

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANABİLİM DALI

YEŞİL HİDROJENİN TÜRKİYE’NİN ENERJİ
GELECEĞİNDEKİ ROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANSU ATILGAN

BALIKESİR, 2026

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANABİLİM DALI

YEŞİL HİDROJENİN TÜRKİYE’NİN ENERJİ
GELECEĞİNDEKİ ROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANSU ATILGAN

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. KUMRU TÜRKÖZ

BALIKESİR, 2026

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İktisat Anabilim Dalı'nda 201312505001 numaralı Cansu ATILGAN hazırladığı Yeşil Hidrojenin Türkiye'nin Enerji Geleceğindeki Rolü konulu YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 27.04.2026 tarihinde yapılmış, sorulan sorulara alınan cevaplar sonunda tezin onayına OY BİRLİĞİ ile karar verilmiştir.

Üye (Başkan) Prof. Dr. Hakan ÇETİNTAŞ

İmza

Üye (Danışman) Doç. Dr. Kumru TÜRKÖZ

İmza

Üye Prof. Dr. Melih ÖZÇALIK

İmza

Enstitü Onayı

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı ve
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.
- Yükseköğretim Kurulu tarafından 2024 yılında yayınlanan “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber” ve Üniversitemiz Sosyal Bilimler Enstitüsü Lisansüstü Çalışmalarda Üretken Yapay Zekâ Kullanımı: Etik İlkeler ve Uygulama Rehberi hakkında bilgi sahibiyim. Üretken yapay zekânın kullanılmasına ilişkin doğabilecek sorumluluklarımı kabul ettiğimi beyan ederim.

27/04/2026

İmza

Cansu ATILGAN

ÖNSÖZ

Çocukluğunu 90'lı yıllarda geçirmiş bir birey olarak iklim değişikliği kavramıyla büyüyen bir kuşağın parçasıyım. Ozon tabakasının delinmesi ve küresel ısınma gibi sorunlar hayatın her alanında karşıma çıktı ve bu durum çevre bilinci yüksek bir insana dönüşmeme neden oldu. Bugün bir anne olarak gelecek kuşaklara karşı da çevrenin korunmasını bir sorumluluk olarak görüyorum. Türkiye'nin temiz enerji dönüşümüne bu nedenle özel bir ilgi duydum ve düşük karbonlu bir enerji geleceğine katkı sunabilmesi amacıyla bu tez çalışmasını ortaya koydum. Bu tez çalışması ile Türkiye'nin enerji geleceğinde yeşil hidrojenin rolünün ve iklim değişikliği ile mücadelede sağlayabileceği net katkıların belirlenmesi hedeflenmektedir.

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca kıymetli katkılarıyla ve yönlendirmeleriyle bana yolculuğumda ışık tutan çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Kumru TÜRKÖZ'e ne kadar teşekkür etsem az. Desteği, ufuk açan akademik katkıları, süreç boyunca gösterdiği ilgisi ve anlayışı için kendisine minnettarım.

Yoğun tempolu iş ve çocuklu hayatımızda destekleriyle bu süreci devam ettirmemi ve tamamlamamı mümkün kılan eşim Onur ATILGAN'a özel olarak teşekkür ediyorum. Ve biricik kızım İpek. Senden aldığım güçle hep daha iyisini yapmaya ve daha iyi bir insan olmaya çalışıyorum. Bana kattıkların için teşekkür ederim.

BALIKESİR, 2026

CANSU ATILGAN

ÖZET

YEŞİL HİDROJENİN TÜRKİYE’NİN ENERJİ GELECEĞİNDEKİ ROLÜ

ATILGAN, Cansu

Yüksek Lisans, İktisat Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kumru TÜRKÖZ

2026, 85 Sayfa

Fosil yakıt kullanımının iklim değişikliği ve çevresel bozulmanın katalizörlerinden biri olması sebebiyle enerji dönüşümü küresel ölçekte zorunlu hale gelmiştir. Bu enerji dönüşümünde, çevreye zarar vermeyen ve fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahip olması nedeniyle son yıllarda yeşil hidrojen ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, Türkiye’nin enerji geleceğinde yeşil hidrojenin rolünü araştırmak hedeflenmiştir. Çalışmada ilk aşamada, 1988-2024 döneminde Türkiye sanayi sektöründeki doğalgaz tüketimi ile doğalgaz fiyatı, sanayi üretim endeksi ve yenilenebilir enerji kurulu gücü arasındaki ilişki Gecikmesi Dağıtılmış Otoregresif Sınır Testi (Autoregressive Distributed Lag Bound Test [ARDL]) yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Ampirik bulgular, değişkenler arasında bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu ve doğalgaz tüketimi üzerinde kısa dönemde fiyat ve sanayi üretiminin, uzun dönemde ise yalnızca sanayi üretiminin anlamlı bir etkisi olduğunu göstermiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, Türkiye’nin net sıfır emisyon hedefinin bulunduğu 2053 yılına kadar sanayi doğalgaz tüketimi tahmin edilerek bu dönemde hem doğalgazdan hem de emisyonlardan sağlanabilecek tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Buna göre, 2030 yılına kadar sanayi sektöründe yeşil hidrojenin doğalgazın %5’ini ikame etmesi durumunda yaklaşık 5,1 milyon TEP doğalgaz ve 12,7 milyon ton CO₂; 2030–2053 döneminde ise yeşil hidrojenin doğalgazın %10’unu ikame etmesi hâlinde yaklaşık 70,6 milyon TEP düzeyinde doğalgaz ve 176,6 milyon ton CO₂ düzeyinde emisyon tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir.

Ampirik bulgular, dünya genelinde enerji dönüşümünde uygulanabilirliği hızla ilerleyen yeşil hidrojenin, net sıfır emisyon hedeflerini karşılama açısından Türkiye için de önemli bir fırsat olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Yeşil

hidrojen ekosisteminin güçlendirilmesi için atılacak adımlar, iklim değışikliğı ile mücadelenin yanı sıra fosil yakıt bağımlılığının azaltılması, enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: İklim Değışikliğı, Fosil Yakıtlar, Yenilenebilir Enerji, Yeşil Hidrojen.

ABSTRACT

THE ROLE OF GREEN HYDROGEN IN TÜRKİYE’S ENERGY FUTURE

ATILGAN, Cansu

Master Thesis, Department of Economics

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kumru TÜRKÖZ

2026, 85 Pages

The use of fossil fuels being one of the catalysts for climate change and environmental degradation has made energy transition a necessity on a global scale. In this energy transition, green hydrogen has come to the forefront in recent years due to its potential to replace fossil fuels without harming the environment. This study aims to investigate the role of green hydrogen in Türkiye’s energy future. In the first stage of the study, the relationship between natural gas consumption in Türkiye’s industrial sector and natural gas prices, industrial production index, and renewable energy installed capacity is analyzed with the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) Bounds Testing approach for the period 1988–2024. Empirical findings indicate that there is a cointegration relationship between the variables and that prices and industrial production have a significant effect on natural gas consumption in the short run, while only industrial production has a significant effect in the long run. In the second stage of the study, industrial natural gas consumption is forecast up to 2053, the year of Türkiye’s net-zero emissions target, and the potential savings in both natural gas consumption and emissions over this period are calculated. Accordingly, if green hydrogen replaces 5% of natural gas in the industrial sector by 2030, approximately 5.1 million TEP of natural gas and 12.7 million tons of CO₂ emissions would be saved. Furthermore, between 2030 and 2053, if the replacement rate reaches 10%, approximately 70.6 million TEP of natural gas and 176.6 million tons of CO₂ emissions would be saved.

Empirical findings indicate that green hydrogen, which is increasingly applied in the global energy transition, represents an important opportunity for Türkiye in terms of meeting net-zero emission targets. Steps taken to strengthen the green hydrogen ecosystem have the potential to contribute not only to combating

climate change, but also to reducing fossil fuel dependency, strengthening energy supply security, and achieving sustainability goals.

Keywords: Climate Change, Fossil Fuels, Renewable Energy, Green Hydrogen.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Konusu	1
1.2. Araştırmanın Amacı	1
1.3. Araştırmanın Önemi	2
1.4. Araştırmanın Varsayımları	2
1.5. Araştırmanın Sınırlılıkları	2
1.6. Tanımlar	3
2. İLGİLİ ALANYAZIN	5
2.1. Enerji Dönüşümünde Hidrojen	5
2.1.1. Hidrojen Enerjisi	11
2.1.2. Hidrojenin Üretilmesi, Depolanması ve Taşınması	13
2.1.3. Hidrojenin Kullanım Alanları	17
2.1.3.1. Enerji Üretimi	18
2.1.3.2. Ulaşım	19
2.1.3.3. Sanayi	20
2.1.3.4. Konutlar ve Isıtma	21
2.1.3.5. Enerji Depolama	22
2.1.4. Hidrojen Ekonomisi ve Enerji Dönüşümündeki Önemi	23
2.2. Hidrojenin Renkleri	24
2.2.1. Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Türleri	24
2.2.2. Yeşil Hidrojen	26
2.2.3. Yeşil Hidrojene Geçişin Engelleri ve Politika Gereksinimleri	27
2.3. Yeşil Hidrojene Küresel ve Bölgesel Bakış	30

2.3.1. Dünya Geneline Yeşil Hidrojen	30
2.3.2. Avrupa Birliği'nde Yeşil Hidrojen	33
2.3.3. Türkiye'de Yeşil Hidrojen	36
2.4. İklim Değişikliği ile Mücadelede Yeşil Hidrojenin Rolü	39
2.4.1. Yeşil Hidrojenin İklim Değişikliğiyle Mücadeledeki Rolü ve Çevresel Faydaları	40
2.4.2. Sosyo-Ekonomik Faydaları	42
3. YÖNTEM	43
3.1. Türkiye'nin 2053 Net-Sıfır Emisyon Hedefinde Yeşil Hidrojenin Rolüne İlişkin Analiz	43
3.1.1. İlgili Literatür	44
3.1.2. Analizin Amacı	51
3.1.3. Yöntem, Kapsam ve Kısıtlar	52
3.1.4. Veri Seti ve Değişken Tanımları	56
4. BULGULAR VE YORUMLAR	59
4.1. Temel Bulgular	59
4.2. 2053'e Yönelik Talep Projeksiyonu	64
4.3. Yeşil Hidrojenle İkame ve Emisyon Azaltımı Hesabı	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
5.1. Sonuçlar	71
5.2. Öneriler	73
KAYNAKÇA	76

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1. Değişkenlere Ait Tanımlar	56
Tablo 2. Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler	57
Tablo 3. Durağanlık Testi Sonuçları	59
Tablo 4. ARDL Modeline İlişkin Sonuçlar	60
Tablo 5. Eşbütünleşme Sınır Testi Sonuçları	61
Tablo 6. Kısa ve Uzun Dönem Katsayıları.....	62
Tablo 7. 2053 Yılına Kadar Uzanan Sanayi Doğalgaz Tüketim Tahminleri	66
Tablo 8. %5 ve %10 Yeşil Hidrojen İkamesi Senaryosu	68
Tablo 9. CO ₂ Azaltımı Öngörülleri	69

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. Sera Gazı Emisyonlarının Seyri ve Sektörel Kaynakları.....	6
Şekil 2. Dünya Genelinde Kaynaklarına Göre Elektrik Kurulu Gücü (Megawatt [MW])	8
Şekil 3. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması	14
Şekil 4. Sektörlere ve Bölgelere Göre Hidrojen Talebi	18
Şekil 5. Kaynaklarına Göre Hidrojen Üretim Yöntemleri	25
Şekil 6. Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Maliyeti	28
Şekil 7. Temiz Hidrojen Yatırımlarının Bölgesel Dağılımı	31
Şekil 8. Yıllara Göre Yeşil Hidrojen ve Mavi Hidrojen Yatırımları	32
Şekil 9. Avrupa'da Ülkelere ve Yıllara Göre Kurulu Elektrolizör Kapasitesi	35
Şekil 10. Türkiye'nin Yeşil Hidrojene Yönelik Hedefleri ve Politikaları	37
Şekil 11. CUSUM ve CUSUMSQ Parametre Testleri	61
Şekil 12. 2053 Yılına İlişkin Tahmin Sonuçları	65

KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AEL	: Alkaline Elektrolizör
AlH₃	: Alüminyum Hidrit
ARDL	: Gecikmesi Dağıtılmış Otoregresif Model
AR-GE	: Araştırma-Geliştirme
ARIMA	: Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama
BH₃	: Boran
BM	: Birleşmiş Milletler
BP	: British Petroleum
CBAM	: Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
CCUS	: Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama
CUSUM	: Artıkların Kümülatif Toplamı
CUSUMSQ	: Artıkların Karesel Kümülatif Toplamı
CO₂	: Karbondioksit
COINTEQ	: Hata Düzeltme Terimi Katsayısı
DOLS	: Dinamik En Küçük Kareler Yöntemi
ECT	: Hata Düzeltme Terimi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EU	: Avrupa Birliği
EUROSTAT	: Avrupa Birliği İstatistik Ofisi
FMOLS	: Tam Düzeltilmiş En Küçük Kareler Yöntemi
GSYH	: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla
GW	: Gigavat
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli

H2DER	: Yeşil Hidrojen Üreticileri Derneği
H₂	: Hidrojen
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IIEEC	: İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
kWh	: Kilovat Saat
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizi
MMBtu	: 1 Milyon İngiliz Isı Birimi
MW	: Megavat
MWh	: Megavat Saat
NaBH₄	: Sodyum Bor Hidrür
NH₃	: Amonyak
Nm³	: Normal Metreküp
NO_x	: Azot Oksitler
OECD	: Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Teşkilatı
P2P	: Power to Power
P2X	: Power to X
PEM	: Proton Exchange Membrane Elektrolizör
SDG	: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SIC	: Schwarz Bilgi Kriteri
SMR	: Buhar Metan Reformasyonu
SOE	: Solid Oxide Elektrolizör
SO_x	: Kükürt Oksitler
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol

TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu

ÜFE : Üretici Fiyat Endeksi

1. GİRİŞ

Bu bölümde, araştırmanın genel çerçevesi ortaya konulmakta; araştırmanın konusu, amacı, önemi ve çalışmanın odak noktası açıklanmaktadır. Ayrıca, analiz sürecinde benimsenen varsayımlar ile çalışmanın kapsamını belirleyen sınırlılıklar ele alınmaktadır. Araştırmada kullanılan temel kavramlara ilişkin tanımlar da sunulmaktadır. İlerleyen bölümlerde yapılacak analizler için kavramsal bir zemin oluşturulmaktadır.

1.1. Araştırmanın Konusu

Çevresel bozulma, enerji güvenliği ve sürdürülebilirliğin sağlanması gibi kaygılar, küresel ölçekte enerji dönüşümünü zorunlu kılmakta; bu dönüşüm süreci, ülkelerin enerji sistemlerinde düşük karbonlu ve yenilikçi çözümlere yönelmesini beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda araştırmanın konusu, yeşil hidrojenin Türkiye'nin enerji dönüşümündeki rolü ve enerji geleceği açısından taşıdığı stratejik önemin incelenmesidir. Çalışma, yeşil hidrojenin üretim, kullanım ve yaygınlaşma potansiyelini; sanayi dönüşümü ve iklim değişikliğiyle mücadele perspektiflerinden ele almaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda yeşil hidrojenin enerji sistemine sanayi sektörü üzerinden sağlayabileceği olası katkılar analiz edilmektedir.

1.2. Araştırmanın Amacı

Araştırmanın temel amacı, yeşil hidrojenin Türkiye'nin enerji geleceğindeki rolünü ortaya koymak ve sanayi sektöründe doğalgaz tüketiminin yeşil hidrojen ile ikame edilmesine yönelik potansiyeli nicel olarak analiz etmektir.

Bu doğrultuda, Türkiye'de 1988-2024 dönemine ait veriler kullanılarak sanayi doğalgaz talebinin uzun dönemli belirleyicileri ARDL sınır testi yöntemiyle incelenmekte; 2053 yılına ilişkin sanayi doğalgaz talebi tahmin edilmekte ve farklı

ikame senaryoları altında yeşil hidrojenin emisyon azaltımı ile enerji dönüşümüne sağlayabileceği katkılar değerlendirilmektedir.

1.3. Araştırmanın Önemi

Araştırma, yeşil hidrojenin Türkiye'nin iklim politikaları, sanayi dönüşümü ve enerji arz güvenliği açısından stratejik bir araç olduğunu ortaya koyması bakımından önem taşımaktadır. Literatürde yeşil hidrojenin çevresel ve teknolojik boyutlarını ele alan çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, Türkiye özelinde sanayi doğalgaz talebi ile yeşil hidrojen ikamesi arasındaki ilişkiyi ekonometrik analizle inceleyen nicel çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurarak politika yapıcılar ve karar alıcılar için analitik bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. Enerji politikaları, karbon azaltımı ve sanayi dönüşümü konularında veri temelli bir referans sunan çalışmanın, bölgesel ve ulusal düzeyde geliştirilen hidrojen stratejilerine katkı sağlaması beklenmektedir.

1.4. Araştırmanın Varsayımları

Araştırmada kullanılan veri setleri güvenilir ve karşılaştırılabilir niteliktedir. Mevcut literatür dikkate alınarak belirlenen bağımsız değişkenlerin sanayi doğalgaz talebini açıklamada yeterli olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, yeşil hidrojenin teknik olarak sanayi sektöründe doğalgaz ile belirli oranlarda ikame edilebileceği ve bu ikamenin öngörülen senaryolar kapsamında uygulanabilir olduğu kabul edilmektedir.

Ekonometrik analizde kullanılan modelin tahmin ettiği uzun dönem ilişkilerin ceteris paribus varsayımı altında geçerli olduğu çalışmanın temel dayanakları arasında yer almaktadır. Ancak teknolojik gelişmeler, maliyet dinamikleri ve politika değişiklikleri zaman içerisinde farklı sonuçlar doğurabilir.

1.5. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu araştırma, veri erişilebilirliği ve zaman boyutu açısından sınırlılıklara sahip olup 1988-2024 dönemine ait veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca

araştırma, yeşil hidrojenin sanayi sektöründe doğalgazla ikame edilmesi ile sınırlı tutulmuş, diğer sektörler kapsam dışı bırakılmıştır. Sanayi sektörünün ele alınmasının temel nedeni, özellikle demir-çelik, kimya, çimento ve cam gibi emisyon azaltımının zor olduğu sektörlerde yüksek sıcaklık gerektiren üretim süreçlerinin yaygın olması ve bu süreçlerde doğalgazın temel enerji girdisi olarak kullanılmasıdır. Söz konusu sektörlerde yeşil hidrojenin doğalgazla doğrudan ikamesi veya doğalgazla karıştırılarak kullanılması uygulanabilir bir dönüşüm alternatifi sunmaktadır. Ayrıca hidrojenin gaz formunda olması, mevcut doğalgaz altyapısıyla teknik uyumluluk sağlaması ve ilave altyapı yatırım ihtiyacının görece az olması sebebiyle çalışmada yeşil hidrojenin diğer fosil yakıtlar yerine doğalgaz ikamesi çerçevesinde ele alınması uygun görülmüştür.

Sanayi sektöründe her bir alt sektörün yeşil hidrojen kullanımına ilişkin farklı sıcaklık gereksinimleri, üretim süreçleri, altyapı ihtiyaçları ve dönüşüm maliyetleri bulunmakta olup bu farklılıkların detaylı biçimde analiz edilmesi, sektör bazlı teknik çalışmaların kapsamına girmektedir. Bu nedenle, çalışmada sanayi sektörü bütüncül bir yaklaşımla ele alınmış, alt sektörlerle özgü teknik ayrıntılar araştırmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

1.6. Tanımlar

Bu çalışmada kullanılan kavramların genel tanımlarına aşağıda yer verilmiştir. Ayrıntılı teknik açıklamalar ve literatürde yer alan hususlar, ilgili alt bölümlerde detaylı olarak ele alınmaktadır.

Yeşil Hidrojen: Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak, elektroliz yöntemiyle suyun hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayrıştırılması sonucu elde edilen hidrojendir.

Enerji Dönüşümü: Fosil yakıtlara dayalı enerji üretim ve tüketim yapısından, yenilenebilir ve düşük karbonlu enerji kaynaklarının ağırlık kazandığı sürdürülebilir bir enerji sistemine geçiş sürecini ifade etmektedir.

Net Sıfır Emisyon: Belirli bir dönem sonunda atmosfere salınan sera gazı miktarı ile doğal veya teknolojik yöntemlerle azaltılan veya dengelenen emisyonların

eşitlenmesi durumunu ifade etmektedir. Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi, çalışmanın temel politika çerçevesini oluşturmaktadır.

Bağımlı Değişken: Ekonometrik analiz kapsamında, sanayi sektöründe kullanılan toplam doğalgaz tüketimini ifade etmekte olup, yeşil hidrojen ikamesinin potansiyel etkilerinin değerlendirilmesinde temel gösterge olarak kullanılmaktadır.

