive Summary

IICEC Türkiye Green Hydrogen Future 2023

Executive Summary

Why the “Türkiye Green Hydrogen Future” ?

Recent developments in global energy – the first global energy crisis in 2022, ongoing geopolitical developments, the emerging needs for flexible electricity systems that can enable strong growth in electrification, and the bolstering of clean energy technologies and supply chains – have transformed the energy security paradigm into a multifaceted one. While the 1.5°C and net-zero targets remain vital in the fight against climate change, strengthening secure and clean energy options for energy transitions around the world constitutes one of the most important elements of a sustainable future. Recent levels of investment in clean energy have significantly outpaced those for fossil fuels, auguring a new period for the global energy sector in which the share of clean energy will increase rapidly. Diversification and localization of clean energy and climate technologies in addition to energy supply portfolios have become a central priority in the advancement of new industrial strategies for sustainable competitiveness of national economies. Geopolitical developments further reinforce these energy, climate and industrial trends.

Interest and investment in clean hydrogen has also been accelerating in recent years due to macro energy, climate, industrial and technological dynamics; and geopolitical developments. Clean hydrogen possesses potential to become widespread, especially in sectors that are difficult to decarbonize through clean electrification, such as heavy industry and long-haul transportation, and can be produced from various primary energy sources, from fossil fuels to renewables and nuclear energy, and through different technologies. Hydrogen can also be stored, transported, and used in different forms.

All these aspects suggest that green hydrogen can serve both as a fuel and a flexible energy carrier and can help build more secure, cleaner, and more sustainable energy supply-and-demand balances. Supportive financing and innovative business models, especially those implemented by major economies, aim to improve the economics and competitiveness of green hydrogen in its initial growth phases, to nurture the sustainable growth of green hydrogen supply chains and, at the same time, to forge a growth model that is compatible with the net-zero pathway, especially during the post-2030 period. Moreover, technological development and the drive to reduce costs are expected to provide significant improvements in the competitiveness of green hydrogen in the coming years globally. The growth in green hydrogen is also expected to play an important role in Türkiye’s future energy balances.

Türkiye’s Potential and Strengths

Türkiye is one of the largest energy markets in Europe and among the most dynamic in the world. The country features rising energy demand and high growth potential in the energy sector, supported by a young population and rising levels of industrialization, urbanization, and mobility. Türkiye’s announcement of the 2053 net-zero emission target, together with its developing energy strategies that focus on supply security, competitiveness, and localization, will be central to building a more secure and cleaner energy future over the next thirty years.

Technology-oriented development and versatile growth opportunities can simultaneously support Türkiye to reduce its imported fossil fuel intensity and energy-import bill, diversify its energy resources and technologies, assure security of supply, and initiate an inclusive transformation towards its net-zero targets. Among the energy policies, market development, and investment priorities, the rapid expansion of clean electrification and the realization of the high potential in renewable energy and energy efficiency have become more prominent. Developing the hydrogen ecosystem is also being strengthened within the framework of global and regional trends as well as national development, energy, climate, and industrial policies, and emerging initiatives in industry. Türkiye's dynamic energy market, the imperative to meet increasing demand, and the strong potential in renewable energy all provide important reasons for Türkiye to develop green hydrogen production and its related technologies.

In this regard, the "12th Development Plan" (2023), "Türkiye's National Energy Plan" (2022), and "Türkiye's Hydrogen Technologies Strategy and Road Map" (2023) present important targets and perspectives, especially in green hydrogen production and consumption in sectors that are difficult to decarbonize, and the development of relevant infrastructure and technologies. The country's proximity to European markets, which have robust demand for green hydrogen and clear import needs, also brings new opportunities within the perspective of becoming an energy trade center and exporter of green hydrogen in the future, with priority given to domestic consumption. The priorities within Türkiye's policy documents also support this vision.