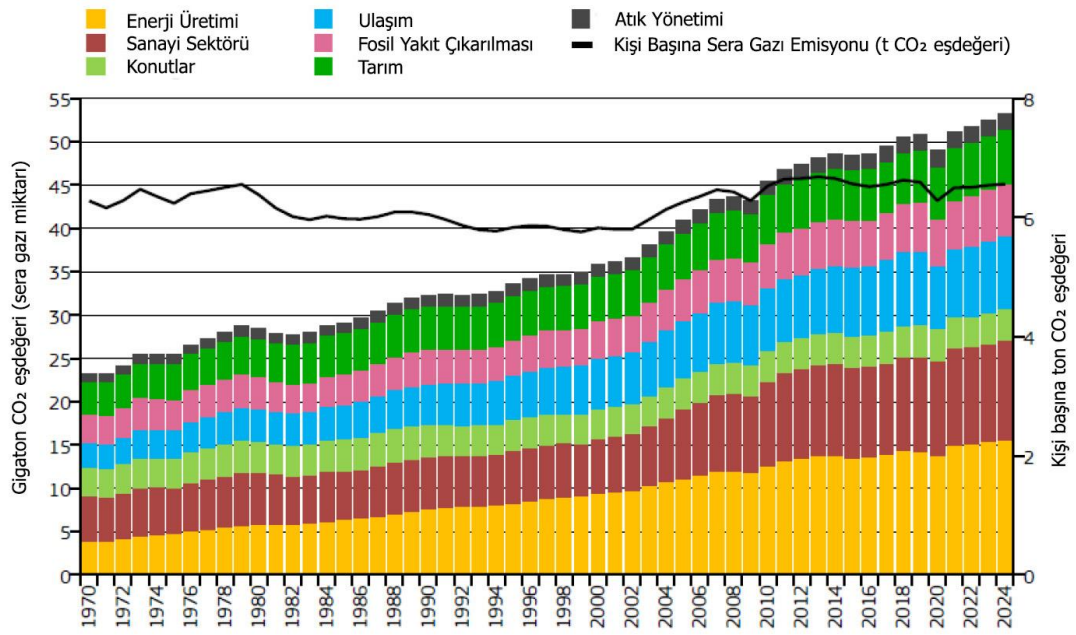
Bağımsız Değişkenler: Sanayi doğalgaz tüketimini etkilediği varsayılan doğalgaz fiyatı, sanayi üretim endeksi ve yenilenebilir enerji kurulu gücü göstergelerini ifade etmektedir. Bu değişkenlerin ayrıntılı tanımları ve veri kaynakları yöntem bölümünde sunulmaktadır.

2. İLGİLİ ALANYAZIN

Bu bölümde hidrojenin enerji dönüşümündeki yeri, üretim süreçleri, depolama ve taşıma yöntemleri ile farklı kullanım alanları incelenmekte; hidrojen ekonomisi ve hidrojenin enerji sistemleri açısından önemi değerlendirilmektedir. Ardından, üretim yöntemlerine göre hidrojen türleri açıklanarak yeşil hidrojene odaklanılmakta, yeşil hidrojene geçiş sürecinde karşılaşılan engeller ve politika gereksinimleri ele alınmaktadır. Bölümün ilerleyen kısmında yeşil hidrojenin küresel, bölgesel ve Türkiye ölçeğindeki gelişimi incelenmekte; son olarak iklim değişikliğiyle mücadelede yeşil hidrojenin çevresel ve sosyo-ekonomik faydaları değerlendirilmektedir.

2.1. Enerji Dönüşümünde Hidrojen

Dünya, 21. yüzyılın en büyük küresel zorluklarından biri olan iklim değişikliğiyle karşı karşıyadır. Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'ne göre insan kaynaklı faaliyetler sanayi öncesi döneme kıyasla küresel sıcaklığın yaklaşık 1,0°C yükselmesine neden olmuştur (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018, s. 4). Sera gazı emisyonları sanayi devriminin başlamasıyla birlikte hızla artmış, 20. yüzyılın ortalarından itibaren ivmelenen sanayileşme ve enerji tüketimi, daha fazla emisyon salınımına yol açmıştır. Özellikle 1970'lerden itibaren emisyonlardaki artış hızlanmış ve günümüze kadar sürekli bir yükselme trendi göstermiştir (European Comission Joint Research Centre, 2025, s. 17).



Şekil 1. Sera Gazı Emisyonlarının Seyri ve Sektörel Kaynakları

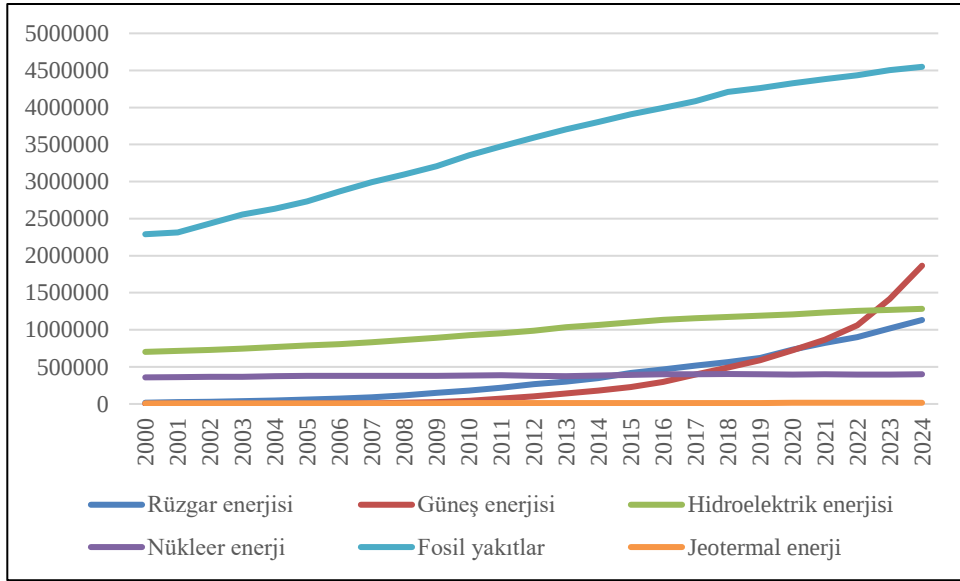
Kaynak: European Comission Joint Research Centre, 2025.

Küresel emisyonlar tüm sektörlerde yaygın ve sistemik bir artış göstermektedir. Özellikle enerji üretimi ile sanayi sektörleri küresel emisyonların temel belirleyicileri olarak ön plana çıkmaktadır. Şekil 1 incelendiğinde, 1990'ların ortalarından itibaren toplam sera gazı emisyonlarının sürekli bir artış trendi sergilediği ve bu artışta ağırlıklı olarak enerji sektörü ile endüstriyel süreçlerin belirleyici olduğu görülmektedir. Enerji sektörüne ilişkin emisyonlar toplam emisyonlar içinde en yüksek paya sahip olup, fosil yakıt kullanımının devam etmesi nedeniyle yıllar içinde düzenli bir artış göstermektedir. Bununla birlikte sanayi sektörü kaynaklı emisyonların 2000'li yıllardan sonra daha belirgin biçimde yükseldiği dikkat çekmektedir. Ulaştırma kaynaklı emisyonlar enerji üretimi ve sanayiye kıyasla daha düşük paya sahip olmakla birlikte, 2000 sonrasında ivmelenen bir artış trendi göstermektedir. Tarım, atık yönetimi, ısınma, fosil yakıtların çıkarılması ve işlenmesi gibi diğer sektörlerin payı nispeten daha sınırlı kalmakta olup toplam emisyonlar içindeki artış eğilimine katkı sağlamayı sürdürmektedir.

Mevcut eğilimlerin sürmesi hâlinde küresel ısınmanın 2030–2052 yılları arasında 1,5°C seviyesine ulaşması yüksek olasılık olarak değerlendirilmektedir (IPCC, 2018, s. 4).

İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel çabaların hız kazanmasına ve somut politika adımlarının hayata geçirilmesine yol açmıştır. 1992’de imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği ereve Sözleşmesi ile ülkeler, sera gazı emisyonlarını izlemek, raporlamak ve azaltmak için birlikte çalışmayı taahhüt etmiştir (Birleşmiş Milletler [BM], 1992, s. 5). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği ereve Sözleşmesi’ne ek bir protokol olarak imzalanan Kyoto Protokolü, taraf olan ülkelere 2008–2012 taahhüt döneminde emisyonlarını 1990 seviyelerinin en az %5 altına indirme yükümlülüğü getirmiştir (BM, 1997, s. 4). Bu gelişmeler ilerleyen dönemde Paris Anlaşması’na zemin hazırlamış ve 2016 yılında yürürlüğe giren Anlaşmayla küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerin 1.5°C zerine sınırlama hedefi ortaya konulmuştur (evre, şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025). Avrupa Birliği (AB) tarafından 2019 yılında açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa’yı ilk iklim-nötr kıta haline getirmeyi hedefleyen bir strateji olarak ortaya konulmuştur (http-1). Bu hedefe ulaşmak için sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar en az %55 azaltma taahhüdünde bulunan ve “55’e Uyum (Fit for 55)” olarak adlandırılan yasal düzenleme süreci başlatılmıştır (European Union [EU], 2023, s. 54).

İklim değişikliği ile mücadele, sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişi ve enerji dönüşümünü zorunlu hale getirmiştir. Enerji, ısıtma, ulaşım ve sanayi sektörlerinde karbondioksit (CO₂) emisyonlarının büyük bölümünden sorumlu olan fosil yakıtlara yönelik küresel bağımlılık, bu dönüşümün önündeki en temel engellerden birini oluşturmaktadır (Oliveira vd., 2021, s. 1). şekil 2’de görüleceği üzere küresel elektrik kurulu gücünde fosil yakıtlar en baskın paya sahip olup, kullanımları her geçen yıl artmaktadır. Fosil yakıtların yoğun kullanımı çevresel sorunları tetikleyip çevresel bozulmaya yol açmakta, yenilenemeyen enerji kaynaklarının tükenmesine neden olmakta ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde hızla artan enerji talebi üzerinde ek bir baskı oluşturmaktadır (Dincer, 2000, s. 167).



Şekil 2. Dünya Geneline Kaynaklarına Göre Elektrik Kurulu Gücü (Megawatt [MW])

Kaynak: International Renewable Energy Agency [IRENA], 2025.

Fosil yakıtlar açısından doğalgazın, kömür ve petrol gibi yüksek karbon yoğunluklu yakıtların alternatifi olarak kullanımının küresel sera gazı emisyonlarında kısmi bir azalma sağladığı vurgulanmaktadır. Doğalgazın düşük hava kirleticisi emisyon profili, hava kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlasa da, gaz değeri zinciri boyunca atmosfere sızan metan emisyonları bu avantajını kısmen sınırlamaktadır (International Energy Agency [IEA], 2019a, s. 24). Dolayısıyla, yalnızca fosil yakıtlar arasında yapılan geçişlerin iklim değişikliğini önlemede kalıcı bir çözüm sunmadığı, enerji dönüşümünde fosil yakıtlar yerine kullanılabilecek başka enerji kaynaklarına ihtiyaç olduğu değerlendirilmektedir.

Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt bağımlılığının azaltılması ve enerji sisteminin karbonsuzlaştırılması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. İklim değişikliğiyle mücadeleyle yönelik politikaların güçlenmesi ve Rusya-Ukrayna Savaşı sonrasında artan enerji arz güvenliği kaygıları, yenilenebilir enerjiye geçiş sürecini hızlandırmıştır (Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi, 2023, s. 3). Şekil 2’de görüldüğü gibi 2010’lu yıllardan itibaren rüzgâr ve güneş enerjisi kurulu gücünde önemli artışlar yaşanmış, özellikle güneş enerjisinde son yıllarda dikkate değer bir ivme gözlenmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji dönüşümündeki stratejik önemi tartışmasız olmakla birlikte, bu kaynakların yaygın ve etkin bir şekilde enerji sistemlerine entegrasyonu bazı teknik ve yapısal zorlukları da beraberinde getirmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının doğasında bulunan mevsimsellik, kesintili üretim (intermittency) ve bölgesel değişkenlik gibi faktörler, enerji üretiminin sürekliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir (Dincer, 2000, s.167). Ayrıca geleneksel elektrik santrallerinin aksine, talep edildiğinde üretim yapabilen bir yapıları bulunmadığından, yenilenebilir enerji kaynakları ihtiyaç fazlası enerjiyi daha sonra kullanılmak üzere depolamayı gerektirmekte bu nedenle enerji depolama, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde genellikle önemli bir zorluk olarak değerlendirilmektedir (Masri, 2023, s. 16).

Yenilenebilir enerjinin enerji dönüşümü açısından bir diğer zorluğu, bu kaynakların tüm sektörlerde doğrudan ikame edilememesidir. Örneğin; sanayi sektörü, son kullanım alanlarının çeşitliliği, yüksek sıcaklık gereksinimleri ve kesintisiz üretim süreçleri gibi bir dizi etken nedeniyle elektrifikasyonu en güç sektörlerden biridir (Wei vd., 2019, s. 140). Dolayısıyla enerji dönüşümünün yalnızca yenilenebilir kaynakların yaygınlaşmasıyla sınırlı olmadığı; aynı zamanda bu kaynaklardan üretilen enerjinin depolanması, taşınması ve farklı sektörlerde kullanılabilmesini mümkün kılacak tamamlayıcı çözümler gerektirdiği açıktır.

Bu çerçevede hidrojen, enerji dönüşümünde etkili bir çözüm olarak son yıllarda dikkat çekmektedir. Hidrojen, fosil yakıtların tükenme riski ve çevresel etkilerine karşı sürdürülebilir bir alternatif sunmakta; elektrifikasyonun zor olduğu ağır sanayi, taşımacılık ve ısıtma gibi sektörlerde önemli bir tamamlayıcı rol üstlenmektedir (Tutar ve Eren, 2011, s. 6). Ayrıca hidrojen, yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin depolanması ve taşınması amacıyla kullanılabilmekte ve bu yönüyle enerji arzındaki mevsimsel dalgalanmaların dengelenmesine katkı sağlamaktadır (Mielich vd., 2025, s. 156). Bu yönleriyle hidrojen, enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi ve küresel karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşılmasında kilit bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Hidrojenin üretilmesi ve kullanımı geçmişe dayansa da, uzun yıllar boyunca enerji üretimi ya da depolama alanında diğer enerji kaynaklarına bir alternatif olarak

öne çıkamamıştır (Tunçbilek, 2024, s.190). Hidrojenin enerji dönüşümünde önemli bir role sahip olabileceği ilk kez 1970’li yılların ortalarında yaşanan enerji krizi ile birlikte gündeme gelmiştir (Golstov vd., 2006, s. 153). Son yıllarda hidrojene yönelik ilgi dünya genelinde hızla artmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Uluslararası Enerji Ajansı ve Dünya Enerji Konseyi gibi önemli kuruluşlar, hidrojen teknolojilerine dair çalışmalarını yoğunlaştırmakta, pek çok ülkede ulusal hidrojen dernekleri kurulmaktadır (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 9). 2017 yılında İsviçre’de düzenlenen Dünya Ekonomik Forumu’nda 13 büyük endüstri kuruluşu bir araya gelerek Hidrojen Konseyi’nin kurulmasını sağlamıştır. Günümüzde konseyin tüm hidrojen değer zincirini temsil eden 140 üyesi bulunmaktadır ([http-2](#)). Hidrojen alanında aktif olarak çalışan diğer bir kurum olan Hydrogen Europe, hidrojen endüstrisinin ve ilgili paydaşların çıkarlarını temsil eden Avrupa merkezli bir kuruluş olup hidrojenin sıfır emisyonlu bir toplumun anahtarı olarak kullanılmasını teşvik etmektedir ve 600’den fazla üyeye sahiptir ([http-3](#)).

Bu kurumsal girişimlere ek olarak, hükümetler de sektöre yönelik önemli adımlar atmaktadır. Küresel ölçekte, Güney Kore, Çin, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi önde gelen ekonomilerin de aralarında bulunduğu 20’den fazla ülke ve bölge ulusal hidrojen enerji stratejileri oluşturmuştur. Bu stratejiler, hidrojen alanında araştırma-geliştirme (ar-ge) faaliyetlerini teşvik etmeyi ve sanayi altyapısının büyümesini desteklemeyi amaçlamaktadır (Xie vd., 2024, s. 2). Türkiye de 2023 yılında Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası’nı yayımlamış; net vizyon ve politika önerileri hazırlamıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2023).

Kamu tarafından atılan bu stratejik adımların yanında özel sektörün de talebi artmakta ve küresel hidrojen pazarı son yıllarda hızla genişlemektedir. Hidrojen Konseyi’nin 2021’de yayımlanan ilk Hydrogen Insights raporundan itibaren tüm dünya genelinde hidrojen yatırımları 8 kat artmıştır. Toplam yatırım tutarı 2020’de 90 milyar ABD dolarından, 2022’de 390 milyar ABD dolarına ve 2024 yılında 680 milyar ABD dolarına yükselmiştir. Bu büyüme; artan enflasyon ve faiz oranları, küresel enerji piyasalarındaki dalgalanmalar, tedarik zinciri kısıtları ve beklenenden yüksek yenilenebilir enerji fiyatları gibi mevcut sektör zorluklarına rağmen, özel sektörün hidrojen projelerini geliştirmeye yönelik kararlılığını göstermektedir.

Ayrıca, taahhüt edilmiş yatırımlar da kayda değer biçimde artarak 2020’de 10 milyar ABD doları iken 2024’te 75 milyar ABD dolarına ulaşmıştır (Hydrogen Council, 2024, s. 5).

Küresel hidrojen tüketimi de 2020 yılından itibaren kayda değer artış göstermiş olup 2024 yılında 100 milyon tona yaklaşmıştır (IEA, 2025a, s. 32). 2020 yılında hidrojene yönelik yatırım projelerinin %55’i Avrupa’da iken, son yıllarda bu dengede değişim yaşanmış ve Avrupa’nın küresel proje havuzundaki payı %40’a gerilemiştir. Avrupa’yı ikinci sırada %20 ile Kuzey Amerika, ardından %10’ar payla Çin ve Latin Amerika takip etmektedir. Özellikle Kuzey Amerika, hidrojen yatırımlarında en büyük göreceli artışı göstermektedir (Hydrogen Council, 2024, s. 5).

Hidrojenin üretim maliyetlerinin düşürülmesi, teknolojik gelişimin teşvik edilmesi ve altyapının geliştirilmesi adına çeşitli ülkelerde teşvik ve destek unsurları da uygulamaya konulmaya başlanmıştır (Spasowska, 2023, s. 6). Avrupa Hidrojen Bankası, ABD Enflasyon Azaltma Yasası, karbon fark sözleşmeleri ve H2 Global bu teşvik unsurlarından bazılarıdır (Guillot vd., 2025, s. 1).

Kamu politikaları, kurumsal girişimler ve küresel yatırım eğilimleri birlikte değerlendirildiğinde, hidrojenin önümüzdeki yıllarda enerji piyasalarını daha belirgin şekillendireceği öngörülmektedir. Bu çerçevede, hidrojenin enerji dönüşümündeki rolünün anlaşılması yalnızca küresel iklim hedeflerine ulaşmak açısından değil, aynı zamanda BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Sustainable Development Goals – SDG) ile uyumlu kalkınma vizyonlarının tasarlanması bakımından da önem taşımaktadır. Özellikle SDG-7 Erişilebilir ve Temiz Enerji, SDG-11 Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar, SDG-12 Sorumlu Üretim ve Tüketim ve SDG-13 İklim Eylemi (http-4) kapsamında ifade edilen hedeflere ulaşma açısından hidrojen stratejik bir araç niteliği taşımaktadır.

2.1.1. Hidrojen Enerjisi

Küresel enerji dönüşümü, fosil yakıtlardan sıfır karbon emisyonlu temiz teknolojilere doğru hızla ilerlemekte olup bu süreçte hidrojen, net sıfır hedeflerine ulaşma açısından büyük önem arz etmektedir. Çevresel duyarlılığın artması ve fosil

yakıt rezervlerinin tükenme riski nedeniyle birçok ülke, gelecek dönem enerji politikalarında hidrojene yönelmekte ve buna yönelik stratejiler geliştirmektedir (Ural ve Karaca, 2016, s. 146). Bu gelişmeler, hidrojeni yalnızca bir alternatif yakıt değil, aynı zamanda enerji dönüşümünün stratejik bir bileşeni hâline getirmektedir.

Hidrojen, evrende en bol bulunan element olup renksiz, kokusuz, tatsız ve zehirleyici olmayan bir gazdır. Kimyasal özellikleri bakımından oldukça hafif olan hidrojenin yakılması hâlinde neredeyse sifıra yakın egzoz emisyonu üretilmesi ve yan ürün olarak yalnızca suyun açığa çıkması, onu çevresel açıdan fosil yakıtlara kıyasla son derece avantajlı hâle getirmektedir (Johnston vd., 2005, s. 570). Doğada serbest formda bulunmamakla birlikte, su ve organik bileşikler başta olmak üzere oksijen ve karbonla bir arada yer almaktadır (Sabancı Üniversitesi İstanbul Uluslararası Enerji ve İklim Merkezi [IICEC], 2023, s. 45).

Geleneksel fosil yakıtlara kıyasla hem alt hem de üst ısı değerlerinin yüksek olması nedeniyle ağırlık bazında yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olup benzinin neredeyse 3 katı, doğalgazın ise 2,5 katına ulaşan yüksek enerji içeriği mevcuttur (Kazi vd., 2021, s. 2). Ağırlık açısından sahip olduğu avantaja karşın, hidrojenin hacimsel yoğunluğu oldukça düşük olup benzinin ve doğalgazın yaklaşık olarak dörtte biri kadardır. Bu nedenle hidrojenin taşınması ve depolanması günümüzde fosil yakıtlara kıyasla teknik olarak daha zorlu olup; bu durum hidrojeni sıvılaştırma veya sıkıştırma gerekliliğini ortaya koymaktadır (IEA, 2023a, s. 99).

Ayrıca güvenlik konusu hidrojen açısından önem arz eden bir husustur. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile yanma karakteristikleri, kontrol dışı durumlarda ciddi düzeyde potansiyel riskler oluşturabilmektedir. Hidrojenin yüksek yayılma katsayısı, yüksek ısı değeri ve kolay tutuşabilirliği, kontrolsüz yanma ve patlama risklerini artırabilmektedir (IICEC, 2023, s. 77). Tüm bu nedenlerle, üretimden tüketime kadar değer zincirinin her aşamasında hidrojenin güvenli kullanımına yönelik düzenlemelere ihtiyaç vardır.

Hidrojen birincil bir enerji kaynağı değil, tıpkı elektrik gibi üretilmesi gereken bir enerji taşıyıcısıdır (Rasul vd., 2022, s. 272). Elektroliz, buhar reformasyonu veya piroliz gibi yöntemlerle üretilen hidrojen, üretim sürecinde

kullanılan kaynağa bağılı olarak farklı renk kategorilerinde sınıflandırılmaktadır (ETKB, 2023, s. 4).

Enerji sistemi içinde doğrudan yakıt olarak kullanılabilmesi, enerji taşıyıcısı olarak farklı sektörler arasında enerji aktarımı sağlayabilmesi, metanol ve amonyak gibi çeşitli kimyasallar ile alternatif yakıtların üretiminde hammadde görevi görebilmesi hidrojenin enerji sistemindeki temel işlevleridir (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 11).

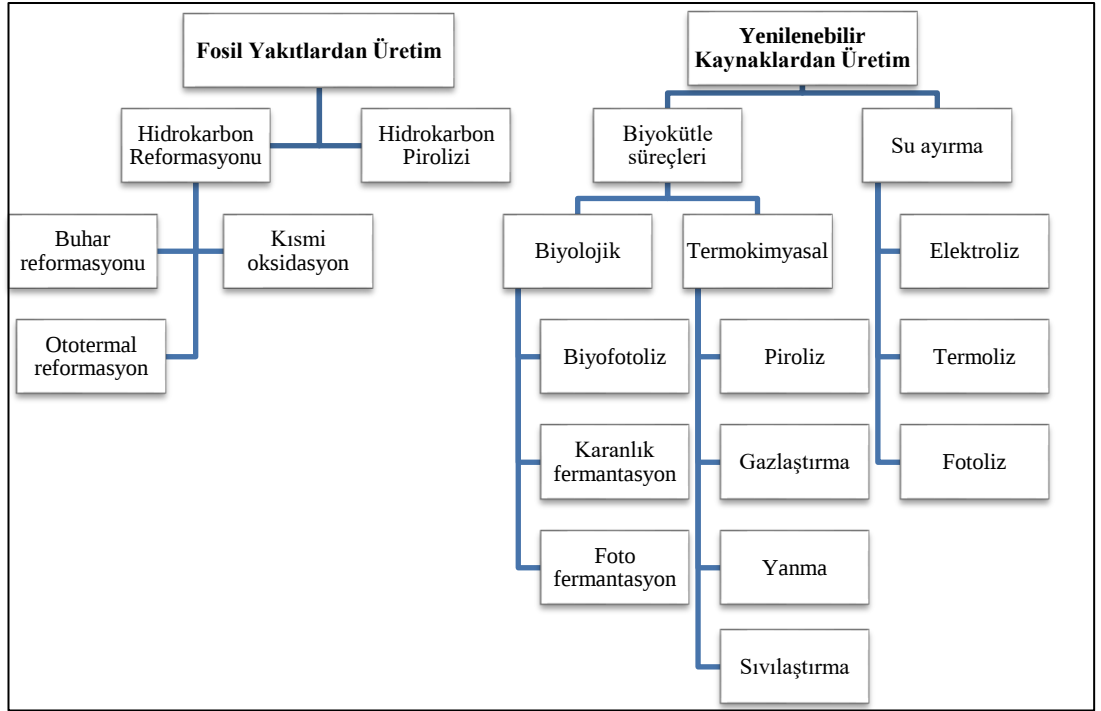
Hidrojenin nihai kullanımında CO₂ emisyonu veya zararlı atık oluşmamaktadır. Bu nedenle, hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılması, küresel ölçekte sera etkisi sorununu ve bölgesel çevresel sorunları ortadan kaldırmaya yönelik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır (Golstov vd., 2006, s. 153).

2.1.2. Hidrojenin Üretilmesi, Depolanması ve Taşınması

Hidrojenin üretimi, depolanması ve taşınması, sürdürülebilir bir hidrojen ekosistemi oluşturmanın temel unsurlarıdır. Bu aşamaların her biri, hidrojenin güvenli, verimli ve ekonomik bir şekilde kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Hidrojen üretimi

Fosil yakıtlardan farklı olarak hidrojen, doğada doğrudan erişilebilir bir kaynak değildir. Hidrojen üretimi için farklı yöntemler bulunmaktadır ve bu yöntemler kullanılan hammaddelere göre geleneksel ve yenilenebilir teknolojiler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategori, fosil yakıtların işlenmesine dayanmakta olup hidrokarbon reformasyonu ile piroliz yöntemlerini içermektedir. İkinci kategori ise hidrojeni yenilenebilir kaynaklardan, yani biyokütle veya sudan üreten yöntemleri kapsamaktadır (Nikolaidis ve Poullikkas, 2017, s. 598). Hidrojen üretim yöntemleri uygulamada genellikle renk sınıflandırması yoluyla da ifade edilmektedir; bu konu ilerleyen bölümlerde ayrıca ele alınacaktır.



Şekil 3. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Kaynak: Nikoliadis ve Poullikkas (2017)'den yararlanılarak yazar tarafından oluşturulmuştur.

Günümüzde küresel ölçekte üretilen hidrojenin yüzde altmışından fazlası, doğalgazın buhar reformasyonu (SMR) yöntemiyle elde edilmekte olup, bu yöntem hidrojen üretiminde açık ara en baskın konumdadır. SMR yönteminin bu denli yaygın olmasının başlıca nedeni, üretim maliyetlerinin alternatif teknolojilere kıyasla daha düşük seviyelerde seyretmesidir. Kömür bazlı hidrojen üretimi ise ikinci sırada yer almakta olup özellikle Çin ve Hindistan gibi ülkelerde önemli bir paya sahiptir. Doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan gerçekleştirilen hidrojen üretimi toplam küresel üretimin %80'ini aşmış durumdadır (IEA, 2025a, s. 80).

Fosil yakıtlara dayalı bu üretim yöntemlerinde ortaya çıkan yüksek CO₂ emisyonları nedeniyle hidrojenin gerçek anlamda temiz bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilebilmesi mümkün olmamaktadır. İklim değişikliğine ilişkin endişelerin artması ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel çabaların güçlenmesi, CO₂ salımı oluşturmeyen alternatif hidrojen üretim yöntemlerine olan ihtiyacı daha da belirgin hâle getirmektedir (Kothari vd., 2008, s. 554).

Elektroliz, suyun doğru akım uygulanarak hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayrıştırılması esasına dayanan bir hidrojen üretim yöntemidir ve literatürde en temel üretim teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu süreçte, su molekülleri

elektrolizör ile elektrokimyasal olarak ayrıştır; hidrojen gazı ve oksijen gazı açığa çıkar (Kahraman ve Akansu, 2007, s. 11). Yaygın olarak kullanılan elektrolizör teknolojileri AEL (alkaline), PEM (proton exchange membrane) ve SOE (solid oxide) tipi elektrolizörlerdir. Her bir elektroliz teknolojisinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Alkali elektroliz daha olgunlaşmış bir teknoloji olup daha düşük sermaye maliyetleri sunarken, PEM elektroliz daha yüksek verimlilik ve esneklik sağlamaktadır. SOE ise yüksek termodinamik verimlilik sunmasına rağmen daha yüksek sıcaklık gereksinimi ve özel uygulama koşulları nedeniyle farklı bir konumda yer almaktadır. Uygulanacak teknolojinin seçimi; sistem ölçeği, enerji kaynağının erişilebilirliği, istenen hidrojen saflığı ve uygulamaya özgü gereksinimler gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Hassan vd., 2024, s. 316).

2020 yılından bu yana karbon yakalama teknolojilerinin kullanıldığı ve yenilenebilir kaynakların kullanıldığı düşük emisyonlu hidrojen üretimi istikrarlı bir şekilde artmasına rağmen küresel hidrojen üretimi içerisindeki payı düşüktür. 2024 yılında düşük emisyonlu hidrojen üretimi yaklaşık 0,8 milyon ton hidrojen seviyesine ulaşmış olup bu miktar küresel arzın %1'inden daha azına karşılık gelmektedir. Elektroliz yoluyla üretilen hidrojen 2024 yılında bir önceki yıla göre %60 artarak 100 bin tonun üzerine çıkmıştır. Ancak bu gelişmelere rağmen, elektroliz hâlâ düşük emisyonlu hidrojen üretiminin yalnızca yaklaşık altıda birini oluşturmaktadır. Bu durum, su ayrıştırma teknolojilerinin ölçeklendirilmesinin hâlen önemli bir zorluk olduğunu ancak aynı zamanda önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir (IEA, 2025a, s. 81).

Küresel ölçekte hidrojen üretiminin büyük ölçüde karbon yakalama uygulanmayan fosil yakıt temelli yöntemlere dayanmasının en temel nedeni bu yöntemlerin belirgin bir maliyet avantajına sahip olmasıdır. 2022 yılında doğalgaz fiyatlarının jeopolitik gelişmeler nedeniyle sert biçimde artması, kısa süreliğine yenilenebilir elektrikle üretilen hidrojenin bazı bölgelerde rekabetçi hâle gelmesini sağlamış olsa da, genel olarak fosil bazlı üretimin ikame edilmesini mümkün kılmamıştır (Ueckerdt vd., 2024, s. 106). Bu durum, düşük emisyonlu hidrojen üretim yollarının yaygınlaşması için maliyetlerin daha da düşürülmesi gerektiğini göstermektedir.

Hidrojenin depolanması

Hacimsel enerji yoğunluğunun düşük olması, hidrojenin sıkıştırma veya sıvılaştırma gibi yöntemlerle daha kompakt hâle getirilerek depolanmasını zorunlu kılmakta ve böylece enerji ihtiyacı anlarında kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Ticari olarak en yaygın depolama yöntemi sıkıştırılmış gaz olarak 350-700 bar basınçlı depolama tanklarında hidrojenin depolanmasıdır (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 37). Sıkıştırılmış ve sıvılaştırılmış depolama yöntemlerine ek olarak, kriyojenik sıkıştırma ile depolama ve sodyum borhidrür (NaBH_4), alüminyum hidrit (AlH_3), amonyak (NH_3) ve boran (BH_3) gibi kimyasal bileşikler kullanılarak hidrojen depolanması da mümkündür. Bununla birlikte, hidrojen depolama süreçleri genel olarak yüksek maliyetli olup hidrojeni daha ucuz ve güvenli biçimde depolayabilmek günümüzde önemli bir zorluk olarak varlığını sürdürmektedir (Koşar, 2021, s. 6).

Hidrojenin geniş ölçekli ve uzun süreli depolanmasına yönelik yöntemlerden biri, yer altındaki jeolojik oluşumlar olan tuz mağaralarında depolamadır. Bu yaklaşım, doğalgaz depolama teknolojileriyle büyük ölçüde benzerlik göstermekte olup yüksek sızdırmazlık özellikleri ve büyük hacim kapasitesi sayesinde hidrojen için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Ancak teknolojik, ekonomik, hukuki ve jeolojik belirsizliklerin devam etmesi nedeniyle bu yöntemin yaygınlaştırılması kapsamlı araştırma ve uzun süreli pilot uygulamalara ihtiyaç duymaktadır (Tarkowski, 2019, s. 93).

Hidrojenin taşınması

Hidrojen değer zinciri kapsamında, depolamanın yanı sıra hidrojenin taşınması da stratejik öneme sahip bir diğer unsurdur. Hidrojen genellikle sıkıştırılmış gaz olarak, sıvılaştırılmış olarak ya da katı bileşiklere döndürülmüş haliyle taşınmaktadır. Hidrojenin taşınması genel olarak karayolu üzerinden kamyon ve treylerlerle, boru hatları aracılığıyla ve denizyolu taşımacılığıyla büyük ölçekli gemiler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Xie vd., 2024 , s. 15).

Boru hattı taşımacılığı, uzun mesafeli ve büyük ölçekli hidrojen transferi için ideal bir yöntem olup, gaz formda veya sıvı hidrojen taşınmasına imkân tanımaktadır. Bu yöntem, verimlilik ve maliyet açısından önemli avantajlara sahiptir.

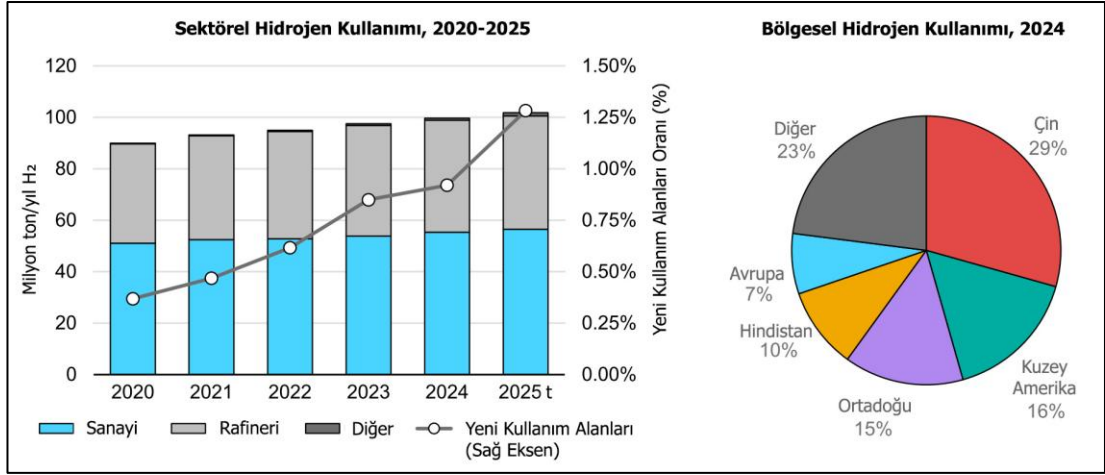
Ancak saf hidrojen taşıyacak bir boru hattının inşaat maliyetleri oldukça yüksek olduğundan, mevcut aşamada en uygun çözüm doğalgaz ile hidrojen karışımının boru hatları üzerinden taşınması olarak görünmektedir (Zhang vd., 2023, s. 19219). Bu noktada da doğalgaz hattına %25'e kadar olan oranlarda hidrojen karışımlarının uygulanabilir olduğu kabul edilmektedir (Franco ve Rocca, 2024, s. 519).

Karayolu taşımacılığı daha küçük miktarlarda, esnek ve kısa mesafeli sevkiyatlarda tercih edilmektedir. Denizyolu taşımacılığı ise büyük ölçekli ve kıtalar arası hidrojen taşımacılığı için etkili bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Xie vd., 2024 , s. 25).

2.1.3. Hidrojenin Kullanım Alanları

Son yıllarda hidrojenin kullanım alanları hızla çeşitlenmiş olup sektörler ve bölgeler arasında giderek artan bir yayılım göstermektedir. Şekil 4, küresel hidrojen talebinin sektörel gelişimini ve 2024 yılı itibarıyla bölgelere göre dağılımını ortaya koymaktadır. 2020–2025 dönemine ait sektörel kullanım verileri incelendiğinde, hidrojen tüketiminin ağırlıklı olarak sanayi ve rafineri sektörlerinde yoğunlaştığı ve bu iki sektörün toplam talebin neredeyse tamamını karşıladığı görülmektedir. Diğer uygulama alanlarını içeren yeni kullanım kategorisinin payı, küresel talebin %1'ine bile denk gelmemektedir ancak 2020'den 2025'e doğru istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Bu artış, hidrojenin ulaşım, elektrik üretimi, hidrojen bazlı yakıtların üretimi, binalar ve biyoyakıtların iyileştirilmesi gibi sektörlerde giderek yaygınlaştığına işaret etmektedir (IEA, 2025a, s. 32).

Bu görünüm, hidrojenin geleneksel endüstriyel uygulamalardaki önemini korumasının yanı sıra aynı zamanda enerji dönüşümünün hızlanmasıyla birlikte yeni kullanım alanlarında giderek daha stratejik bir rol üstlendiğini göstermektedir.



*2025 t, 2025 yılına ait tahmin değerlerini ifade etmektedir.

Şekil 4. Sektörlere ve Bölgelere Göre Hidrojen Talebi

Kaynak: IEA, 2025a.

Bölgesel dağılım açısından bakıldığında ise 2024 yılında küresel hidrojen tüketiminin dörtte birinden fazlası (yaklaşık 29 milyon ton) Çin tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu miktar, yaklaşık 16 milyon tonluk talep ile ikinci sırada yer alan Kuzey Amerika'nın neredeyse iki katına karşılık gelmektedir. Çin ve Kuzey Amerika'nın talebi bir önceki yıla göre %2 ve %0,5 oranında sınırlı bir artış gösterirken, Avrupa'da talep 2023 yılına kıyasla aynı seviyede kalmıştır. Orta Doğu ve Hindistan'da ise talep artışı daha belirgin olarak gerçekleşmiştir. Orta Doğu'da yaklaşık %6, Hindistan'da ise %4'ün üzerinde gerçekleşen bu artış, büyük ölçüde rafineri ve kimya sektörlerinde hidrojen kullanımının artmasına; Hindistan özelinde ise çelik üretiminde hidrojen talebinin yükselmesine bağlanmaktadır (IEA, 2025a, s. 33).

2.1.3.1. Enerji Üretimi

Hidrojen, enerji üretimi alanında çok yönlü bir kullanım potansiyeline sahiptir. Doğrudan yakıt olarak kullanılabilmesinin yanı sıra yakıt hücreleri aracılığıyla elektrik üretiminde de değerlendirilebilmektedir.

Yakıt hücresi, kimyasal gazlar ile oksitleyicilerin reaktan olarak kullanılmasıyla elektrik üretebilen elektrokimyasal bir cihazdır. Hidrojen en verimli enerji taşıyıcılarından biri olarak yakıt hücrelerinde kullanılmakta ve kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üretilebilmesini mümkün kılmaktadır (Manoharan vd.,

2019, s. 2). Yakıt hücrelerinin ulaşım sektöründe kullanımı yaygın olup ayrıca uzak bölgelerde veya off-grid uygulamalarda, hidrojen yakıt hücrelerinin temiz ve güvenilir bir enerji üretimi sağlayabilir olması da ön plana çıkan avantajlarından. Şebekeye olan bağımlılığın azaltılması, doğal afetler gibi acil durumlarda şebeke için yedek güç sağlayarak enerji arzının güvenliğini artırması sebebiyle yakıt hücreleri önem arz etmektedir (Ghenai ve Bettayab, 2017, s. 2).

Hidrojenin enerji üretimindeki diğer bir rolü Power-to-Power (P2P) döngüsünde yer alabilmesidir. Bu yöntemde elektroliz yoluyla üretilen hidrojenin yakıt hücresi ya da türbin aracılığıyla yeniden elektriğe dönüştürülmesi söz konusudur. Bu yöntem, yüksek arz–düşük talep dönemlerinde elektriğin depolanmasına ve düşük arz–yüksek talep dönemlerinde depolanan enerjinin tekrar kullanılmasına imkân tanımaktadır (Widera, 2020, s. 2).

Elektrik üretimi süreçlerinde kullanılan gaz türbini sistemlerinde hidrojenin yakıt olarak kullanılmasını ifade eden hidrojen gaz türbinleri de temiz ve daha sürdürülebilir bir enerji yapısına katkı sağlama potansiyeline sahip bir teknoloji olarak görülmektedir. Hidrojenle çalışan gaz türbinlerinin gelecekte daha rekabetçi hâle gelmesi ve doğalgaz türbinleriyle öngörülenden daha erken bir dönemde rekabet edebilmesi mümkün görülmektedir (Zhou vd., 2024, s. 580).

2.1.3.2. Ulaşım

Hidrojenle ilgili yürütülen araştırmaların büyük bir bölümü otomotiv endüstrisine yönelmiş olup hidrojenin sıfır emisyonlu ulaşım araçlarına geçiş noktasında ideal bir yakıt olduğu kabul edilmektedir. Hidrojen, içten yanmalı motorlarda bir yakıt olarak veya yakıt hücrelerinde elektrik motorlarını çalıştırmak için kullanılma potansiyeline sahiptir (Habib vd., 2024, s. 195).

Hidrojeni yakıt hücresinde elektrik üretmek ve motora güç sağlamak için kullanan yakıt hücreli araçlar, hidrojenin gerçek anlamda üstünlüğünün sağlandığı teknolojilerdir. Bu sebeple otomobil üreticileri hidrojen yakıt hücreli araçlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Ulaştırma sektöründe Toyota Mirai, Honda Clarity ve Hyundai NEXO gibi hidrojen yakıt hücreli araçlar geliştirilmiştir (Xie vd., 2024 , s. 25). Bu durum hidrojen dolum istasyonları altyapısının gelişimini de beraberinde getirmiştir.

2024 yılı sonunda dünya genelinde hidrojen dolum istasyonu sayısı yaklaşık 1.300'e ulaşarak bir önceki yıla göre %15 artış göstermiştir (IEA, 2025a, s. 58).

Hidrojen içten yanmalı motorlarda da yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojenin benzinden daha verimli yanması ve yanma sonrasında su ile az miktarda azot oksit oluşması çevresel sürdürülebilirlik açısından hidrojenin önemini gözler önüne sermektedir (Tutar ve Eren, 2011, s. 9). Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımının yaygınlaşmasının önündeki temel engeller geri tutuşma, erken ateşleme ve depolama problemleridir. Bu sorunların çözümüne yönelik teknolojik gelişmeler hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımını artıracaktır (Kahraman ve Akansu, 2007, s. 15). Kamyonlar, otobüsler ve gemiler gibi ulaşım araçlarının elektrifikasyonu zor olduğu için yüksek enerji yoğunluğuna ve düşük emisyonu sahip olan hidrojen, umut vadeden bir yakıt alternatifi olarak görülmektedir (Xie vd., 2024, s. 25).

Küresel ticaretin temel unsurlarından biri olan deniz taşımacılığında fosil yakıt kullanımı önemli çevresel etkiler yaratmakta ve bu nedenle yenilenebilir yakıtlara geçiş emisyonların azaltılmasına yönelik çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Hidrojenin sıvı türevlerinden olan metanolün deniz taşımacılığından kaynaklanan emisyonların azaltılmasında teknik olarak uygulanabilir bir seçenek olduğu kabul edilmektedir (Svanberg vd., 2018, s. 182). Hâlâ başlangıç aşamalarında olmasına rağmen, uçaklarda hidrojenin yakıt hücrelerinde veya sentetik yakıtlarda kullanılmasının potansiyeli de araştırılmaktadır. Bu durum, elektrikli alternatife dönüşü zor olan havacılık sektöründe de karbon salınımını azaltma potansiyeline işaret etmektedir (Rasul vd., 2022, s. 27).

2.1.3.3. Sanayi

Hidrojen günümüzde pek çok sanayi dalında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sanayide küresel hidrojen talebi 2024 yılında 55 milyon tona ulaşarak bir önceki yıla göre %3 artış göstermiştir. Başta gübre üretiminin temel girdisi olan amonyak üretimi olmak üzere, metanol üretimi ve demir-çelik sektörü hidrojenin yoğun olarak tüketildiği sektörlerdir. Sanayide hidrojen talebinin yaklaşık %60'ı amonyak üretimi, %30'u metanol üretimi ve %10'u demir-çelik sektöründe gerçekleşmiştir (IEA, 2025a, s. 48).