Summary of the IICEC Model and Analyses

Türkiye Green Hydrogen Future 2023 is based on the Türkiye Energy Outlook published by IICEC, a first-of-its-kind study in Türkiye, the IICEC Energy Model and a detailed inventory of Türkiye's energy economy. Employing a database covering the entire energy supply and demand chains, the holistic modeling framework reflects the global and regional energy and climate dynamics, critical priorities, and trends in Türkiye's current national development, energy, industrial, and climate policies, as well as the needs, expectations, and advances in energy markets and technologies.

This pioneering study is carried out with a detailed analytical approach and a long-term perspective. A growth and development perspective in green hydrogen out to 2050-2053 is presented together with multiple economic, energy, and climate benefits in terms of resource diversification and energy-supply security, including reducing imported fossil fuel consumption and the energy import bill, lowering CO₂ emissions, supporting clean energy transition goals, and incorporating the net-zero emissions perspective. In addition, the study evaluates other critical gains such as localization in relevant hydrogen technologies in the priority areas that are determined by Türkiye.

The IICEC model and analysis for green hydrogen production are based on the electrolyzer installation targets that were outlined in the "Türkiye Hydrogen Technologies Strategy and Road Map": 2 GW in 2030, 5 GW in 2035, and 70 GW in 2053. In this context, techno-economic analyses were carried out that took into consideration the following dynamics: the development pace of technologies and demand sectors, capacity utilization rates in production and consumption, the economics of hydrogen production, and other relevant factors.

The analyses reflect the target of rapid growth in electrolyzer capacity, especially in the period after 2035 that reaches 50-70 GW¹ between 2050 and 2053, showing that green hydrogen production increases approximately two-fold every five years starting from 2030. It is forecast that Türkiye's green hydrogen production reaches 0.6 Mt (million tons) in 2035 and 5.5 Mt² in 2050.

With present technologies, the current cost of producing green hydrogen from grid electricity is in the range of 8.5-9 \$/kg³, which is fivefold-to-sixfold the current natural gas cost in terms of energy equivalent. The most critical element for the competitiveness of green hydrogen production will be the evolution of electricity costs. Targeted cost levels of 2.4 \$/kg in 2035 and 1.2 \$/kg in 2053 require electricity costs of 30\$/MWh and 10-15\$/MWh, respectively. At current natural gas price levels, green hydrogen will reach a break-even point with gray hydrogen around 2030 and with natural gas around 2040. Competitiveness may occur sooner if carbon costs rise more rapidly or fossil fuel prices remain higher in the future.

The study also analyzes the possible development of hydrogen demand in sectors that are difficult to decarbonize within the framework of relevant sectoral dynamics. With the effects of transformation in the refinery and fertilizer sectors, which are currently gray hydrogen consumers, and the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), especially in the post-2030 period, the industrial sectors with high fossil fuel intensity that are also critical for Türkiye's export competitiveness, especially steel, will constitute the first significant volumes of demand. As a result of dynamics such as the harmonization of the automotive industry with global and European developments, Türkiye's position in logistics, and clean energy trends in mobility, the demand in road, aviation, and marine transport is also expected to accelerate, especially after 2030-2035. Approximately 90% of Türkiye's total green hydrogen demand of 3.8 Mt in the 2050-2053 period is seen in industry and transportation⁴.

Green hydrogen consumption increases to 0.7% of Türkiye's energy demand in transportation in 2035 and 11% in 2050, while it will be 1% of its industrial energy demand in 2035 and 8% in 2050. Green hydrogen corresponds to 0.7% of Türkiye's total final energy consumption in 2035, 1% in 2040, and 6% in 2050⁵. According to IICEC's analysis, the contribution of clean electrification, direct use of renewable energy, and green hydrogen to total final energy demand may increase to 70-75% by the 2050-2053 period, up from 10-15% in recent years⁶. The growth and development perspective in green hydrogen production and consumption shows that Türkiye can also become an exporter of green hydrogen, with priority given to meeting the demand of potential domestic consumer sectors, with hydrogen equivalent exports of 0.2 Mt forecast by 2035 and 1.7 Mt by 2050.