Hidrojen; demir-elik ve alüminyum gibi metallerin cevher indirgeme süreçlerinde indirgeme ajanı olarak, cam üretiminde, hidroklorik asit üretiminde ve gıda sanayisinde yağların ve katı yağların hidrojenasyonu gibi işlemlerde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra soğutma uygulamaları, hidrojen peroksit üretimi ve gaz kromatografisi gibi analitik kimya yöntemleri ile uzay ve havacılık sektörleri ve yarı iletken üretimi de hidrojen kullanımının yaygın olduğu diğer alanlardır (Rasul vd., 2022, s. 28). Rafineri sektöründe de yoğun şekilde tüketilen olan hidrojen; daha hafif, yüksek hidrojen içeriğine sahip yakıtların elde edilmesini ve kükürt ile azot gibi istenmeyen bileşenlerin uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Ramachandran ve Menon, 1998, s. 593).

Bu kullanım alanlarına ek olarak hidrojen, yaklaşık 600  C ve üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirilen endüstriyel süreçlerde yüksek verim sağlayan güçlü bir yakıt niteliği taşımaktadır (Province of Zuid Holland, 2020, s. 18).

Sanayide kullanılan hidrojenin büyük bölümü, aynı tesis içinde ve karbon yakalama uygulanmadan fosil yakıtlardan üretilmektedir. Karbon yakalama bazı sanayi kollarında hlihazırda yaygın bir uygulama olsa da, yakalanan yıllık yaklaşık 150 milyon ton karbonun büyük kısmı üre üretimi gibi diğer endüstriyel süreçlerde kullanıldığından nihai olarak atmosfere salınmaktadır. Bu nedenle, sanayide hidrojen üretimi 2024 yılında yaklaşık 705 milyon ton doğrudan CO₂ emisyonundan sorumlu olmuştur. Bu değer 2023'e kıyasla %3 artışa karşılık gelmekte olup Meksika'nın toplam sera gazı emisyonlarına neredeyse eşittir (IEA, 2025a, s. 48).

Sanayide hlihazırda karbon yoğun hidrojen kullanılması sebebiyle düşük karbonlu hidrojene geçişin, sera gazı emisyonlarını azaltmak açısından fırsat sunma potansiyeli yüksektir.

2.1.3.4. Konutlar ve Isıtma

Evsel ve endüstriyel ısıtma uygulamaları, hidrojenin bir diğer kullanım alanıdır. Ancak konut ve ticari binalarda enerji talebinin karşılanmasında hidrojenin katkısı hâlen yok denecek kadar azdır. Bu alanda elektrifikasyon, bölgesel ısıtma sistemleri ve dağıtık yenilenebilir enerji czmleri, hidrojen kullanan teknolojilerin çok daha ilerisinde bulunmaktadır (IEA, 2025a, s. 72).

Doğalgazla çalışan ocak, şofben ve ısıtma sistemlerinin karbonsuzlaştırılması hedefi, düşük karbonlu hidrojene yönelik talebi artırma potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda mevcut gaz dağıtım altyapısının hidrojen enjeksiyonu için kullanılabilir olması önemli bir avantajdır. Doğalgaz şebekelerine belirli oranlarda hidrojen karıştırılarak emisyonların azaltılması ve enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesine yönelik pek çok ülkede pilot projeler ve araştırmalar gerçekleştirilmektedir. Türkiye’de de Konya, Karatay’da Gazbir ve Gazmer tarafından hidrojen ve doğalgazın karıştırılıp evsel cihazlara beslenmesi ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 58).

Gaz hatlarına hacimsel olarak yaklaşık %20-%25’e kadar hidrojen enjeksiyonu, altyapıda ya da son kullanıcı cihazlarında ek bir değişiklik gerektirmediği için avantaj olarak değerlendirilmektedir (Wallat vd., 2024, s. 8). Bina ve ısıtma uygulamalarında ayrıca hidrojen yakıt hücreleriyle çalışan kojenerasyon sistemleri, elektrik ve ısı üretmek için kullanılmaktadır (Xie vd., 2024, s. 25).

2.1.3.5. Enerji Depolama

Hidrojenin talep yoğunluğu dönemlerinde elektrik üretmek için depolanabilir ve kullanılabilir olması, enerji sektörü açısından önem arz etmektedir. Hidrojenin depolanması konusundaki en önemli fırsatlardan biri, kesikli üretim yapıları nedeniyle tam olarak değerlendirilemeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanmasına imkân tanınmasıdır.

Rüzgâr ve güneş enerjisi çoğunlukla elektrik şebekesine entegre edilmekte olup, üretim ile talebin eş zamanlı gerçekleşmediği durumlarda önemli miktarda enerji atıl kalabilmektedir. Hidrojen depolama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, şebekeye entegre edilemeyen fazla yenilenebilir enerji elektroliz yoluyla hidrojene dönüştürülebilmekte ve böylece daha sonra kullanılmak üzere yüksek yoğunluklu bir enerji taşıyıcısına aktarılmaktadır (Xie vd., 2024, s. 2).

Bu döngü Power-to-X (P2X) olarak adlandırılmaktadır. P2X, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin hidrojen ve türev kimyasallara dönüştürülerek farklı sektörlerde yakıt, hammadde veya depolama aracı olarak kullanılmasını sağlayan bütünsel teknolojiler bütünü olarak tanımlanmaktadır

(Sorrenti vd., 2022, s. 1). Bu kapsamda hidrojen, sentetik metan, amonyak, metanol ve oksijenli yakıtlar gibi ürünlere dönüştürülebilmekte; söz konusu enerji taşıyıcıları depolama ve taşımada kullanılabilir. Bu durum, ölçek ve coğrafi sınırları olan depolama teknolojilerine kıyasla P2X'in daha geniş ölçekli ve uzun mesafeli enerji depolanmasına imkân sağlaması nedeniyle ön plana çıkmasına yol açmaktadır (Daiyan vd., 2020, s. 3843).

Hidrojen enerji depolayabilmesi özelliği ile hem yenilenebilir enerjinin etkin kullanımını artırmakta hem de enerji arz güvenliğine önemli katkılar sunmaktadır. Bu nedenle hidrojen, özellikle yüksek yenilenebilir enerji kurulu gücüne sahip ülkelerde şebeke dengeleme ve enerji depolama için kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

2.1.4. Hidrojen Ekonomisi ve Enerji Dönüşümündeki Önemi

Hidrojen ekonomisi, enerji taşıyıcılarından birinin hidrojen (diğeri elektrik olmak üzere) olduğu endüstriyel sistemi ifade etmektedir. Bu sistemde hidrojen oksitlenerek suya dönüştürülmekte ve bu su, harici bir enerji kaynağı kullanılarak yeniden hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayrıştırılmak suretiyle tekrar kullanılmaktadır (Penner, 2006, s. 33). Hidrojen ekonomisi, hidrojenin üretilmesinden depolanmasına, taşınmasından nihai kullanıcıya ulaştırılmasına kadar tüm değer zinciri süreçlerini kapsamaktadır (Ural ve Karaca, 2016, s. 147).

Hidrojen ekonomisi, hidrojen ekosisteminin bütüncül bir yaklaşımla geliştirilmesi anlamına da gelmektedir. Ekosistemin sürdürülebilir şekilde büyümesi için güçlü bir kaynak ve altyapı planlaması, etkili teşvik ve sübvansiyon mekanizmaları ile ölçek ekonomilerinin sağlanması, insan kaynağının güçlendirilmesi, standartların geliştirilmesi ve güvenliğe ilişkin teknik gerekliliklerin karşılanması temel unsurlar arasında yer almaktadır. Ayrıca sektörel çeşitliliğin dikkate alındığı bir planlama yaklaşımı ve kamu–özel sektör arasında güçlü bir iş birliği, hidrojen ekonomisinin yaygınlaşmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bu unsurların eşgüdümlü şekilde hayata geçirilmesi, hidrojen değer zincirinin güçlendirilmesine ve ekonomik, çevresel ve teknolojik faydaların en üst düzeye çıkarılmasına olanak sağlayacaktır (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 15).

Özetle, hidrojen ekonomisi sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmada çok boyutlu bir yaklaşımı temsil etmektedir.

Hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi adına “hidrojen vadisi” kavramı da tüm dünyada yaygınlaşmaya başlamıştır. Hidrojen vadisi, hidrojen üretiminden, dağıtımından ve kullanımından oluşan hidrojen değer zincirinin çeşitli parçalarının yoğunlaştığı, yerel bir ekosistemin oluşturduğu coğrafi bir alandır (Concas vd., 2022, s. 1). Hidrojen vadilerinde, tüm hidrojen değer zinciri yer almakta, sektör entegrasyonunu ve verimliliği maksimuma çıkarılmaktadır. Günümüzde 38 farklı ülkede 99 tane hidrojen vadisi yer almaktadır (http-5). Hidrojen vadileri gibi bölgesel modellerin yaygınlaşması, ölçek ekonomisinin oluşturulmasını sağlarken teknolojik öğrenme süreçlerinin hızlanmasına da katkıda bulunacaktır.

2.2. Hidrojenin Renkleri

Fosil yakıtlar ya da yenilenebilir kaynaklar kullanılarak üretilen hidrojen, üretiminde kullanılan enerji kaynağına göre renk kodları ile tanımlanmakta ve sınıflandırılmaktadır. Bu kapsamda oluşturulan renk terminolojisine ve daha özelinde yeşil hidrojene ilişkin ayrıntılı açıklamalara alt başlıklarda yer verilmektedir.

2.2.1. Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Türleri

Hidrojen; su, biyokütle, doğalgaz, kömür ve petrol gibi hammaddeler ile atık su ve plastikler gibi atıklar kullanılarak enerji girdisiyle üretilen bir enerji taşıyıcısıdır (US Department of Energy, 2020, s. 24). Hidrojen doğalgaz kullanılarak üretilirse gri hidrojen, yenilenebilir enerji kullanılarak elektroliz ile üretiliyorsa yeşil hidrojen, nükleer enerji kullanılarak elektroliz ile üretiliyorsa pembe hidrojen, fosil yakıtlar kullanılarak piroliz yoluyla elde edilirse turkuaz hidrojen, doğalgazdan üretilirken karbon yakalama, kullanım ve depolama (CCUS) teknolojisi kullanılırsa mavi hidrojen, kömür kullanılarak üretilirse kahverengi hidrojen olarak adlandırılmaktadır (ETKB, 2023, s. 4). Beyaz hidrojen ise yer altında kendiliğinden bulunan doğal hidrojeni ifade etmektedir (Incer-Valverde vd., 2023, s. 2).

Teknoloji	Birincil Enerji/Elektrik Kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO ₂ /kgH ₂)	Maliyeti (ABD doları/kgH ₂)
 Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
 Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
 Piroлиз	Fosil yakıt	<3	1,25-2,20
 Buhar metan reformlama (karbon yakalama ile)	Doğal gaz, kömür	<4	1,5-3,00
 Buhar metan reformlama (karbon yakalamadan)	Doğal gaz	8-10	0,5-1,70
 Gazlaştırma	Kömür	>20	1,0-2,2

Şekil 5. Kaynaklarına Göre Hidrojen Üretim Yöntemleri

Kaynak: ETKB, 2023.

Hidrojen üretiminde kullanılan teknolojinin değişmesi sürecin karbon ayak izini ve üretim maliyetlerini de değiştirmektedir. Şekil 5, farklı renklerdeki hidrojenleri söz konusu açılardan karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından suyun elektrolizi ile üretilen yeşil hidrojen en düşük karbon ayak izine sahip olup buna karşılık üretim maliyeti diğer hidrojen türlerine göre daha yüksektir. Düşük karbon ayak izi bakımından yeşil hidrojeni pembe hidrojen, turkuaz hidrojen ve mavi hidrojen takip etmektedir.

Bölüm 2.1.2’de daha önce bahsedildiği üzere, küresel ölçekte en yaygın olan hidrojen üretimi doğalgazdan gri hidrojen üretimidir. Fosil yakıt temelli gri hidrojen ve kahverengi hidrojenin düşük maliyet avantajlarına sahip olmaları sebebiyle üretimleri yaygındır. Ancak bu maliyet avantajına karşın neden oldukları emisyonlar fazladır ve en yüksek karbon ayak izine sahip yöntemlerdir. Bu bulgular emisyonları

düşük hidrojen türlerinin yaygınlaşması için maliyetlerin düşürülmesine yönelik politikalara duyulan ihtiyacın bir göstergesi niteliğindedir.

Hidrojenin renk terminolojisine dayalı kullanımının yanında düşük karbonlu hidrojen, temiz hidrojen, sürdürülebilir hidrojen ve yenilenebilir hidrojen gibi geniş bir kavram çeşitliliği de mevcuttur. Örneğin, IEA raporlarında düşük karbonlu hidrojen; yenilenebilir ve nükleer elektrikten, biyokütleden ve CCUS teknolojileriyle birlikte fosil yakıtlardan üretilen hidrojen türlerini kapsayacak şekilde, herhangi bir renk kodlaması kullanılmadan ele alınmaktadır (IEA, 2023a, s. 45). AB tarafından elektroliz yoluyla ve yenilenebilir kaynaklar kullanılarak üretilen hidrojen, yeşil hidrojen ya da yenilenebilir hidrojen olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca temiz hidrojen de yenilenebilir hidrojen ile aynı anlama gelmektedir. Düşük karbonlu hidrojen ise karbon yakalama ile üretilen mavi hidrojeni ve yeşil hidrojeni kapsamaktadır (EU, 2020, s. 4). Son dönemde yayımlanan hidrojen raporlarına göz atıldığında, temiz hidrojen bağlamında en çok benimsenen kavramın yeşil hidrojen olduğu görülmektedir (Kusoglu, 2022, s. 47).

2.2.2. Yeşil Hidrojen

Yeşil hidrojen, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla, elektroliz edilen suyun oksijen ve hidrojene ayrıştırılması sonucunda elde edilen saf hidrojendir (Oliveira vd., 2021, s. 1). Bu işlem sırasında fosil yakıtlara ihtiyaç duyulmamakta olup geleneksel yöntemlerle üretilen hidrojene kıyasla sera gazı emisyonu üretilmemektedir. ABD Enerji Bakanlığı yeşil hidrojen yaşam döngüsünde karbon yoğunluğunu 0,45 kgCO₂e/kgH₂'nin altında olarak tanımlamıştır (Boettcher, 2024, s. 13095). Yaygın olarak rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir elektrik kaynakları kullanılarak elektroliz yoluyla üretilmekle birlikte, sürdürülebilirlik kriterlerini sağlaması koşuluyla, biyogazın reformasyonu veya biyokütlenin biyokimyasal dönüşümü gibi yenilenebilir kökenli hammaddelere dayalı yöntemlerle üretilen hidrojen de yeşil hidrojen olarak tanımlanabilmektedir (EU, 2020, s. 4).

Yenilenebilir enerjiye dayalı yeşil hidrojen üretimi için üç temel üretim modeli bulunmaktadır. Bunlar tamamen yerinde (on-site) üretim, elektrik şebekesi

üzerinden üretim ve hibrit modeldir. Yerinde üretim modelinde, elektrolizörler doğrudan aynı sahada kurulu olan rüzgâr türbinleri, güneş panelleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenmektedir. Bu yöntem, üretimin tamamen yeşil olmasını garanti etmekle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği dalgalı ve kesintili üretim yapması nedeniyle hidrojen üretiminde zaman zaman istikrarsızlığa yol açabilmektedir. Buna karşılık, elektrolizörlerin elektrik şebekesine bağlanması, rüzgâr ve güneş enerjisi arzındaki belirsizliklerin etkilerini azaltmakta ve üretimin daha dengeli bir şekilde sürdürülmesine olanak tanımaktadır. Şebekeden elektrik temini, özellikle yenilenebilir enerji üretiminin düşük olduğu dönemlerde kesintisiz hidrojen üretimini destekleyerek istikrar sağlamaktadır. Hibrit model ise her iki yaklaşımın avantajlarını birleştirerek yenilenebilir kaynak kullanımını ve şebeke esnekliğini aynı sistemde bütünleştirmektedir (Sadik-Zada, 2021, s. 4).

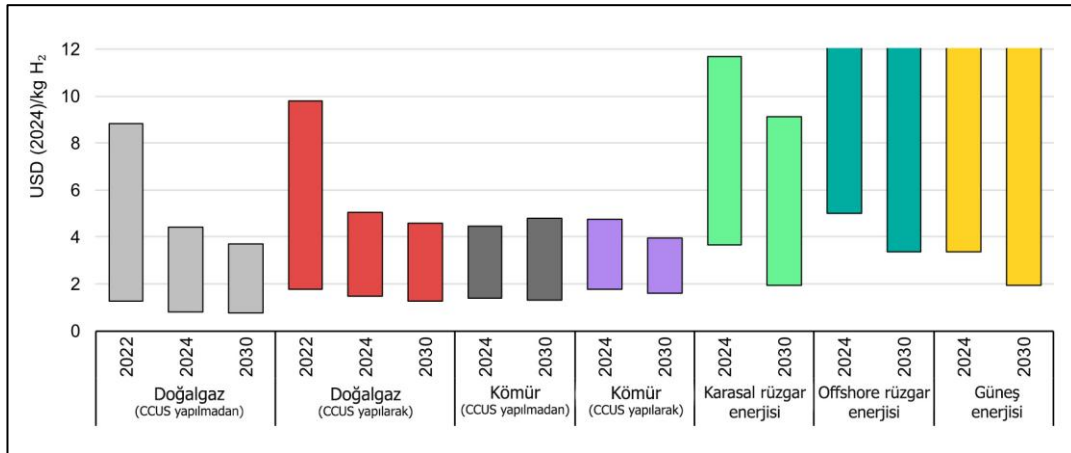
Genel olarak “yeşil” terimi, yalnızca hidrojen için değil, aynı zamanda yeşil hidrojen kullanılarak üretilen yeşil amonyak, yeşil metanol, yeşil çelik ve yeşil çimento gibi emtia ve ürünler için de benimsenmektedir (Kusoglu, 2022, s. 47).

Net sıfır emisyon hedeflerine ulaşma sürecinde yeşil hidrojen, özellikle karbonsuzlaştırılması ya da elektrifikasyonu güç olan sektörler açısından uygulanabilir ve etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Uzun vadeli küresel enerji dönüşümü hedefleri doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, farklı hidrojen türleri arasında uluslararası ticaret potansiyeli en yüksek olan formun yeşil hidrojen ve yeşil hidrojen türevleri olacağını ortaya koymaktadır (SHURA, 2021, s. 14).

2.2.3. Yeşil Hidrojene Geçişin Engelleri ve Politika Gereksinimleri

Yeşil hidrojen, sera gazı emisyonlarını azaltma, enerji arz güvenliğini güçlendirme ve uzun mesafeli enerji depolama ile taşımaya imkân sağlama potansiyeli sayesinde geleneksel fosil yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu avantajlarına rağmen yaygın şekilde benimsenmesinin önünde çeşitli engeller bulunmaktadır. Bu engellerin başında, yenilenebilir enerji kaynakları ve elektroliz ekipmanlarına bağlı maliyetlerden kaynaklanan yüksek üretim maliyeti gelmektedir (Hassan vd., 2024, s. 312).

Şekil 6, farklı hidrojen üretim yöntemlerine göre 2024 yılına ait hidrojen maliyetlerini ve 2030 yılına ilişkin öngörülerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. 2024 itibarıyla en düşük maliyetli hidrojen üretim yolu, CCUS olmaksızın doğalgazdan üretim (gri hidrojen) olup, birim maliyetler yaklaşık 1–4 \$/kg H₂ aralığında gerçekleşmektedir. Doğalgaz + CCUS ile üretilen hidrojenin (mavi hidrojen) maliyeti ise ek karbon yakalama yatırımları nedeniyle gri hidrojene kıyasla daha yüksektir. Kömür bazlı üretim yolları da benzer şekilde görece düşük maliyet seviyelerinde yer almakta ve CCUS uygulandığında maliyetler daha da artmaktadır. Yenilenebilir kaynaklara dayalı yeşil hidrojen tarafında ise rüzgâr (karasal ve off-shore) ve güneş enerjisine dayalı elektroliz yoluyla üretimin maliyetleri, 2024 yılında fosil yakıt temelli yöntemlere kıyasla belirgin biçimde daha yüksektir. Yeşil hidrojen tüketiminin ve talebinin artırılması için gri hidrojen ve yeşil hidrojen arasında var olan fiyat farkının azaltılması gerekmektedir.



Şekil 6. Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Maliyeti

Kaynak: IEA, 2025a.

2030 yılı için yapılan öngörülerde ise maliyetlerin düştüğü, özellikle yenilenebilir kaynaklara dayalı yeşil hidrojen üretiminde önemli bir maliyet gerilemesi yaşanacağı dikkat çekmektedir. Karasal rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisine dayalı elektroliz maliyetlerinin 2030 itibarıyla yaklaşık 2 \$/kg H₂ seviyesine kadar gerilemesi beklenirken, bu durum yeşil hidrojenin fosil yakıt bazlı hidrojen türleriyle maliyet açısından rekabet edebilirliğini artırmaktadır. Buna karşılık off-shore rüzgâr enerjisine dayalı üretim maliyetlerinin daha yüksek seviyelerde kalmaya devam ettiği

görülmektedir. Genel olarak grafik, 2030 sonrasında yeşil hidrojenin ekonomik fizibilitesinin önemli ölçüde güçleneceğine işaret etmektedir.

Yeşil hidrojenin yaygınlaşmasının önündeki diğer temel engeller; özel altyapı eksikliği, yüksek enerji kayıpları, piyasa değerinin yeterince tanınmaması ve sürdürülebilirliğin güvence altına alınması gerekliliğidir. Günümüzde hidrojen, çoğunlukla üretildiği yerde tüketilmekte; hidrojene özgü iletim hatları ve dolum istasyonları son derece sınırlı kalmaktadır. Ayrıca elektroliz, dönüştürme, depolama, taşıma ve nihai kullanım aşamalarında ortaya çıkan toplam enerji kayıpları, yeşil hidrojenin sistem verimliliğini düşürmekte ve daha yüksek miktarda yenilenebilir enerji ihtiyacı doğurmaktadır. Bunun yanı sıra, yeşil hidrojen henüz piyasa mekanizmalarına tam olarak yansıtılamamakta; yeşil ürünlere yönelik net hedef ve teşviklerin yetersizliği talep oluşumunu sınırlamaktadır. Öte yandan, elektrolizde kullanılan elektriğin mutlaka yenilenebilir kaynaklardan temin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yeşil hidrojenin çevresel üstünlüğünün korunabilmesi için standartların, izleme mekanizmalarının ve uygun politika araçlarının geliştirilmesi gerekmektedir (IRENA, 2020, s. 13).

Yeşil hidrojenin geleceği, altyapı gelişimi, maliyet düşüşü ve regülasyonların geliştirilmesi gibi etmenlere bağlıdır. Yenilenebilir enerji kapasitesinin artması ve elektroliz teknolojisinin iyileştirilmesiyle birlikte, yeşil hidrojen üretimi maliyetleri düşecek ve daha rekabetçi hale gelecektir. Ayrıca, hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların teşvikleri ve politika önlemleri, yeşil hidrojen ekonomisinin büyümesini destekleyecek ve pazarı genişletecektir (Scita vd., 2020, s. 10).

Genel olarak yeşil hidrojen, enerji sisteminin karbonsuzlaştırılması ve emisyonların net sıfır hedeflerine ulaşılması için umut verici bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Mevcuttaki zorluklara rağmen bu alandaki önemli araştırma ve geliştirme çalışmaları, yeşil hidrojenin rekabetçi bir temiz enerji alternatifi olma yolunda ilerlemesini sağlamak için sürdürülmelidir.

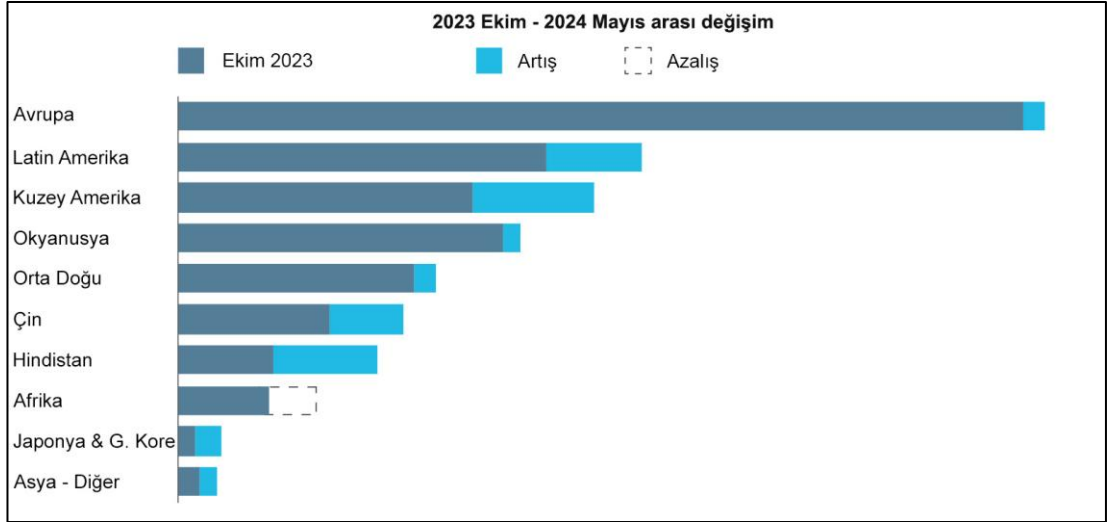
2.3. Yeşil Hidrojene Küresel ve Bölgesel Bakış

Yeşil hidrojenin küresel ölçekte hızla artan önemi, ülkelerin enerji dönüşüm stratejilerinde giderek daha merkezi bir konuma yerleşmesine neden olmuştur. Bu doğrultuda birçok ülke, yeşil hidrojeni uzun vadeli enerji ve iklim politikalarının temel bileşenlerinden biri hâline getirmektedir. Bu kapsamda dünya genelinde, Avrupa Birliği'nde ve Türkiye özelinde yeşil hidrojenin mevcut durumu ve gelişim eğilimlerini ayrıntılı bir şekilde ele almak, enerji dönüşümünün geleceğini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

2.3.1. Dünya Genelinde Yeşil Hidrojen

Hidrojen, bir enerji taşıyıcısı olarak uzun yıllardır bilimsel ve politik tartışmaların konusu olmakla birlikte, 1970'li yıllardan bugüne bu alana yönelik ilgi zaman içerisinde dalgalı bir seyir izlemiştir. Küresel ölçekte çevresel sorunlar, enerji arz güvenliği endişeleri ve fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, hidrojenin dönemselsel olarak yeniden gündeme gelmesine yol açmış; ancak bu ilgi çoğu zaman kalıcı ve sistematik bir dönüşüme evirilememiştir. 2000'li ve 2010'lu yıllar, yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel ölçekte hızlı bir büyüme gösterdiği bir dönem olup özellikle 2010'lu yılların ikinci yarısından itibaren rüzgâr ve güneş enerjisi maliyetlerinde yaşanan hızlı düşüş, yeşil hidrojenin enerji sistemine entegrasyonuna yönelik tartışmaları hızlandırmıştır (Yap ve McLellan, 2023, s. 9). Bu çerçevede, 2020 yılı öncesi dönem yeşil hidrojen açısından bir hazırlık ve kavramsal olgunlaşma süreci olarak değerlendirilmektedir.

Küresel ölçekte temiz hidrojen yatırımlarının 2020 sonrasında hızla ivmelendiği görülmektedir. 2020 yılından 2024 yılına temiz hidrojene yönelik yatırım projeleri yaklaşık 7 kat artmıştır. Mayıs 2024 itibarıyla dünya genelinde toplam 1.572 adet temiz hidrojen projesi ilan edilmiş olup, bu projeler için 2030 yılına kadar yaklaşık 680 milyar ABD doları tutarında yatırım öngörülmektedir. Söz konusu projelerin önemli bir kısmı sanayi uygulamalarına, ulaştırma sektörüne ve hidrojen altyapısına yönelik yatırımlardan oluşmaktadır (Hydrogen Council, 2024, s. 8).



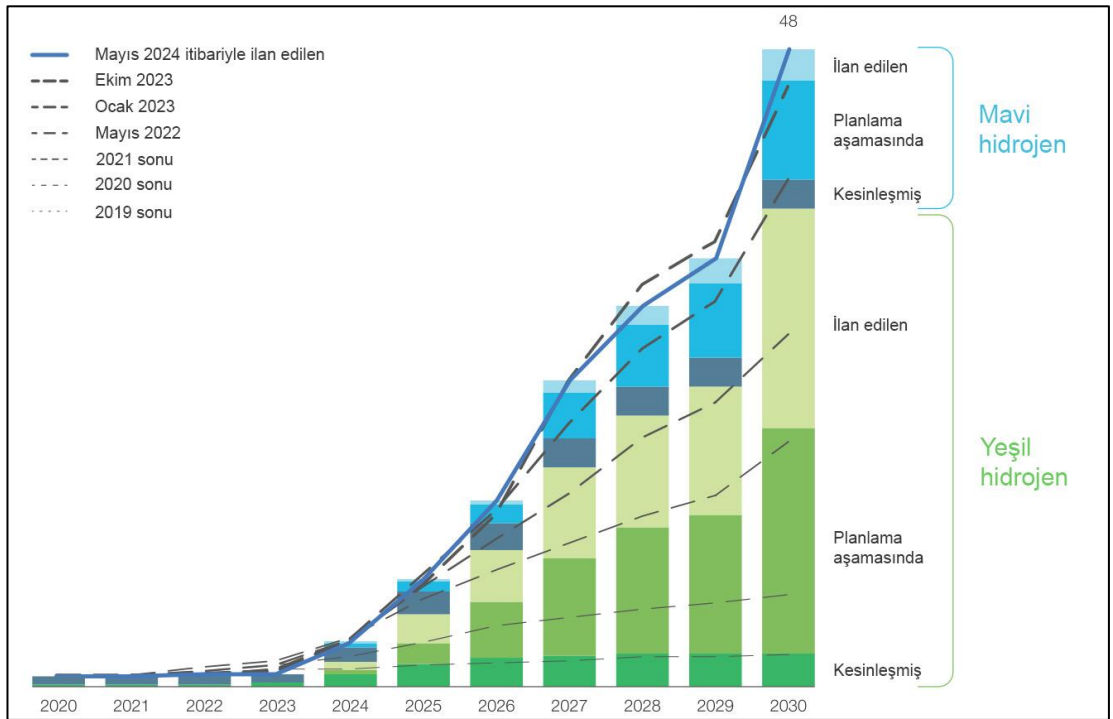
Şekil 7. Temiz Hidrojen Yatırımlarının Bölgesel Dağılımı

Kaynak: Hydrogen Council, 2024.

Şekil 7, 2023-2024 döneminde temiz hidrojen yatırımlarının bölgesel dağılımını göstermektedir. Veri dönemi oldukça kısıtlı bir dönemi yansıtmaktadır. Çünkü Hydrogen Council tarafından yayımlanan *Hydrogen Insights* raporları 2021 yılından itibaren düzenli olarak hazırlanmakla birlikte, raporlar arasında bölgesel kırılımların ve kullanılan göstergelerin standart bir yapıya sahip olmaması, yıllara dayalı karşılaştırmalı analiz yapılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle Şekil 7’de, hidrojen yatırımlarının en güncel bölgesel dağılımını yansıtmayı amacıyla 2024 raporu esas alınmıştır. Buna göre; Avrupa, proje sayısı ve yatırım büyüklüğü açısından ilk sırada yer almakta; onu Latin Amerika ve Kuzey Amerika izlemektedir. Japonya ve Güney Kore söz konusu dönemde yatırım artış hızında öne çıkarken, Hindistan’da da hızlı bir büyüme eğilimi gözlemlenmektedir. Afrika’daki yatırım azalışı, büyük ölçekli projelerin çok fazlı bir yapıya dönüştürülmesi ve ileri fazların 2030 sonrası döneme ertelenmesiyle ilişkilendirilmektedir. Bu çerçevede, Afrika’daki söz konusu düşüş bölgedeki yatırım potansiyelinin zayıflamasından çok projelerin gerçekleştirilme takvimindeki değişimi göstermektedir. Bu veriler genel olarak, temiz hidrojenin dünya genelinde stratejik bir yatırım alanı hâline geldiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 8’de yer verilen temiz hidrojen yatırımlarına ilişkin dağılım değerlendirildiğinde, küresel ölçekte yeşil ve mavi hidrojen üretim kapasitelerine ilişkin açıklanan kümülatif kapasite 2030 yılı itibarıyla 48 milyon ton/yıl

seviyesindedir. 2024 yılı itibarıyla toplam yatırımlar yeşil ve mavi hidrojen arasında dengeli bir biçimde dağılmakta iken 2030’a doğru bu dengenin giderek yeşil hidrojen lehine değiştiği görülmektedir. Kesikli çizgiler, 2019 yılından itibaren 2030’a yönelik kümülatif kapasite beklentilerinin her yıl yukarı yönlü güncellendiğini ve özellikle 2022 sonrası dönemde yatırım beklentilerinde hızlanan bir artış yaşandığını göstermektedir. Hydrogen Council 2021-2024 raporlarında ara yıllara ilişkin üretim kapasitesi verileri yer almamakta olup, yalnızca 2030 yılına yönelik kümülatif kapasite projeksiyonları paylaşılmaktadır. Bu projeksiyonlar 2021 raporunda 6,7 Mt iken, 2022’de 26,2 Mt’a, 2023’te 45 Mt’a ve 2024 raporunda 48 Mt’a yükselmiştir.



Şekil 8. Yıllara Göre Yeşil Hidrojen ve Mavi Hidrojen Yatırımları

Kaynak: Hydrogen Council, 2024.

Dünya genelinde Avrupa ve Latin Amerika daha çok yeşil hidrojen yatırımlarına yönelirken, Kuzey Amerika mavi hidrojene ağırlık vermektedir. Tüm bu bulgular, kısa vadede mavi ve yeşil hidrojenin birlikte geliştiğini; ancak orta ve uzun vadede küresel üretim yapısının giderek yeşil hidrojen ağırlıklı bir yapıya evirildiğini ortaya koymaktadır. 2030 yılına kadar ulaşılması beklenen toplam kapasitenin yaklaşık 36 milyon tonunun yeşil hidrojene, kalan 12 milyon tonunun ise mavi hidrojene ait olması öngörülmektedir (Hydrogen Council, 2024, s. 11).

2024 yılı itibarıyla yeşil hidrojen üretiminde kullanılan elektrolizör kurulu gücü dünya genelinde yaklaşık 2 GW (gigawatt) seviyesine ulaşmıştır. 2023 yılında yaklaşık 700 MW olan yıllık kapasite artışı, 2024'te 600 MW civarına gerilemiştir. Kurulumların bölgesel dağılımı incelendiğinde, en büyük artışın Çin'de gerçekleştiği ve Çin'in 2024 yılı sonunda küresel kurulu elektroliz kapasitesinin %50'sinden fazlasına sahip olduğu görülmektedir. Avrupa ise kapasite artışlarının yaklaşık %25'ini oluşturarak ikinci sırada yer almakta ve 2024 yılı sonunda küresel kurulu kapasitenin %20'sinden fazlasına ulaşmaktadır. Teknoloji bazında değerlendirildiğinde ise, alkali elektrolizörler, hâkim teknoloji konumunu sürdürmektedir. Çin elektrolizör üretimi açısından da küresel açıdan lider konumundadır (IEA, 2025a, s. 99).

Önümüzdeki otuz yıllık dönemde yeşil hidrojenin küresel enerji ihtiyacının yaklaşık %20'sini karşılaması ve bu süreçte 2,5 trilyon ABD doları tutarında gelir yaratması beklenmektedir. 2050 yılı itibarıyla yıllık yaklaşık 530 milyon ton yeşil hidrojen üretimiyle birlikte 10,4 milyar varil petrol eşdeğerinin ikame edileceği öngörülmektedir. Aynı dönemde küresel yeşil hidrojen endüstrisinin yıllık 300 milyar ABD dolarına ulaşan bir pazar büyüklüğüne erişeceği ve dünya genelinde yaklaşık 42 milyon kişiye istihdam sağlayacağı tahmin edilmektedir (Braga vd., 2024, s. 24).

2.3.2. Avrupa Birliği'nde Yeşil Hidrojen

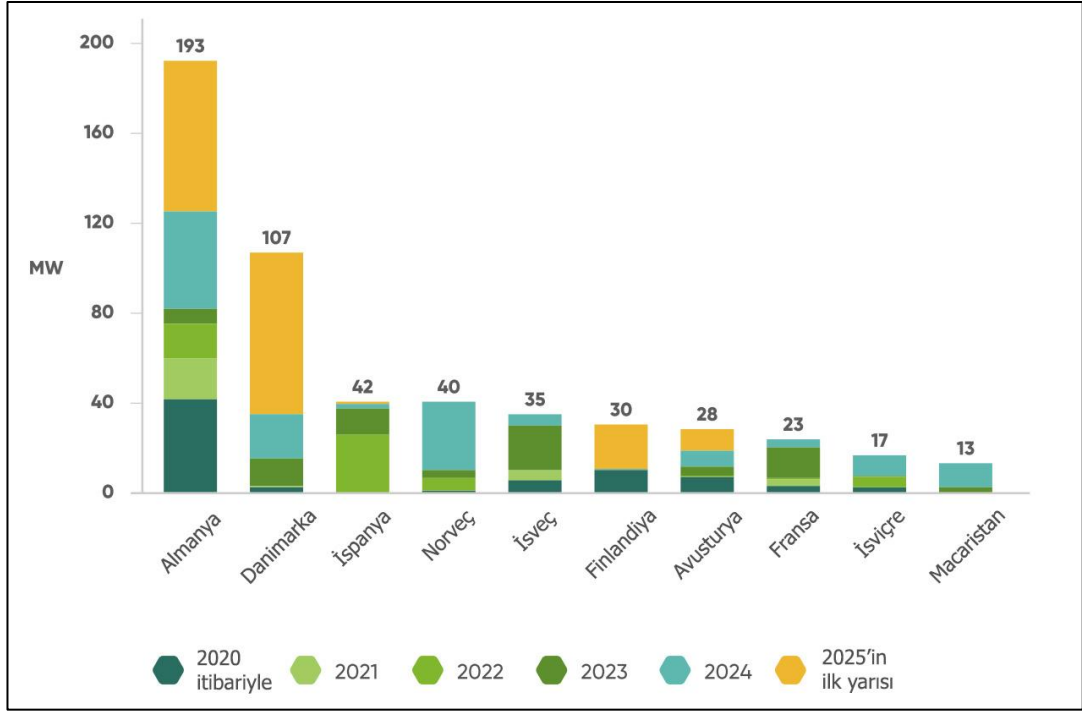
Küresel ölçekte olduğu gibi AB ölçeğinde de 2020 yılı öncesinde yeşil hidrojene yönelik politika ve uygulamaların sınırlı kaldığı ve olgunlaşma döneminde olduğu görülmektedir. 2020 yılı itibarıyla ise Avrupa Birliği, yayımladığı Hidrojen Stratejisi ile yeşil hidrojeni enerji ve sanayi politikalarının merkezine alan daha kapsamlı ve hedef odaklı bir yaklaşım benimsemiştir.

AB tarafından 2020 yılında yayımlanan Hidrojen Stratejisi'ne göre öncelik, rüzgâr ve güneş enerjisi kullanılarak üretilen yeşil hidrojenin geliştirilmesi olarak belirlenmiştir. Bu çerçevede, 2020–2024 döneminde AB'de en az 6 GW elektrolizör kapasitesinin kurulması ve yıllık 1 milyon tona kadar yeşil hidrojen üretimin sağlanması hedeflenmiş; 2025–2030 döneminde ise elektrolizör kapasitesinin en az

40 GW'a ve üretimin 10 milyon tona ulaştırılması amaçlanmıştır. 2030 sonrası dönemde ise yenilenebilir hidrojen teknolojilerinin olgunlaşarak yaygın ölçekli uygulamaya geçmesi, özellikle dekarbonizasyonu zor sektörlerde temel bir çözüm haline gelmesi amaçlanmaktadır. 2050 yılına kadar yenilenebilir elektrik üretiminin yaklaşık dörtte birinin yeşil hidrojen üretiminde kullanılması hedefi de ortaya konulmuştur (EU, 2020, s. 5). Ancak AB'de kurulu elektrolizör kapasitesi 2024 yılı sonu itibarıyla yaklaşık 340 MW seviyesinde gerçekleşmiş olup bu değer AB Hidrojen Stratejisi'nde 2024 yılı için belirlenen 6 GW'lık ara hedefin oldukça altında gerçekleşmiştir (IEA, 2025a, s. 100).

2025 yılı itibarıyla Avrupa'da kurulu elektrolizör kapasitesi 571 MW seviyesine ulaşmış olup, Haziran 2024 ile Haziran 2025 arasında kurulan yaklaşık 288 MW ilave kapasite sayesinde Avrupa'daki mevcut elektrolizör kapasitesi iki katına çıkmıştır (Hydrogen Europe, 2025, s. 20). Şekil 9, 2025 yılı Haziran ayına kadar Avrupa'daki en yüksek elektrolizör kurulu gücüne sahip ilk 10 ülkenin yıllar itibarıyla dağılımını göstermektedir. Buna göre, Almanya 193 MW elektrolizör kurulu gücü ile açık ara Avrupa lideri konumundadır. Danimarka 107 MW ile ikinci sırada yer almakta olup İspanya, Norveç ve İsveç orta ölçekli kapasitelerle Almanya ve Danimarka'yı takip etmektedir. Finlandiya, Avusturya ve Fransa ise elektrolizör kapasitesini istikrarlı biçimde artıran ülkeler arasında yer almaktadır. İsviçre ve Macaristan daha sınırlı kapasiteye sahip olmakla birlikte, bu ülkelerde özellikle 2023 sonrası dönemde ivmelenen bir artış eğilimi dikkat çekmektedir.

Şekil 9'daki yıllık renk dağılımı, kapasite artışlarının büyük bölümünün 2024 ve 2025 yıllarında gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Avrupa'da elektroliz kapasitesinin 2024–2025 döneminde yaklaşık iki katına çıkarak 571 MW seviyesine ulaşması ile uyumludur.



Şekil 9. Avrupa'da Ükelere ve Yıllara Göre Kurulu Elektrolizör Kapasitesi

Kaynak: Hydrogen Europe, 2025.

2025 yılında Avrupa'da ortalama yeşil hidrojen maliyeti 7,1 €/kg olarak gerçekleşmiş olup, bu değer 2024 yılında 8,4 €/kg olan ortalama maliyete kıyasla önemli bir düşüşe işaret etmektedir. Düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olan İspanya'da yeşil hidrojen 5,5 €/kg iken; düşük maliyetli ve karbonsuz şebeke elektriğine erişimi bulunan İsveç için bu değer 6,0 €/kg'dır. Avrupa'nın en büyük endüstriyel hidrojen üreticisi ve tüketicisi olan Almanya'da ise bildirilen ortalama yeşil hidrojen üretim maliyeti 7,4 €/kg düzeyinde gerçekleşmiştir (Hydrogen Europe, 2025, s. 26). Bu değerler IEA tarafından belirlenen 2 \$/kg hedeflerinin oldukça üzerindedir.

Yeşil hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi için AB tarafından çeşitli yasal düzenlemeler ve teşvik mekanizmaları geliştirilmiştir. AB Hidrojen Stratejisi'nin yanı sıra Yenilenebilir Enerji Direktifi ile Hidrojen ve Karbonsuzlaştırılmış Gaz Piyasası Paketi gibi yasal düzenlemelerle net politika hedefleri ortaya konulmuştur. Hidrojen üretiminde kullanılan elektriğin yenilenebilir sayılabilmesi için gerekli koşulları tanımlayan ve yenilenebilir yakıtlar baz alınarak üretilen hidrojenin sera gazı emisyon tasarruflarının nasıl hesaplanacağına ilişkin

metodolojiyi belirleyen direktifler açıklanarak sektörde standardizasyon geliştirilmesi sağlanmıştır (http-6).