In this growth path, which is also compatible with the export vision in "Türkiye's Hydrogen Technologies Strategy and Road Map," approximately 30% of the cumulative production by 2050 can be utilized as exports to Europe, the majority of which is ammonia. Developments in pipelines may also diversify exports in the medium and long term. Through export development, Türkiye will be able to gain a 3% share on average in the EU's total green hydrogen imports until 2050 (8% in 2050).

¹ 1.5% share in global electrolyzer capacity in 2050 in the IEA Net Zero Emissions (NZE) Scenario.

² 1.6% share in global green hydrogen production in 2050 in the IEA NZE Scenario.

³ Levelized cost of hydrogen.

⁴ IICEC analysis reflects on blending to gas grid targets, clean electrification and roll-out of efficient heat pumps. The use of hydrogen in buildings is rather limited. Hydrogen can contribute significantly to future electricity dynamics as a storage option to support system flexibility for increasing electrification and rising variable renewable generation.

⁵ The world average in 2050 is 3% in the IEA APS and 8% in the IEA NZE.

⁶ Electrical energy is expected to represent half of final energy consumption (approximately 20% today).

The green hydrogen development pathway presented in this study requires the development of approximately 15 GW of additional renewable energy installed capacity by 2035 and over 90 GW by 2050. The electricity input to ensure green hydrogen production corresponds to 6% of Türkiye's total gross electricity production in 2035 and approximately 20% in 2050. Hydrogen storage is expected to become an important option to support the increasing flexibility requirements of the electricity sector for supply security and strong growth in variable renewable energy in the medium and long term. Therefore, to achieve maximum economic benefit from the development of green hydrogen, short-, medium-, and long-term growth targets and supply-security priorities in the electricity system must be considered alongside the development of integrated planning approaches and road maps for electricity and hydrogen production. Factors such as the potential for pink hydrogen production from innovative nuclear technologies, blue hydrogen production based on the development of carbon technologies integrated with domestic fossil fuel resources, and uncertainties regarding demand growth, similar to observed globally, may also affect the evolution of the green hydrogen supply-demand balance in the medium and long term.

Electricity-intensive green hydrogen production is also water-intensive, which makes the use of seawater essential in supporting sustainable production. The total water requirement to support electrolyzer targets in the period until 2050 is 1.5 billion m³, the majority of which is seawater⁷. At the same time, the security of supply chains for critical minerals – the fundamental inputs for electrolyzer production, installations, and other technologies – will be a vital planning component for large-scale and sustainable growth in green hydrogen. In developing the value chain for green hydrogen within a holistic system perspective, safety should be a top priority.

Multidimensional Benefits for Energy, Climate, and Technology-Driven Industrial Development

Türkiye will be able to accrue multidimensional energy and climate benefits through the green hydrogen development pathway presented in this study, especially after 2030–2035. Until 2050, a total of 81.0 Mt of oil equivalent of savings in fossil fuel consumption can be achieved by substituting green hydrogen for petroleum products, natural gas, and coal, which is equivalent to the country's current annual fossil fuel consumption at final energy use. This savings corresponds to an average annual decrease of 0.8 billion 2022\$ in the energy import bill until 2050, which reaches 3.1 billion 2022\$ of savings in 2050⁸. In the same period, a reduction of 287.2 Mt of CO₂-equivalent is achieved in greenhouse gas emissions in hard-to-abate sectors, with growth in green hydrogen supporting the net-zero target. (Currently, the emission inventory of hard-to-abate sectors is 79.5 Mt CO₂-eq.) In the period until 2050, the equivalent economic gain is calculated as 1.4 billion 2022\$, with 4.8 billion 2022\$ in 2050⁹. Therefore, an annual average of 2.2 billion 2022\$ of economic benefit can be achieved in these two areas. The economic benefit that can be gained by exporting to the EU is calculated as an annual average of 1.3 billion 2022\$, reaching 4.4 billion 2022\$ in 2050. Exports to the EU, corresponding to 30% of production, will account for approximately 40% of the total economic benefit throughout the period until 2050.