Yeşil hidrojen hedeflerini gerçekleştirmek amacıyla hayata geçirilen bir diğer önemli araç ise Avrupa Hidrojen Bankası'dır. Yeşil hidrojen projelerine yatırımları teşvik etmek amacıyla Avrupa Hidrojen Bankası tarafından yeşil hidrojen üretimi ve alımına yönelik finansal teşvikler sunulmaktadır. Kasım 2023'te, Avrupa Hidrojen Bankası, Yenilik Fonu (Innovation Fund) kapsamında 800 milyon avroluk bütçeyle AB içinde yenilenebilir hidrojen üretimine yönelik ilk ihalesini başlatmıştır. Bu ihaleler ile seçilen projelere, üretilen hidrojen için sübvansiyon sağlanmaktadır (IRENA, 2024, s. 23).

2.3.3. Türkiye’de Yeşil Hidrojen

Türkiye, küresel ölçekte hız kazanan yeşil hidrojen yatırımları ve enerji dönüşümündeki stratejik rolünü dikkate alarak bu alana yönelik politika ve uygulama adımlarını son yıllarda hızlandırmıştır.

2023 yılında yayımlanan “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası” belgesinde Türkiye için 2030 yılına kadar 2 GW, 2035 yılına kadar 5 GW ve 2053 yılına kadar 70 GW elektrolizör kurulu gücü hedefi ortaya konulmuştur. Ayrıca yeşil hidrojen üretim maliyetini 2035 yılında 2,4 \$/kg ve 2053’e kadar 1,2 \$/kg altına düşürme diğer bir hedef olarak tanımlanmıştır. Söz konusu dokümanda yeşil hidrojene yönelik net politikalar da tanımlanmıştır. Mevcut hedefler ve politikalara ilişkin ayrıntılı bilgiler Şekil 10’da sunulmaktadır.

Hedefler
Yeşil hidrojen üretim maliyetini 2035 yılında 2,4 USD/kg ve 2053'e kadar 1,2 USD/kg altına düşürmek
Elektrolizör kurulu güç kapasitesinin 2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW ve 2053 yılında 70 GW'a ulaşmasını sağlamak
Politikalar
Yeşil hidrojen üretiminde ve depolanmasında yerli aksam kullanılmasına yönelik teşvik mekanizması oluşturmak
“Yeşil hidrojen” için sertifika programları oluşturmak ve bu programların izlenebilirliğini sağlamak,
Karbon salınımının azaltılması zor olan sektörler (kimya, demir-çelik, ulaşım, cam, seramik vb.) öncelikli olmak üzere ilgili tüm sektörlerde yeşil hidrojenin kullanımının yaygınlaştırılmasını teşvik etmek
Yeşil hidrojen üretimini artırmak için yenilenebilir enerjinin üretim ve kullanım payını yükseltmek
Dünya ve özellikle Avrupa pazarına yerli teknolojiler ile ihtiyaç fazlası yeşil hidrojen veya amonyak ihraç etmek

Şekil 10.Türkiye'nin Yeşil Hidrojene Yönelik Hedefleri ve Politikaları

Kaynak: ETKB, 2023.

Yeşil hidrojen üretiminde temel girdi olan elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması, ülkelerin doğal potansiyelini kritik hâle getirmektedir. Türkiye, güneş ve rüzgâr enerjisi açısından sahip olduğu yüksek potansiyel ile yeşil hidrojen üretimi bakımından önemli bir avantaja sahiptir (Güven ve Kayalica, 2025, s. 534).

Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinin uygun yatırım koşulları ve maliyetleri düşürücü politika araçlarıyla desteklenmesi hâlinde, 2050 yılında yıllık yaklaşık 3,4 milyon ton düzeyinde yeşil hidrojen üretim kapasitesine ulaşılması mümkün görünmektedir. Türkiye'nin öncelikle iç talebinin bir bölümünü karşılamasının ardından, 2050 yılı itibarıyla 1,5–1,9 milyon ton aralığında yeşil hidrojen ihracatı gerçekleştirebileceği öngörülmektedir. Söz konusu üretim hacminin

tesis edilebilmesi için 2050 yılına kadar yıllık ortalama 3–4 milyar ABD doları düzeyinde yatırım yapılması gerektiği tahmin edilmektedir. Buna karşılık, öngörülen maliyetler ve olası piyasa fiyatları dikkate alındığında, yeşil hidrojen üretiminin 2050 yılında Türkiye ekonomisine yıllık 6–8 milyar ABD doları arasında katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir (SHURA, 2021, s. 26).

Türkiye yeşil hidrojenin yanı sıra yeşil hidrojen türevlerinde de önemli avantajlara sahiptir. Özellikle yeşil hidrojen temelli yeşil metanol ve yeşil çelik üretimi açısından sahip olduğu sanayi altyapısı ve yenilenebilir enerji potansiyeli sayesinde stratejik bir konuma sahiptir. Yüksek ekonomik hareketliliği, Türkiye'nin yeşil metanol kullanan sanayileri ülkesine çekebilmesine imkân tanırken; gelişmiş demir-çelik sektörü ve doğal kaynak avantajları da yeşil hidrojen bazlı yeşil çelik üretiminin gerçekleştirilmesi için uygun bir zemin oluşturmaktadır. Bu yönüyle Türkiye, karbon yoğun sektörlerin karbonsuzlaştırılmasına yönelik yeni sanayi yatırımlarını çekebilecek ve yüksek katma değerli üretim yapısını güçlendirebilecek ülkeler arasında konumlandırılmaktadır (Eike ve De Blasio, 2022, s. 6).

Türkiye'de yeşil hidrojen uygulamaları henüz tam ölçekli bir yaygınlığa ulaşmamış olmakla birlikte, bazı sektörlerde yürütülen pilot çalışmalar ve yatırım hazırlıkları bulunmaktadır. Çimento sektöründe Limak Çimento'nun Air Liquide iş birliğiyle Ankara'daki tesisinde gerçekleştirdiği hidrojen karışımli yakıt denemeleri, yeşil hidrojenin yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel proseslerde fosil yakıtların ikamesine yönelik uygulanabilirliğini ortaya koyan bir örnektir ([http-7](#)). Rafineri ve enerji dönüşümü perspektifinde bakıldığında, TÜPRAŞ'ın yeşil hidrojen üretimine yönelik 20 MW kapasiteli pilot bir elektrolizör için temel mühendislik çalışmalarını tamamladığı görülmektedir ([http-8](#)). Tekfen Holding ile Enerjisa Üretim arasında, yüksek kapasiteli yeşil hidrojen ve yeşil amonyak üretimine yönelik iş birliği yapılmasına dair niyet mektubu imzalanmıştır. Tekfen Holding iştiraki olan Toros Tarım için düşük karbon ayak izine sahip yeşil amonyak üretimi gerçekleştirilmesi ve bu üretimin hem kendi ihtiyacı için kullanılması hem de iç ve dış pazarlarda satışa sunulması amaçlanmaktadır ([http-9](#)). Akfen Holding hidrojen üretimi, taşınması ve dağıtım alanlarında fırsatlar geliştirerek Türkiye'de bir hidrojen ekonomisi oluşturmayı hedeflediğini açıklamıştır. Bu kapsamda, Türkiye'nin güneyinde geliştirilmesi planlanan bir yeşil hidrojen üretim projesi için ön araştırma ve

geliştirme çalışmalarına başlandığı; endüstri ve ulaşım sektörlerinde kullanılmak üzere yıllık yaklaşık 500 ton yeşil hidrojen üretiminin hedeflendiği ifade edilmiştir (http-10).

Sanayi odaklı uygulamaların yanı sıra, Türkiye’de yeşil hidrojen alanında kurumsal yapılanma ve sektörel iş birliklerini güçlendirmeye yönelik adımlar da atılmaktadır. Türkiye’de yeşil hidrojen üreticilerini bir araya getirmek amacıyla 2022 yılında kurulan Yeşil Hidrojen Üreticileri Derneği (H2DER), ülkenin yeşil hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi ve sektörel koordinasyonun güçlendirilmesi amacıyla faaliyet göstermektedir. Dernek, yenilenebilir enerji temelli yeşil hidrojen üretimine yönelik çalışmalar yürütmekte; enerji ve sanayi aktörlerini ortak bir platformda buluşturmayı hedeflemektedir. H2DER bünyesinde Enerjisa, Akfen, Linde Gaz, SOCAR ve Zorlu Enerji gibi ulusal ve uluslararası ölçekte faaliyet gösteren şirketler yer almaktadır (http-11).

Yeşil hidrojen ekosisteminin somut biçimde hayata geçirilmesine yönelik olarak Türkiye, hidrojen vadisi yaklaşımını da benimsemiş ve bu kapsamda ilk uygulama adımını 2023 yılında Güney Marmara Bölgesi’nde atmıştır. Avrupa Birliği’nin Horizon Europe Programı kapsamında 38 milyon avro bütçeli bir proje ile hayata geçirilen “HYSouthMarmara” hidrojen vadisi aracılığıyla yıllık 500 ton yeşil hidrojen üretimi hedeflenmektedir. Üretilen yeşil hidrojen, HYSouthMarmara hidrojen vadisi bünyesinde yer alan seramik, cam ve kimya sektörlerinde faaliyet gösteren endüstriyel tesislerde kullanılacaktır (http-12).

2.4. İklim Değişikliği ile Mücadelede Yeşil Hidrojenin Rolü

Bu başlıkta çevresel etkiler ile toplumsal ve ekonomik kazanımlar açısından sunduğu fırsatlar incelenerek, yeşil hidrojenin enerji dönüşümdeki önemi daha net ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2.4.1. Yeşil Hidrojenin İklim Değişikliğiyle Mücadeledeki Rolü ve Çevresel Faydaları

Dünya genelinde artan enerji talebi bugün büyük ölçüde fosil yakıtların yanmasıyla karşılanmaktadır. Ancak bu kaynaklar yenilenebilir değildir ve ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. 2023 yılı verilerine göre; küresel ölçekte toplam enerji tüketiminin %75,55'i fosil yakıtlardan karşılanmakta olup (World Bank, 2023), fosil yakıtların yakılması CO₂ emisyonlarının %99,3'ünü yani neredeyse tamamını oluşturmaktadır (IEA, 2023b). Hidrojen, özellikle doğalgazın kullanıldığı gaz türbinleri ve çeşitli endüstriyel süreçlerde fosil yakıtlara alternatif olabilecek temiz bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin yanması sırasında partikül madde, SO_x veya CO₂ oluşmamakta olup uygun teknolojilerle NO_x emisyonları da yaklaşık %90 oranında azaltılabilmektedir (Catoire, 2021).

Hidrojenin doğrudan erişilen bir enerji kaynağı olmaması ve başka enerji kaynakları kullanılarak üretiliyor olması üretim süreçlerinden kaynaklı emisyonlar doğurmaktadır. Küresel ölçekte en çok kullanılan hidrojen türü olan gri hidrojenin yaşam döngüsü emisyonları en yüksek iken, karbon yakalama kullanıldıkça ya da yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi yapılıncaya emisyonlar giderek düşmekte ve yeşil hidrojen üretiminde emisyonlar neredeyse sıfırlanmaktadır (Kusoglu, 2022, s. 50). Bu sebeplerden ötürü yeşil hidrojen iklim değişikliği açısından en avantajlı hidrojen türü olarak öne çıkmaktadır.

Yeşil hidrojen, atmosfere yayılan zararlı kirleticilerin azaltılmasında, yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılmasında ve iklim değişikliğinin yavaşlatılmasında umut verici bir rol oynamaktadır (Mneimneh vd., 2023, s. 9). Diğer yenilenebilir enerji türleri ile entegre edildiğinde yeşil hidrojenin küresel ısınmayı azaltma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Yeşil hidrojenin küresel ısınmayı azaltma etkisi, elektroliz süreçlerinde kullanılan elektriğin kaynağına bağlı olarak farklılaşmaktadır. Yenilenebilir elektrikle kısmi besleme sağlanan senaryolarda söz konusu azaltım potansiyeli yaklaşık %66 seviyesindedir. Elektrolizörlerin yalnızca yenilenebilir elektrik fazlası (surplus) kullanılarak işletildiği ve bu elektriğin başka sektörlerde değerlendirilmediği koşullarda küresel ısınma azaltım oranının %95'e kadar yükselebileceği tahmin edilmektedir. Elektroliz teknolojisindeki ilerlemeler ve maliyet etkinliği sağlanmasıyla yeşil hidrojenin daha

yaygın şekilde benimsenmesinin, önümüzdeki dönemde iklim değişikliğinin azaltılmasına bağlı tahmini maliyetleri 10,0–15,7 trilyon ABD doları düzeyinde azaltacağı değerlendirilmektedir (Elegbeleye vd., 2025, s. 32).

Yeşil hidrojenin iklim değişikliğiyle mücadelede sunduğu önemli avantajlara karşın, çevresel açıdan bazı endişeler de bulunmaktadır. Bu endişelerin başında, elektrolizör teknolojisinin henüz istenen düzeyde olgunlaşmamış olması gelmektedir. Mevcut teknolojilerde elektroliz süreçlerinin verimliliği kullanılan sisteme bağlı olarak yaklaşık %60–80 arasında değişmekte; bu durum elektrik ihtiyacını ve üretim maliyetlerini artırmaktadır. Düşük sıcaklıklı su elektrolizinde 1 kg hidrojen üretmek için 55–60 kWh elektrik gerekmesi, yenilenebilir kaynaklara dayalı üretimin ölçeklenmesinde önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıklı elektroliz teknolojilerinde teorik olarak 40 kWh/kg seviyelerine ulaşılması hedeflense de bu sistemler hâlen araştırma ve geliştirme aşamasındadır (Franco ve Giovannini, 2023a, s. 13). Dolayısıyla, yeşil hidrojenin sürdürülebilir ve rekabetçi bir çözüm haline gelebilmesi için elektrolizör verimliliğinin artırılması ve elektrik tüketiminin azaltılması kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Yeşil hidrojen konusunda tartışılan diğer çevresel risk üretim sürecinin oldukça su yoğun olmasıdır. Elektroliz sürecinde su doğrudan bir hammadde olarak ve bazı üretim yöntemlerinde de soğutma amacıyla kullanılmaktadır (Beswick vd., 2021, s. 3167). Örneğin, her 1 MWh yeşil hidrojen üretimi için yaklaşık 5.000 litre suya ihtiyaç duyulurken, güneş enerjisinden 1 MWh elektrik üretiminde yalnızca 20 litre su kullanılmaktadır (Braga vd., 2024, s. 26). Bu nedenle, yeşil hidrojeni maliyet etkin bir şekilde üretebilen ülkelerin su kaynakları açısından yeterli kapasiteye sahip olmaları gerekmektedir. Ancak dünya suyunun yaklaşık %1'ini oluşturan tatlı su kaynaklarına dayalı bir üretim modeli sürdürülebilir olmadığı için deniz suyunun desalinizasyonu ve yeşil hidrojen üretiminde kullanılması yöntemi üzerinde son yıllarda yoğunlaşma vardır (Hausmann vd., 2021, s. 3679).

2.4.2. Sosyo-Ekonomik Faydaları

Enerji dönüşümünde yeşil hidrojenin kullanımının faydaları yalnızca çevresel kazanımlarla sınırlı olmayıp aynı zamanda çeşitli sosyo-ekonomik avantajlar da sunmaktadır. Yeşil hidrojen; üretim, depolama, taşımacılık, dağıtım ve son kullanım dâhil olmak üzere tamamen yeni bir değer zinciri yaratacaktır. Bu değer zinciri elektrolizör üreticileri, batarya firmaları, yenilenebilir enerji şirketleri, mühendislik firmaları, yazılım ve dijital ikiz geliştiricileri gibi çok geniş bir ekosistemi harekete geçirerek ekonomide çarpan etkisi yaratacaktır (Romero vd., 2022, s. 8).

Yeşil hidrojene yapılacak yatırımlar yeni teknolojik ve endüstriyel gelişmeleri hızlandırarak nitelikli iş kollarının doğmasına ve istihdamın artırılmasına katkı sağlayacaktır (IEA, 2019b, s. 14). Yeni iş kollarının ortaya çıkması yeni eğitim programları, müfredatlar ve sertifikasyonlar gibi unsurları da geliştirecektir. Fosil yakıt sektörlerinde ortaya çıkabilecek iş kayıpları mevcut sektörlerde çalışanların yeniden beceri kazandırılması (re-skilling) ve yeni yeşil istihdam alanlarının oluşturulmasıyla telafi edilebilecektir (Hamukoshi vd., 2022, s. 19).

AB tarafından uygulamaya konulan ve “Fit for 55” sürecinin bir parçası olan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM), AB’ye ithal edilen ürünlerden kaynaklanan karbon emisyonlarının fiyatlandırılmasını ve azaltılmasını amaçlamaktadır (EU, 2023, s. 54). Yeşil hidrojen, özellikle gübre ve çelik üretimi gibi sektörlerin karbonsuzlaşmasını sağlayarak bu ürünlerin CBAM’dan etkilenmeden Avrupa’ya ihracata uygun hâle gelmesine yardımcı olacaktır (Gritz ve Wolff, 2024, s. 95). Bu doğrultuda yeşil hidrojeni benimseyen ülkeler ve şirketler rekabet güçlerini artırarak maliyet avantajı ve pazar payı artışına sahip olacaktır.

Yeşil hidrojenin yerli olarak üretilmesi, ithal fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması açısından da önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu durum, ulusal enerji bağımsızlığının artırılmasını desteklediği gibi, sürdürülebilir ekonomik büyümenin teşvik edilmesine ve makroekonomik istikrara olumlu yönde etki etmektedir (Le vd., 2025, s. 8). Özellikle enerji ithalatının yüksek cari açığa neden olduğu Türkiye gibi ülkelerde, yeşil hidrojenin ülke içinde üretilmesi döviz çıkışının azaltılmasına ve enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

3. YÖNTEM

Bu bölümde, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda yeşil hidrojenin sanayi sektörü üzerindeki potansiyel etkileri nicel bir analiz yoluyla ortaya konulmaktadır. Bu kapsamda ilgili literatür incelenerek araştırmanın amacı doğrultusunda izlenen metodolojik yaklaşım, analiz kapsamı ve varsayımlar açıklanmakta; kullanılan veri setleri ile değişkenlerin tanımları sunulmaktadır.

3.1. Türkiye'nin 2053 Net-Sıfır Emisyon Hedefinde Yeşil Hidrojenin Rolüne İlişkin Analiz

Türkiye, Paris İklim Anlaşması kapsamındaki taahhütleri doğrultusunda enerji geleceğine ilişkin kapsamlı bir dönüşüm öngörmektedir. Bu çerçevede Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda, 2020 yılında birincil enerji tüketimi içinde %83,3 düzeyinde olan fosil kaynakların payının 2035 yılına kadar %70,4'e, 2053 yılı itibarıyla ise %20,8'e gerilemesi hedeflenmektedir. Aynı dönemde elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının 2020 yılındaki %42,4 seviyesinden 2035 yılında %54,8'e, 2053 yılında ise %69,1'e yükselmesi planlanmaktadır (ETKB, 2022, s. 29).

Bu dönüşüm vizyonu doğrultusunda Türkiye, 2053 yılı için net sıfır emisyon hedefini benimsemiş ve bu hedefe ulaşmak amacıyla enerji, sanayi ve ulaştırma başta olmak üzere farklı sektörler için kapsamlı dönüşüm politikaları geliştirmeye başlamıştır. Bu kapsamda sanayide yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve sanayi sektörünün karbon ayak izinin azaltılması, sanayi sektörüne yönelik tanımlanan başlıca stratejik öncelikler arasında yer almaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024, s. 80).

Yenilenebilir enerji kapasitesinin giderek artacağı bu dönüşüm sürecinde yeşil hidrojenin, karbonsuzlaşması güç sektörler için stratejik bir aktör olarak öne çıkacağı değerlendirilmektedir. Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda ortaya konulan Türkiye Enerji Modelinde emisyon azaltımının sağlanabilmesi amacıyla nihai

sektörlerde kullanılan doğalgazın hidrojen gibi temiz yakıtlarla karıştırılması öngörülmektedir. Bu doğrultuda elektrolizör kurulu gücünün artırılmasına yönelik hedefler koyan Plan, hidrojenin ilk aşamada yerinde tüketim ve sanayi sektörünün enerji ihtiyacının karşılanmasına yönelik olarak kullanılmasını hedeflemektedir (ETKB, 2022, s. 16).

Bu bölümde, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi çerçevesinde yeşil hidrojenin sanayi sektöründeki rolüne ilişkin bir değerlendirme yapılmıştır. Sanayi sektörüne ilişkin doğalgaz talebi belirlenerek, doğalgazın yeşil hidrojenle ikamesi analiz edilmiştir.

3.1.1. İlgili Literatür

Doğalgazın yeşil hidrojenle ikamesi için yapılacak senaryo analizi kapsamında mevcut literatürü doğalgaz talebini belirleyen faktörleri inceleyen çalışmalar ve doğalgazın hidrojen kullanımı yoluyla ikame edilmesini inceleyen ampirik çalışmalar olmak üzere iki ayrı grupta ele almak mümkündür:

Doğalgaz Talebinin Belirleyicileri Üzerine Literatür

Doğalgaz talebi üzerine yapılan çalışmalarda, ekonometrik modelleme yaklaşımı dönem, veri seti ve ülke koşullarına göre farklı yöntemlerle ele alınmıştır. Literatürde genel eğilim, doğalgaz talebinin fiyat ve gelir değişkenlerine duyarlılığını analiz etmek ve uzun dönem projeksiyonları elde etmek üzere eşbütünleşme temelli ve regresyon temelli modellerin kullanılması yönündedir.