⁷ If all use is from groundwater resources, equivalent to 6% of current groundwater consumption.

⁸ With the IEA STEPS Scenario commodity price series. 0.6 billion 2022\$ with the IEA APS Scenario price series. In its analysis, IICEC considers the perspective of rising domestic production of oil and natural gas, with fossil fuel import rates decreasing by two-thirds. 1.1 billion 2022\$ with continuing import rates in fossil fuels.

⁹ With the IEA STEPS Scenario carbon price series. 1.8 billion 2022\$ with the IEA APS Scenario price series.

IICEC's analysis determined that an average annual investment of approximately 3.0 billion 2022\$ will be required, with approximately half of it focused on electricity production until 2050. This includes 1.6 billion 2022\$ for electricity production, 0.8 billion 2022\$ for electrolyzer installations, and 0.6 billion 2022\$ for other infrastructure. Expected technological advances provide improvements in electrolyzer costs in the period until 2050. The speed and optimization of development in infrastructure, which is one of the most important uncertainties in the value chain, are critical in terms of total cost.

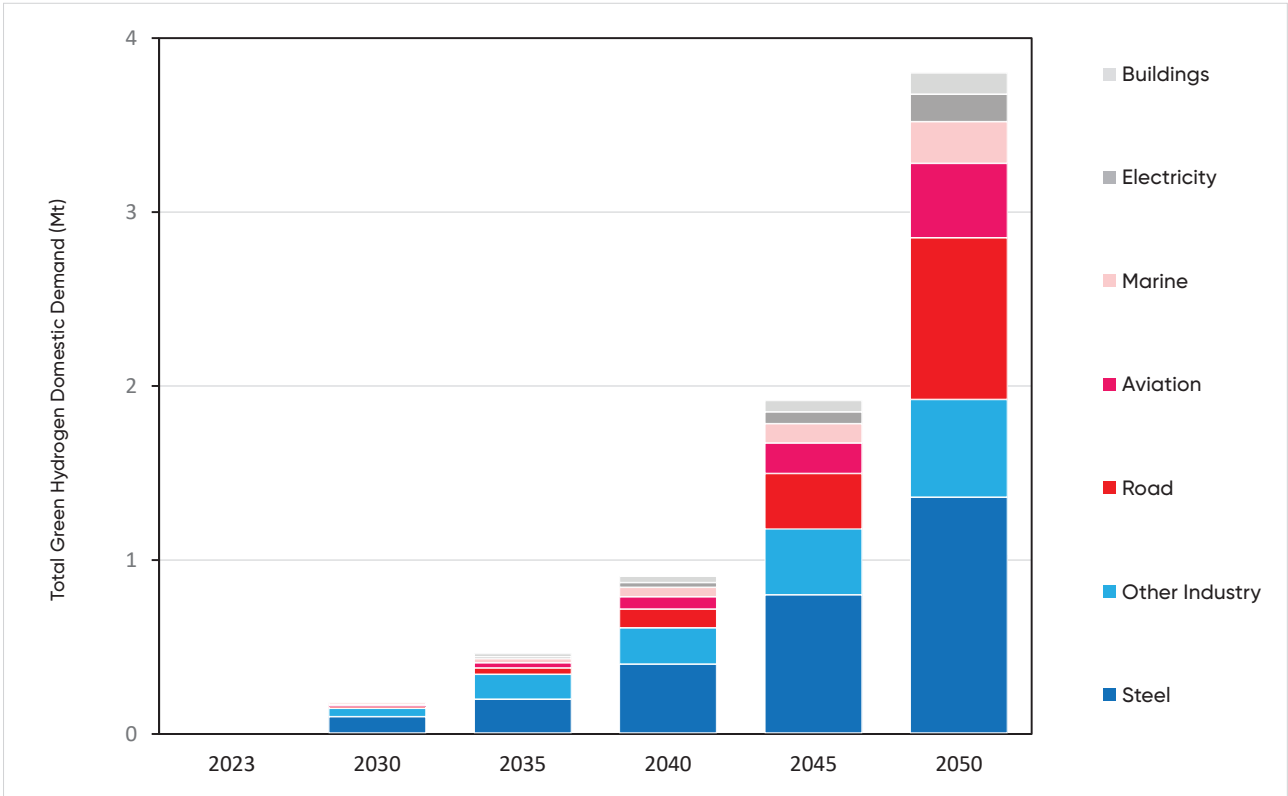
In the period until 2050, 3.5 billion 2022\$ of energy import, emission, and green hydrogen-export benefits are realized in return for an annual average investment of 3.0 billion 2022\$. This translates to a cumulative 77.2 billion 2022\$ in investments until 2050 and 91.7 billion 2022\$ in benefits (5.2 billion 2022\$ in investments and 12.3 billion 2022\$ in benefits in 2050). The cumulative benefit-cost multiplier is 1.2 until 2050 and reaches 2.4 annually by 2050, with the cumulative benefits exceeding costs around 2045. These analyses are largely consistent with the timing of green hydrogen becoming fully cost-competitive with traditional, fossil fuel-based alternatives.