Bernstein ve Medlener (2011), 1980–2008 dönemine ait zaman serisi verilerini kullanarak 12 OECD ülkesinde konutlarda doğalgaz talebini panel ARDL sınır testi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Konut doğalgaz talebi gelir ve hava koşullarına karşı oldukça duyarlı, ancak fiyatlara göre inelastik bulunmuştur. Uzun ve kısa dönemde doğalgaz tüketimi üzerinde gelir ve hava koşullarının pozitif, fiyatın ise negatif etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Payne vd. (2011) tarafından yürütülen çalışmada 1970–2007 dönemine ait yıllık veriler kullanılarak Illinois-ABD'de konutlarda doğalgaz talebi ARDL sınır testi yaklaşımıyla tahmin edilmiştir. Kişi başına doğalgaz tüketimi ile konut doğalgaz

fiyatları, kişi başına harcanabilir kişisel gelir, konut elektrik fiyatları, yakıt yağı fiyatları ve ısıtma derece günleri arasında uzun dönemli eşbütünleşme tespit edilmiştir. Uzun dönemde konut doğalgaz fiyatı, konut elektrik fiyatı ve ısıtma derece günleri; kısa dönemde de yalnızca doğalgaz fiyatı ve ısıtma derece günleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

Heidari vd. (2013), İran ekonomisi özelinde 1972–2007 dönemini kapsayan analizde doğalgaz tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki uzun dönemli ilişkiyi test etmek amacıyla ARDL sınır testi yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda doğalgaz tüketimi ile ekonomik büyüme arasında kısa ve uzun dönemde pozitif ve anlamlı bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Shahbaz vd. (2014), Pakistan ekonomisinde doğalgaz tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki dinamik ilişkiyi, sermaye ve işgücü değişkenlerini kontrol değişkenleri olarak dâhil ettikleri çok değişkenli bir model aracılığıyla incelemişlerdir. 1972-2011 dönemini kapsayan çalışmada ARDL sınır testi yöntemi kullanılmıştır. Değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkilerinin varlığı tespit edilmiş olup uzun dönem katsayı tahminleri, ekonomik büyümenin doğalgaz tüketimi üzerindeki etkisinin diğer üretim faktörlerinden daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Foye ve Benjamin'in (2021) çalışmasında, 1998–2017 yılları arasında Sahra Altı Afrika ülkelerinde doğalgaz tüketiminin ekonomik performans üzerindeki etkisi panel ARDL modeliyle incelenmiştir. Reel GSYH ile doğalgaz tüketimi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir uzun dönem ilişki tespit edilmiştir. Doğalgaz tüketiminin kısa dönemde ekonomik performans üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkisi olduğu da tespit edilmiştir.

Alzyadat'ın (2022) çalışmasında, Suudi Arabistan'daki doğalgaz tüketiminin fiyat ve gelir esneklikleri 1990–2020 dönemine ait zaman serisi verileri kullanılarak ARDL yöntemiyle tahmin edilmiştir. Analiz sonucuna göre, hem uzun hem de kısa dönemde fiyat değişimlerinin gelir değişimlerine kıyasla doğalgaz talebi üzerinde çok daha güçlü bir etkisi gözlemlenmiştir.

Erias ve Iglesias'ın (2022) 25 Avrupa ülkesi için gerçekleştirdikleri çalışmada, 2005-2020 dönemi verileri baz alınarak panel ARDL modeli kurulmuş, doğalgaz talebinin kısa ve uzun dönem fiyat ve gelir esneklikleri hesaplanmıştır.

Fransa, Danimarka ve Estonya için kısa dönemde pozitif fiyat esnekliği ve uzun dönemde fiyat değişimlerine duyarsızlık görülmüş; Letonya’da doğalgaz talebinin fiyat değişimlerine karşı duyarlılığının düşük olduğu belirlenmiş; Portekiz’de doğalgaz talebinde en yüksek fiyat esnekliği gözlemlenmiştir.

Pavlova vd. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, 1990–2021 dönemini kapsayan ve 27 AB üyesi ülkenin yıllık verilerinden oluşan bir veri seti kullanılarak, Avrupa Birliği’nde doğalgaz tüketiminin kısa ve uzun dönem belirleyicileri ARDL sınır testi yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Doğalgaz tüketimi ile bağımsız değişkenler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir eşbütünleşme tespit edilmiş olup kısa dönemde sıvı yakıt kullanımı, katı yakıt kullanımı ve kişi başına düşen GSYH’nin doğalgaz tüketimi üzerinde pozitif ve anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Türkiye özelinde yapılan farklı ampirik çalışmalar incelendiğinde; doğalgaz talebinin belirleyicilerini farklı dönem ve sektörler özelinde ele alan analizler gerçekleştirildiği görülmüştür.

Tatlı ve Lebe (2017), Türkiye’de doğalgaz tüketimi, sermaye ve istihdamın ekonomik büyüme ile olan ilişkisini 1987-2014 dönemine ait yıllık verileri kullanarak ARDL testi ile analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda serilerin eşbütünleşik olduğu; doğalgaz tüketimi, istihdam ve sabit sermaye oluşumunun uzun dönemde büyümeyi pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Umutlu ve Bayraç (2020), Türkiye’de ekonomik büyüme ile doğalgaz tüketimi arasındaki ilişkiyi, 1986–2018 dönemi yıllık verilerini kullanarak ARDL sınır testi yaklaşımı ile incelemişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, doğalgaz tüketimi ile ekonomik büyüme arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi tespit edilmiştir.

Tatlı (2022), Türkiye’de konut sektörüne ilişkin uzun dönemli doğalgaz talebini 1990–2019 dönemi verilerini kullanarak ARDL modeli ile analiz etmiştir. Analiz sonuçlarına göre, uzun dönemde doğalgaz fiyatı ve gelir değişkenlerinin doğalgaz talebi üzerinde anlamlı ve negatif bir etkiye, buna karşılık elektrik fiyatı, iklim koşulları ve kentleşme oranının ise doğalgaz talebi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Doğalgaz talebine ilişkin literatürde ARDL’den farklı yöntemler ile yapılan çalışmalar da mevcuttur. Örneğin; Erdoğan (2010), Türkiye’nin 1987–2007 dönemi

verileriyle doğalgaz talebini analiz etmiş, “partial adjustment model” aracılığıyla fiyat ve gelir esnekliklerini hesaplamış ve ARIMA modeli ile 2030’a kadar talep projeksiyonu üretmiştir. Melikoğlu (2013) çalışmasında, Türkiye doğalgaz talebi için 2013–2030 dönemi kişi başına gelir ve nüfus değişkenlerine dayalı lineer ve lojistik modeller kurmuştur. Khan (2015) Pakistan örneğinde, ekonometrik regresyon ve senaryo temelli projeksiyon yaklaşımını birlikte kullanarak doğalgaz talebinin fiyat ve gelir esnekliklerini hesaplamıştır. OECD ülkeleri örnekleminde Rajabi ve Mousavi (2019), panel FMOLS ve DOLS yöntemleri ile sanayi doğalgaz talebinin fiyat ve gelir esnekliklerini tahmin etmişlerdir.

Sonuç olarak, literatürde doğalgaz talebinin başlıca belirleyicileri olarak fiyat ve gelir değişkenlerinin ön plana çıktığı; ekonomik büyüme ve nüfus gibi makroekonomik göstergelerin ise talep dinamiklerini tamamlayıcı unsurlar olarak modellere dâhil edildiği görülmektedir. Farklı ülke ve dönemleri kapsayan ampirik çalışmalar, söz konusu değişkenlerin doğalgaz talebini açıklamada tutarlı ve güçlü sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Doğalgazın Yerine Hidrojen Kullanımı Üzerine Literatür

Fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması hedefi doğrultusunda, hidrojen özellikle sanayi, ulaşım ve ısıtma gibi doğrudan elektrifikasyonu zor sektörlerde alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Literatürde hidrojenin doğalgazın yerini alması konusundaki çalışmalar çevresel etkiler, teknik uygulanabilirlik ve ekonomik boyutlar açısından farklı yönlerden ele alınmıştır. Bu doğrultuda literatür ampirik ve teorik çalışmalar şeklinde sınıflandırılmış; öncelikle ampirik çalışmalara devamında teorik çalışmalara yer verilmiştir.

Leicher vd. (2017) tarafından Almanya için gerçekleştirilen çalışmada, power-to-gas yaklaşımı kapsamında doğalgaz şebekesine enjekte edilen yüksek oranlı hidrojenin endüstriyel yanma sistemleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, sayısal modellemeler ile deneysel yöntemlerin birlikte kullanıldığı mühendislik temelli ampirik bir analiz sunmaktadır. Sonuçlar, hidrojenin doğalgazla karıştırılarak sanayi uygulamalarında kullanılmasının teknik olarak mümkün

olduğunu ve bu yaklaşımın büyük ölçekli enerji depolama ile karbonsuzlaşma hedefleri açısından önemli bir potansiyel sunduğunu vurgulamaktadır.

Karakaya vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İsveç çelik sanayisi örneği üzerinden hidrojen bazlı doğrudan indirgeme teknolojisinin sanayi dönüşümündeki rolü incelenmiştir. Teknolojik Yenilik Sistemleri (Technological Innovation Systems – TIS) yaklaşımı ile Çok Düzeyli Perspektif (Multi-Level Perspective – MLP) çerçevesini birlikte kullanan çalışma ampirik veri içermekle birlikte, mühendislik deneyine ya da ekonometrik modellemeye dayalı değil; politika, kurumlar ve teknoloji dönüşümü dinamiklerini inceleyen ampirik bir çalışmadır. Bulgular, hidrojenin çelik üretiminde karbon esaslı indirgen girdilerin yerine kullanılarak CO₂ emisyonlarını ortadan kaldırabilecek nihai bir çözüm olarak görüldüğünü desteklemektedir.

Field ve Derwent (2021) tarafından yapılan çalışma, konut sektöründe doğalgazın yerine hidrojen kullanımının iklim etkilerini Birleşik Krallık ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) örnekleri üzerinden analiz etmektedir. Yöntemsel olarak araştırma, hidrojen ve metanın küresel ısınma potansiyellerini (Global Warming Potentials [GWP]) 100 yıllık zaman ufku için küresel kimya-ulaşım modeli (global chemistry-transport model) kullanarak hesaplayan nicel ve modelleme temelli ampirik bir analizdir. Bulgular, doğalgazın yeşil hidrojenle değiştirilmesi sayesinde sera gazı emisyonlarında 76 milyon ton CO₂ tasarrufu sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

Mayrhofer vd. (2021) tarafından yürütülen çalışmada, metal sanayisinde kullanılan ısıtma işlem fırınlarında doğalgaz–hidrojen karışımlarının alternatif yakıt olarak kullanımı deneysel mühendislik analiziyle incelenmiştir. Ampirik bulgular, yakıt karışımında %40 hacim oranında hidrojen kullanılması durumunda, toplam yanma verimliliğinin arttığını ve mevcut fırınların uygun kontrol sistemleriyle hidrojen karışımlarına adapte edilebileceğini göstermektedir.

Glanville vd. (2022), %0–30 hacimsel hidrojen–doğalgaz karışımlarının ABD ve Kanada’da yanma ekipmanları üzerindeki performans, emisyon ve güvenlik etkilerini laboratuvar ve saha testleriyle incelemişlerdir. Yöntem olarak simülasyon testleri, saha uygulaması ve deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bulgular, %30’a kadar hidrojen karışımının mevcut ekipmanlarda önemli bir verim kaybına ve yanma kararsızlığına yol açmadığını göstermektedir. Çalışma, hidrojenin doğalgazla

karıştırılarak kullanılması yaklaşımının kısa vadede sanayi ve ısı uygulamaları için uygulanabilir bir karbonsuzlaşma seçeneği sunduğunu göstermektedir.

Neacsu vd. (2022), Romanya'daki bir doğalgaz dağıtım sistemine ilişkin gerçekleştirdikleri teknik değerlendirmede, hidrojenin doğalgazla karıştırılmasının sera gazı emisyonlarını azaltma açısından etkisini araştırmışlardır. Doğalgaz sistemine yapılan %5, %10 ve %20 oranlarında hidrojen enjeksiyonu, CO₂ emisyonlarında sırasıyla %3, %5 ve %11'lik azalma sağlamıştır. Hidrojenin doğalgaz karışımlarında kullanımı enerji sektöründe yükselen bir eğilim olarak tanımlanmış ve bu yaklaşımın, geniş çaplı karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmada önemli bir dönüşüm potansiyeli taşıdığı vurgulanmıştır.

Ozturk vd. (2023), doğalgazın farklı oranlarda hidrojenle karışımının teknik ve çevresel performansını birlikte değerlendiren ampirik bir mühendislik analizi ortaya koymuşlardır. Çalışmada, saf doğalgaz ile hidrojen-doğalgaz karışımları aynı koşullarda yakılarak CO₂ ve NO_x emisyonları ölçülmüş ve hidrojen oranındaki artışın yanma verimini artırdığı, CO₂ emisyonlarını ise azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizi (LCA) sonuçlarına göre, %30 hidrojen karışımı durumunda küresel ısınma potansiyeli 6,233 kg CO₂ eşdeğerinden 6,123 kg CO₂ eşdeğerine gerilemiştir.

Zeng vd. (2023) tarafından yürütülen uygulamalı mühendislik çalışmasında, gaz türbinlerinde hidrojen karışimli yakıt sistemlerinin performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada %5–30 aralığında hidrojen karışımı için geliştirilen iki farklı dönüşüm şeması saha testleriyle değerlendirilmiş; yanma stabilitesi korunmuş, güç üretiminde önemli bir düşüş gözlenmemiş ve NO_x emisyonlarının mevzuat sınırları içerisinde kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca %15 ve %30 hidrojen karışımı durumunda yıllık CO₂ emisyonlarında sırasıyla 11.000 ve 28.400 ton azalma potansiyeli hesaplanmıştır.

Franco ve Rocca (2024), hidrojenin endüstriyel brülör ve fırınlarda doğalgaz ile birlikte kullanımını termodinamik ve enerji göstergeleri çerçevesinde analiz etmişlerdir. Çalışmada, %20 hidrojen karışımının yaklaşık %7, %30 karışımın ise %10 civarında CO₂ emisyon azaltımı sağladığı belirtilmekte; ancak %25–30 seviyesinin üzerinde teorik ve operasyonel sınırlamaların belirginleştiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda hidrojen karışımlarının kısa ve orta vadede uygulanabilir bir geçiş stratejisi olduğu, ancak uzun vadede sınırlı emisyon azaltımı

nedeniyle saf hidrojen kullanımına geçişin daha rasyonel olabileceği ifade edilmektedir.

Liu vd. (2024), endüstriyel fırınlarda doğalgazın hidrojen ile karıştırılarak kullanılmasının yanma performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisini hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile incelemişlerdir. Bulgular, hidrojen ilavesinin enerji verimliliğini artırabileceğini ve emisyonların azaltılmasına katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Bu durum hidrojenin sanayi fırınlarında doğalgaza tamamlayıcı bir yakıt olarak kullanılmasının teknik açıdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Wallat vd. (2024), tuğla ve kiremit endüstrisinde doğalgazın hidrojen ile ikame edilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada, mevcut doğalgaz brülörü, hem doğalgaz hem de hidrojenle çalışabilen bir dual-fuel brülör ile değiştirilmiş; test tesisi deneyleri, sayısal simülasyonlar ve endüstriyel deneme yanmaları birlikte değerlendirilmiştir. Bulgular, hidrojen kullanımının ürün kalitesi üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını ve sistemin operasyonel olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Bu yönüyle araştırma, hidrojenin sanayi sektöründe mevcut altyapı korunarak kullanılabileceğini ortaya koyan saha temelli ampirik bir doğrulama çalışması niteliğindedir.

Mirshokraee vd. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, “hard-to-abate” bir endüstriyel yüksek sıcaklık fırınında doğalgazın yeşil hidrojen ile tam veya kısmi ikamesi tekno-ekonomik analiz çerçevesinde incelenmiştir. Gerçek aylık doğalgaz tüketim verilerine dayalı olarak geliştirilen modelde, hidrojen üretimi simüle edilmiştir. 2024–2030 dönemi için yapılan projeksiyonlarda, yeşil hidrojen üretim maliyetinin 12,6 €/kg’dan 9,7 €/kg’a düşebileceği; mevsimsel blending stratejisi uygulanması halinde ise maliyetin 8,7 €/kg seviyesine kadar gerileyebileceği öngörülmüştür. Çalışma ayrıca sermaye harcamalarının, özellikle elektrolizör yatırımlarının, ekonomik fizibilite açısından belirleyici unsur olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle araştırma, yeşil hidrojenin sanayide uygulanabilirliğini teknik ve ekonomik boyutlarıyla birlikte değerlendiren senaryo temelli ampirik bir modelleme çalışmasıdır.

Teorik çalışmalar incelendiğinde; Momirlan ve Veziroglu (2005) tarafından yapılan çalışmada, hidrojenin temiz enerji taşıyıcısı olarak çevresel faydaları ele alınmış ve hidrojenin kullanımının CO₂ gibi kirleticilerin önemli ölçüde azaltılmasına

katkı sağlayacağı belirtilmiştir. Kavramsal nitelikli olan bu çalışma, hidrojen ekonomisi kavramını açıklayarak, mevcut doğalgaz altyapısının hidrojen kullanımına geçişte dönüştürülmesi gerektiğini belirtmiştir.

Franco ve Giovannini (2023b) tarafından yürütülen çalışmada, hidrojenin karbonsuzlaşması güç sanayi sektörlerinde doğalgazın ikamesi veya tamamlayıcısı olarak kullanılma potansiyeli ele alınmıştır. Çalışma, sektörel etkileri literatür bulguları ile inceleyen kavramsal ve değerlendirmeye dayalı bir araştırma niteliğindedir. Çalışmada, özellikle hidrojenin doğalgazla karıştırılarak kullanılması seçeneğinin, mevcut altyapıyla uyumluluğu sayesinde sanayide emisyon azaltımı açısından uygulanabilir ve kademeli bir geçiş yolu sunduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca hidrojenin, bazı sanayi kollarında yalnızca yakıt değil, aynı zamanda indirgen bir girdi olarak kullanılarak üretim süreçlerinin çevresel etkilerini azaltabileceği vurgulanmaktadır.

Bhuiyan ve Siddique (2025), hidrojenin sürdürülebilir enerji taşıyıcısı olarak potansiyelini kapsamlı bir literatür derlemesi çerçevesinde değerlendirmektedir. Çalışma, yeşil hidrojen üretiminin yüksek maliyet ve düşük ekonomik rekabet gücü nedeniyle sınırlı kaldığını vurgulamaktadır. Ayrıca depolama, taşıma altyapısı, güvenlik standartları ve değer zinciri eksiklikleri hidrojen ekonomisinin gelişimini kısıtlayan temel yapısal sorunlar olarak ele alınmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hidrojenin enerji dönüşümündeki rolünü teknik ve ekonomik boyutlarıyla bütüncül biçimde tartışan kavramsal bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak literatür genelinde, hidrojenin doğalgazın yerine veya doğalgazla karıştırılarak kullanılmasının teknik olarak uygulanabilir olduğu konusunda ortak bir görüş bulunmakta olup bu yaklaşımın karbon emisyonlarının azaltılması ve karbon nötr bir enerji geleceğine geçiş açısından stratejik bir fırsat sunduğu değerlendirilmektedir.

3.1.2. Analizin Amacı

Bu araştırma, 1988-2024 dönemine ait veriler kullanılarak Türkiye sanayi sektörüne ilişkin doğalgaz talebini ekonomik belirleyiciler (sanayi üretimi ve fiyat) ile enerji dönüşümünü temsil eden göstergeler (yenilenebilir enerji kurulu gücü)

aracılığıyla modelleyerek 2053 yılına kadar uzanan bir talep projeksiyonu oluşturmayı amaçlamaktadır.

Çalışmada ayrıca, söz konusu talebin hangi ölçüde yeşil hidrojenle ikame edilebileceği analiz edilerek, buna bağlı olarak ortaya çıkacak doğalgaz tasarrufu ve CO₂ emisyon azaltımı miktarları tahmin edilmektedir.

3.1.3. Yöntem, Kapsam ve Kısıtlar

Yöntem

Bu tez çalışmasında küçük örneklemelerde güvenilir sonuçlar vermesi, I(0) ve I(1) değişkenlerin birlikte analizine olanak tanınması ve uzun dönem katsayı tahminlerinde tutarlılık sağlaması nedeniyle (Pesaran ve Shin, 1997, s. 23) yöntem olarak ARDL sınır testi yaklaşımı tercih edilmiştir. ARDL modeli sayesinde, doğalgaz talebi ile sanayi üretimi, doğalgaz fiyatı ve yenilenebilir enerji kurulu gücü arasındaki uzun dönem eşbütünleşme ilişkisi test edilecek, sınır testi ile uzun dönem denge varlığı sınanacak, kısa dönem dinamikleri ve hata düzeltme katsayısı (Error Correction Term [ECT]) elde edilecektir.

Pesaran ve Shin (1997) tarafından tanıtılan ve daha sonra Pesaran vd. (2001) tarafından genişletilen ARDL modelinde eşbütünleşme ilişkisinin sınanması amacıyla kullanılan denklem formuna aşağıdaki (1) numaralı denklemde yer verilmiştir.

$$\Delta \ln Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \Delta \ln Y_{t-i} + \sum_{i=0}^m \alpha_{2i} \Delta \ln X_{t-i} + \alpha_3 \ln Y_{t-1} + \alpha_4 \ln X_{t-1} + u_t \quad (1)$$

Modelde Y_t , bağımlı değişkenin t dönemindeki değerini; X_t ise bağımsız değişkenlerin t dönemindeki değerini ifade etmektedir. Δ fark operatörünü temsil etmekte olup, bir değişkenin bir önceki döneme göre değişimini göstermektedir. $\sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \Delta \ln Y_{t-i}$ ifadesi, bağımlı değişkenin gecikmeli farklarının Y_t üzerindeki etkilerini; $\sum_{i=0}^m \alpha_{2i} \Delta \ln X_{t-i}$ ise bağımsız değişkenlerin gecikmeli farklarının kısa dönem etkilerini göstermektedir. Denklemdeki α_{1i} ve α_{2i} katsayıları kısa dönem

dinamiklerini temsil ederken, α_3 ve α_4 ise uzun dönem katsayılarını göstermektedir. Ayrıca $\ln$ değişkenlerin logaritmik formlarını, m gecikme uzunluğunu, u_t ise modelin hata terimini göstermektedir.