An important contribution of green hydrogen is supporting energy security through the localization and diversification of energy supply. With the development of the ecosystem, critical gains in areas such as the localization of technologies will increase the benefit-cost multiplier and accelerate the returns on investment from a macro perspective. Developing and implementing support mechanisms like good practice examples in different regions at the initial development stages will strengthen predictability and multiply benefits within a long-term perspective.

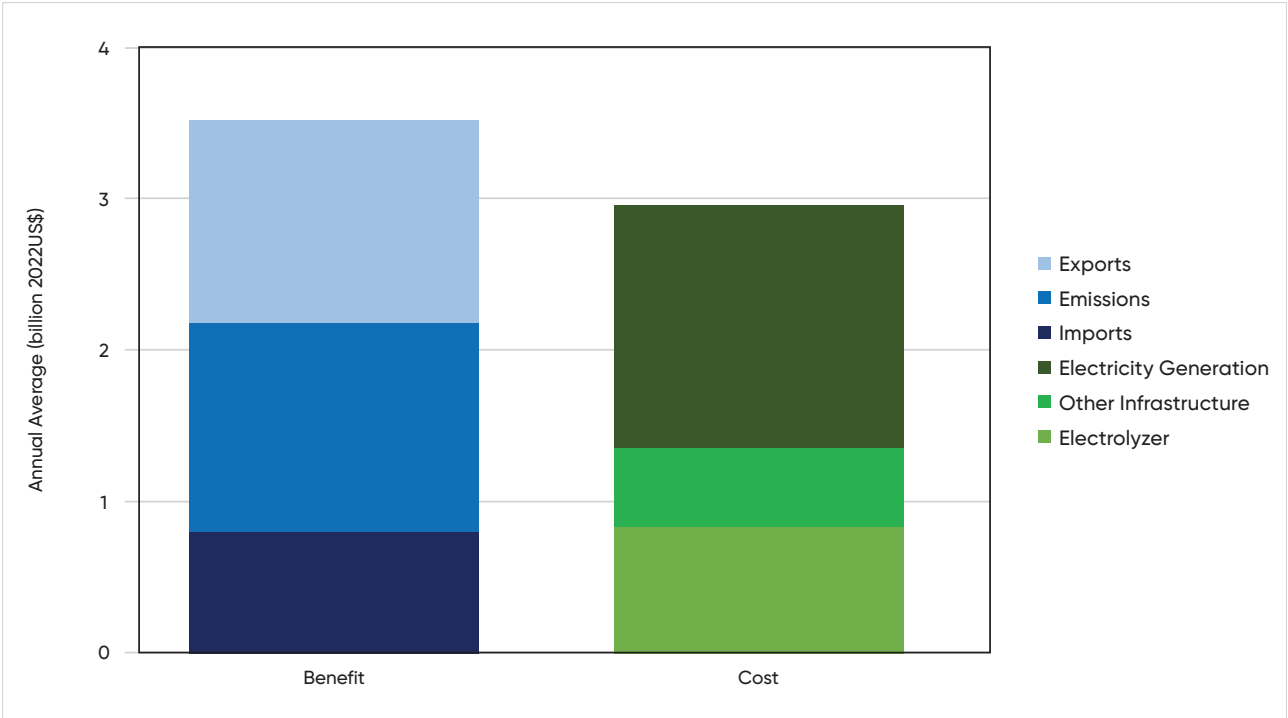
In addition to different price series regarding the development of medium- and long-term energy and carbon prices, the study also examines various factors regarding the benefit and cost dimensions of supply and demand, considering important uncertainties such as the change in fossil fuel-import dependency, the regional development of hydrogen and ammonia prices, and the speed of development of demand and infrastructure. Sensitivity analyses were also performed around this question. For example, with a 20% increase in infrastructure costs, the benefit-cost multiplier decreases by approximately 5%, while in the case of a 20% increase in hydrogen and ammonia export prices, the benefit-cost multiplier increases by 8%.

The growth in green hydrogen that can be achieved through integrated approaches to the development of the renewable energy and electricity sectors, compatible with development, energy, industry, and climate strategies and targets, can offer multidimensional contributions to a more secure and clean energy future with various technological advancements and benefits. All these benefits can be achieved through the government-industry-academia triangle of cooperation across several improvement areas: road maps supporting long-term goals; development of technical and regulatory infrastructures that place efficiency and safety at the center within a system perspective; market development and an investment environment supported by holistic planning; and R&D in future technologies together with localization and manufacturing capabilities, international collaboration, competent human resources, innovative business models, and greater sustainability.

Development of Green Hydrogen Domestic Demand (2023-2050, Mt/y)



Annual Average Benefit and Cost by Green Hydrogen Development (2023-2050, Billion 2022US\$/y)



IICEC Recommendations

IICEC recommends the following to harness Türkiye's high potential and advantages in green hydrogen and its related technologies and thus provide multiple benefits for energy security, clean energy transition, competitiveness, localization, and technology-oriented industrial development:

1. Determining road maps regarding the development perspectives within production, demand, and related infrastructures based on priority sectors and regions,
2. Developing technical and regulatory infrastructure, preparing and implementing long-term master plans that will ensure optimal resource use and maximum safety,
3. Establishing market and support mechanisms for efficient and predictable growth in the value chain, considering interactions with electricity, natural gas, carbon markets, and electricity-supply security,
4. Realizing opportunities in critical technologies, especially electrolyzers, storage, and fuel cells, and developing localization and manufacturing capabilities,
5. Strengthening international and regional cooperation, utilizing export opportunities to Europe with maximum benefits,
6. Implementing a broad sustainability perspective throughout the ecosystem, in areas such as wind and solar resources, water use, critical minerals, and relevant supply chains,
7. Developing qualified human resources and a talent pool and establishing a strong entrepreneurial ecosystem that will support sustainable growth and competitiveness objectives.

Notlar

A series of horizontal dotted lines for writing notes.

Notlar

A series of horizontal dotted lines for writing notes.

TÜRKİYE YEŞİL HİDROJEN GELECEĞİ | 2023



Sabancı
Üniversitesi

IICEC

SABANCI UNIVERSITY
ISTANBUL INTERNATIONAL
CENTER FOR ENERGY AND CLIMATE