Öncelikle modelde yer alan seriler arasındaki eşbütünleşme ilişkisinin tespit edilmesinde tahmin edilecek denklemdeki uygun gecikme sayısının (m) belirlenmesi gerekmektedir. Schwarz Bilgi Kriterini (SIC) en küçük yapan m değeri uygun gecikme sayısı olarak belirlenmektedir. Ardından eşbütünleşme ilişkisinin araştırılması amacıyla Wald testi yardımıyla F istatistiği hesaplanmaktadır. Bu kapsamda, değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkisinin varlığının sınanması amacıyla oluşturulan hipotezler aşağıdaki gibidir.

$$H_0: \alpha_3 = \alpha_4 = 0 \text{ (Eşbütünleşme yoktur)}$$

$$H_1: \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq 0 \text{ (Eşbütünleşme vardır)}$$

Elde edilen F-istatistik değeri, analiz kapsamında belirlenen üst sınır (upper bound) kritik değerlerinden daha büyük ise, H_0 hipotezi reddedilmekte ve değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. F-istatistik değerinin alt sınır (lower bound) kritik değerden küçük olması durumunda ise H_0 hipotezi kabul edilmekte ve değişkenler arasında eşbütünleşme olmadığı sonucuna varılmaktadır. F değerinin, iki kritik değer arasında kalması halinde ise, eşbütünleşme ilişkisinin varlığı hakkında kesin bir çıkarımda bulunulamamaktadır (Narayan, 2004, s. 21).

Sınır testi ile eşbütünleşmenin belirlenmesinin ardından ikinci ve üçüncü aşamalarda sırasıyla uzun ve kısa dönem katsayıları (esneklikleri) tahmin edilmektedir. ARDL modeline ait uzun dönem denklemi Denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$\ln Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \ln Y_{t-i} + \sum_{i=0}^n \alpha_{2i} \ln X_{t-i} + u_t \quad (2)$$

Uzun dönem analizinde Sınır Testinden farklı olarak değişkenlerin gecikme uzunlukları birbirlerinden bağımsız şekilde belirlenmektedir. Denklem (2)'deki m ve n gecikme uzunluklarını temsil etmektedir. Değişkenlerin gecikme uzunlukları Schwarz Bilgi Kriteri dikkate alınarak belirlendikten sonra uzun dönem katsayıları

tahmin edilmektedir. Son adımda ise kısa dönem ilişkisi hata düzeltme modeli ile aşağıda yer alan (3) numaralı denklemle belirlenmektedir.

$$\Delta \ln Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \Delta \ln Y_{t-i} + \sum_{i=0}^n \alpha_{2i} \Delta \ln X_{t-i} + \lambda ECT_{t-1} + u_t \quad (3)$$

Modelde yer alan ECT, uzun dönemden sapmayı ifade eden hata düzeltme terimidir ve katsayısı λ sistemin bu sapmayı ne kadar hızlı düzelttiğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, Payne vd. (2011), Tatlı (2022) ve Pavlova vd. (2025)'in çalışmaları baz alınarak eşbütünleşme ilişkisinin analiz edileceği temel ARDL denklemi aşağıdaki (4) numaralı denklemdeki gibi oluşturulmuştur. Bağımlı değişken DGAZ sanayi doğalgaz tüketim miktarını, bağımsız değişkenler REEL_FİYAT sanayi doğalgaz fiyatını, SUE sanayi üretim endeksini, YENERJİ yenilenebilir enerji kurulu gücünü ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} \Delta \ln DGAZ_t = & \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \Delta \ln DGAZ_{t-i} + \sum_{i=0}^m \alpha_{2i} \Delta \ln REELFIYAT_{t-i} \\ & + \sum_{i=0}^m \alpha_{3i} \Delta \ln SUE_{t-i} + \sum_{i=0}^m \alpha_{4i} \Delta \ln YENERJI_{t-i} \\ & + \alpha_5 \ln DGAZ_{t-1} + \alpha_6 \ln REELFIYAT_{t-1} + \alpha_7 \ln SUE_{t-1} \\ & + \alpha_8 \ln YENERJI_{t-1} + u_t \end{aligned} \quad (4)$$

Eşbütünleşme ilişkisi tespit edildikten sonra değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkisinin tahmin edilmesi için ARDL modeline dayalı uzun dönem denklemi (5) numaralı denklemde belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}
\ln DGAZ_t = & \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \ln DGAZ_{t-i} + \sum_{i=0}^n \alpha_{2i} \ln REELFIYAT_{t-i} \\
& + \sum_{i=0}^p \alpha_{3i} \ln SUE_{t-i} + \sum_{i=0}^q \alpha_{4i} \ln YENERJİ_{t-i} + u_t
\end{aligned} \tag{5}$$

Uzun dönem ilişkiden elde edilen hata terimleri serisi kullanılarak oluşturulan ARDL yaklaşımına dayalı kısa dönemli “hata düzeltme modeli”ne aşağıda denklem (6)’da yer verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\Delta \ln DGAZ_t = & \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} \Delta \ln DGAZ_{t-i} + \sum_{i=0}^n \alpha_{2i} \Delta \ln REELFIYAT_{t-i} \\
& + \sum_{i=0}^p \alpha_{3i} \Delta \ln SUE_{t-i} + \sum_{i=0}^q \alpha_{4i} \Delta \ln YENERJİ_{t-i} + \lambda ECT_{t-1} \\
& + u_t
\end{aligned} \tag{6}$$

Çalışmada kullanılan ARDL modeline ilişkin denklemler oluşturulduktan sonra, modelin tanısal uygunluğu otoregresyon, değişen varyans, normallik ve model kararlılığı testleri (CUSUM/CUSUMSQ) ile sınanmıştır. Tüm ekonometrik analizler E-Views 9 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 2053 yılına kadar sanayi doğalgaz talebinin projeksiyonu E-Views ARDL Forecast penceresi üzerinden elde edilmiştir.

Kapsam

Bu tez çalışması, 1988–2024 dönemi yıllık verilerini kullanarak Türkiye sanayi sektöründe doğalgaz talebinin temel belirleyicilerini analiz etmektedir. Çalışma, doğalgaz talebinin temel belirleyicilerini ortaya koymanın yanı sıra 2053 yılına kadar doğalgaz talebi projeksiyonunu oluşturmayı amaçlamaktadır.

Analiz kapsamında; sanayi sektörünün enerji dönüşüm sürecinde doğalgaz talebini etkileyen faktörler (reel doğalgaz fiyatı, sanayi üretim endeksi, yenilenebilir enerji kurulu gücü) dikkate alınmıştır. Bu değişkenler, doğalgaz talebini fiyat

dinamikleri, üretim düzeyi ve yenilenebilir enerji kapasitesi yoluyla etkileyen ana göstergeler olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın odak noktası, yeşil hidrojenin uzun vadede doğalgazın yerini alabileceği varsayımından hareketle, doğalgaz talebinin gelecekteki emisyon azaltım potansiyelinin ortaya konulmasıdır.

Kısıtlar

Çalışmanın kapsamı doğalgazın yoğun olarak kullanıldığı ve yeşil hidrojen ikame potansiyelinin görece yüksek kabul edildiği sanayi sektörü ile sınırlandırılmış olup; konut, ulaşım ve enerji üretimi gibi diğer sektörler kapsam dışında bırakılmıştır.

Sanayi doğalgaz fiyatına ilişkin veri kısıtları nedeniyle farklı kaynaklardan yararlanılarak zaman serisi oluşturulmuş ve veri dönemi 1988–2024 dönemiyle sınırlı tutulmuştur.

Modelin tahmin ettiği uzun dönem ilişkiler ceteris paribus varsayımı altında geçerlidir; dolayısıyla olası yapısal dönüşümler, enerji politikalarındaki değişiklikler veya fiyat şokları modelin tahmin doğruluğunu etkileme potansiyeline sahiptir.

3.1.4. Veri Seti ve Değişken Tanımları

Araştırma, Türkiye için 1988-2024 dönemini kapsamakta olup veri setleri yıllık frekanstadır. Elde edilen zaman serilerinde ölçek farkını azaltmak amacıyla değişkenlerin logaritmaları alınmış ve analiz logaritmik seriler ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sanayi doğalgaz fiyatı verileri, TÜİK ÜFE (2003=100) verisi dikkate alınarak deflate edilmiş ve reel fiyata dönüştürülerek analize dâhil edilmiştir.

Tablo 1. Değişkenlere Ait Tanımlar

Değişkenler		Kısaltma	Birim	Kaynak
Bağımlı Değişken	Sanayi Doğalgaz Tüketim Miktarı	DGAZ	Bin TEP	ETKB, 2024

Tablo 1-devamı

Bağımsız Değişkenler	Sanayi Doğalgaz Fiyatı	REEL_FİYAT	TL/MWh	OECD, 2000 TÜİK,2020 EUROSTAT, 2023 EPDK, 2024
	Sanayi Üretim Endeksi	SUE	Mevsim ve Takvim Etkilerinden Arındırılmış, (2021=100)	TÜİK, 2024
	Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü	YENERJİ	MW	TEİAŞ, 2024

Değişkenlere ve veri setlerine ilişkin açıklayıcı bilgilere yer verildikten sonra Tablo 2’de değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler sunulmaktadır.

Tablo 2. Değişkenlere Ait Tanımlayıcı İstatistikler

	DGAZ	REEL_FİYAT	SUE	YENERJİ
Ortalama	5.028,45	28,91	52,05	22.093,09
Medyan	4.768,37	30,07	45,20	13.144,60
Maksimum	12.020,00	40,65	106,70	67.039,37
Minimum	187,00	3,94	20,57	6.235,80
Standart Sapma	3.409,26	8,69	27,32	17.089,69
Çarpıklık	0,25	-1,34	0,66	1,20
Basıklık	1,77	4,80	2,15	3,21
Jarque-Bera	2,73	16,14	3,79	8,97
Olasılık	0,255**	0,0003	0,149**	0,011

Not: ** %5 anlamlılık düzeyini göstermektedir.

Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistiklere göre, en yüksek ortalama ve en yüksek maksimum değere YENERJİ serisinin, en düşük ortalama ve en düşük maksimum değere ise REEL_FİYAT serisinin sahip olduğu görülmektedir. Standart sapma değerleri incelendiğinde, YENERJİ değişkeninin diğer değişkenlere kıyasla daha yüksek dalgalanmalar sergilediği, buna karşın REEL_FİYAT serisinin daha sınırlı değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. DGAZ, SUE ve YENERJİ serilerinde çarpıklık değerlerinin pozitif olması, bu değişkenlerde dağılımın sağa çarpık olduğunu ve yüksek değerlerin dağılımda fazla olduğunu göstermektedir. Buna karşın REEL_FİYAT serisinin çarpıklık değerinin negatif olması, bu değişkende dağılımın sola çarpık olduğunu ve düşük değerlerin dağılım üzerinde daha baskın olduğunu işaret etmektedir. Basıklık katsayıları incelendiğinde, REEL_FİYAT ve YENERJİ serilerinin basıklık değerlerinin 3'ün üzerinde olması, bu serilerde uç değerlerin daha yoğunlaştığını ve dağılımın normal dağılıma göre daha sivri bir yapıda olduğunu göstermektedir. Buna karşılık DGAZ ve SUE serilerinin basıklık değerlerinin 3'ün altında olması, bu serilerin daha basık bir dağılıma sahip olduğunu ve uç değerlerin daha az yoğunlaştığını ifade etmektedir. Ayrıca Jarque-Bera test istatistiği sonuçları, DGAZ ve SUE serileri için %5 anlamlılık düzeyinde normal dağılım varsayımının kabul edildiğini, REEL_FİYAT ve YENERJİ serilerinin ise normal dağılmadığını göstermektedir.

4. BULGULAR VE YORUMLAR

Bu bölümde, araştırmanın yöntem ve analiz çerçevesi doğrultusunda elde edilen bulgular sunulmakta ve değerlendirilmektedir. İlk olarak çalışmanın temel bulguları ortaya konulmakta, ardından 2053 yılına yönelik talep projeksiyonu analiz edilmektedir. Son aşamada ise sanayi sektöründe doğalgazın yeşil hidrojenle ikame edilmesi durumunda sağlanabilecek emisyon azaltım miktarları hesaplanarak yorumlanmaktadır. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefleri bağlamında yeşil hidrojenin potansiyel rolünü ortaya koyacak şekilde değerlendirilmektedir.

4.1. Temel Bulgular

Analizde ilk olarak logaritmik serilerin durağanlığı kontrol edilmiştir. Bağımlı değişken doğalgaz tüketim serisi $I(0)$ 'da ve bağımsız değişkenler fiyat, sanayi üretim endeksi ile yenilenebilir enerji kurulu gücü serilerinin tümü $I(1)$ 'de durağan bulunmuştur. Tablo 3'te durağanlık testinin sonuçları yer almaktadır.

Tablo 3. Durağanlık Testi Sonuçları

Değişken	ADF		Philips Perron	
	Sabit	Sabit ve Trend	Sabit	Sabit ve Trend
$I(0)$				
DGAZ	-4,293 (0,0017)***	-5,173 (0,0009)***	-4,293 (0,0017)***	-5,100 (0,0011)***
REEL_FİYAT	0,593 (0,9876)	0,433 (0,9986)	0,1214 (0,9631)	0,6404 (0,9993)
SUE	-0,083 (0,9437)	-2,866 (0,1849)	0,2399 (0,9715)	-2,6474 (0,2631)
YENERJİ	1,958 (0,9997)	-1,507 (0,805)	1,4490 (0,9988)	-0,7328 (0,9626)
$I(1)$				
DGAZ	-5,297 (0,0001)***	-5,314 (0,006)***	-5,929 (0,0000)***	-6,4628 (0,0000)***

Tablo 3-devamı

REEL_FİYAT	-4,348 (0,0015)***	-4,840 (0,0022)***	-4,3626 (0,0015)***	-4,7810 (0,0026)***
SUE	-5,863 (0,0000)***	-5,769 (0,0002)***	-6,6964 (0,0000)***	-6,5585 (0,0000)***
YENERJİ	-2,186 (0,2148)	-3,320 (0,0810)*	-2,8061 (0,0677)*	-3,2080 (0,0994)*

Not: * ve *** sırasıyla %10 ve %1 anlamlılık düzeylerini göstermektedir.

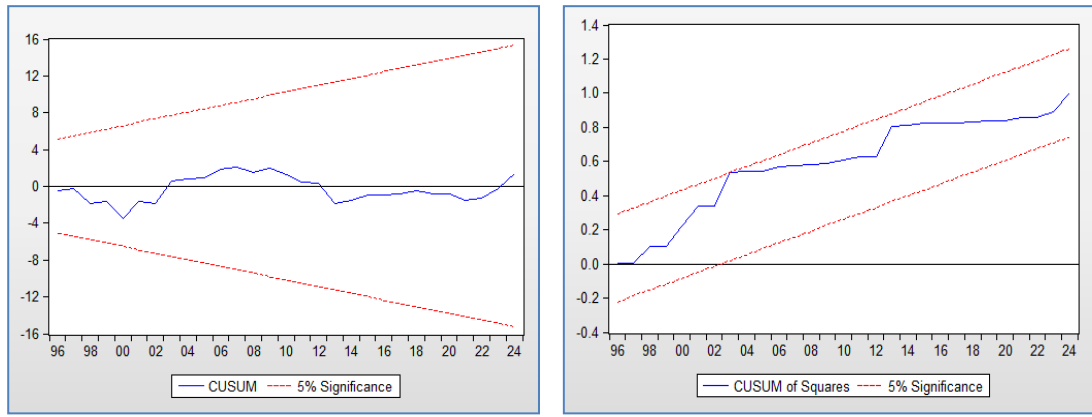
Bağımlı değişken doğalgaz tüketim serisi ve bağımsız değişkenler fiyat, sanayi üretim endeksi ve yenilenebilir enerji kurulu gücü serileri baz alınarak ARDL modeli tahmin edilmiştir. Schwarz bilgi kriterine (SIC) göre en uygun gecikme kombinasyonu ARDL(1,1,1,0) olarak belirlenmiştir. Tablo 4, modelin tahmin sonuçlarını göstermektedir. Modelde R^2 (0,97) oldukça yüksek olup, Durbin–Watson istatistiği (2,25) otokorelasyon sorunu bulunmadığını göstermektedir.

Tablo 4. ARDL Modeline İlişkin Sonuçlar

Tanısal Testler	İstatistik Değeri	p-Olasılık Değeri
R^2	0,9782	
F-İstatistiği	217,0050	0,000000***
DW	2,2573	
JB Normallik Testi	3,073	0,2150**
Breusch-Godfrey LM Testi	0,7096	0,5007**
Breusch-Pagan- Godfrey Heteroskedastisite Testi	0,4300	0,8528**

Not: ** ve *** sırasıyla %5 ve %1 anlamlılık düzeylerini göstermektedir.

Analizin devamında tanısal testlere geçilmiştir. Sırasıyla otokorelasyon, değişen varyans, normallik testi ve CUSUM-CUSUMSQ testleri yapılmıştır. Tablo 4'te tanısal testlere ilişkin çıktılar da yer almaktadır. LM testi sonuçlarına bakıldığında, p-değeri 0.05'ten büyük olduğu için hata terimlerinde otokorelasyon yoktur. Breusch-Pagan-Godfrey testi sonuçlarına göre p-değeri 0.05'ten büyük olduğu için hata terimlerinde değişen varyans sorunu olmadığı görülmektedir. Normallik testi sonuçlarına göre p-değeri 0.05'ten büyük olduğu için hata terimleri normal dağılmaktadır.



Şekil 11. CUSUM ve CUSUMSQ Parametre Testleri

Modelin katsayı kararlılığı CUSUM ve CUSUMSQ testleri ile incelenmiştir. Şekil 11’de yer alan grafiklerde de görüleceği üzere, mavi çizginin %5 anlamlılık sınırları içerisinde kalması, katsayıların dönem boyunca istikrarlı olduğunu göstermektedir.

Değişkenler arasında uzun dönemli ilişkiyi test etmek amacıyla eşbütünleşme testi yapılmıştır. Tablo 5’te ARDL Sınır Testi Sonuçları yer almaktadır. F istatistiği (10,67065) hem %5 hem de %1 düzeyinde üst sınır değerlerinden (I1) daha büyük olduğu için uzun dönemli eşbütünleşme vardır. Yani modeldeki değişkenler sanayi doğalgaz tüketimi, sanayi üretimi, reel doğalgaz fiyatı, yenilenebilir enerji kurulu gücü arasında uzun dönem denge ilişkisi tespit edilmiştir. Bu durum ekonometrik olarak ARDL modelinin geçerli olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Eşbütünleşme Sınır Testi Sonuçları

Test İstatistiği	Değer	k
F-istatistiği	10,67065	3
Kritik Sınır Değerleri		
Anlamlılık düzeyi	Alt Sınır – I0	Üst Sınır – I1
%10	1,75	4,13
%5	2,20	4,96
%2,5	2,66	5,86
%1	3,29	7,00

Daha sonra kısa dönem ve uzun dönem katsayılarını belirlemek üzere “Cointegration and Long Run Form” değerlerine bakılmıştır. Sonuçlar Tablo 6’da yer almaktadır. Hata düzeltme terimi katsayısı (CointEq) $-0,382$ olup istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Bu sonuç, sistemin uzun dönem

dengesinden sapması durumunda, sapmanın yaklaşık %38'inin bir sonraki dönemde giderildiğini ve modelin uzun dönem dengesine uyum sağladığını göstermektedir.

Tablo 6. Kısa ve Uzun Dönem Katsayıları

Kısa Dönem Katsayıları				
Değişken	Katsayı	Std. Sapma	t-istatistiği	p-olasılık
REEL FİYAT	0,157516	0,080777	1,949995	0,0609*
SUE	1,711988	0,355909	4,810186	0,0000***
YENERJİ	-0,128691	0,337503	-0,381303	0,7058
CointEq(-1)	-0,382571	0,050828	-7,526845	0,0000***
Uzun Dönem Katsayıları				
Değişken	Katsayı	Std. Sapma	t-istatistiği	p-olasılık
REEL FİYAT	-0,078377	0,179834	-0,435827	0,6662
SUE	1,762142	0,628787	2,802445	0,0089***
YENERJİ	-0,298614	0,463951	-0,643634	0,5249
C	4,755133	2,553337	1,862321	0,0727*

Not: * ve *** sırasıyla %10 ve %1 anlamlılık düzeylerini göstermektedir.

Kısa dönem katsayılarının olasılık değerleri incelendiğinde, doğalgaz fiyatı ve sanayi üretim endeksi katsayılarının istatistiksel olarak anlamlı olduğu, buna karşılık yenilenebilir enerji kurulu gücü değişkeninin kısa dönemde anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Elde edilen katsayılar, sanayi üretim endeksindeki %1'lik artışın doğalgaz tüketimini yaklaşık %1,71 oranında artırdığını göstermektedir. Bu bulgu, sanayi üretiminde meydana gelen kısa vadeli genişlemelerin enerji talebini doğrudan etkilediğini, üretim artışlarının doğalgaz tüketiminde anında bir karşılık bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Doğalgaz fiyatındaki %1'lik artışın doğalgaz tüketimini yaklaşık %0,15 oranında artırması, ilk bakışta klasik talep teorisine ters bir durum gibi görünse de sanayi sektörü açısından önemli bir yapısal özelliğe işaret etmektedir. Bu sonuç, sanayi üretiminde doğalgazın zorunlu bir girdi olduğunu ve fiyat değişimlerine karşı duyarlılığın düşük (inelastik) olduğunu göstermektedir. Sanayi tesislerinin çoğunda doğalgaz, üretim süreçlerinde yüksek ısı elde etmek için kullanılan temel enerji kaynağı olduğundan, fiyat artışları kısa vadede tüketim miktarını azaltmamaktadır.

Öte yandan, yenilenebilir enerji kurulu gücü değişkeninin kısa dönemde istatistiksel olarak anlamsız çıkması, Türkiye'de yenilenebilir enerji kapasitesindeki artışların sanayi doğalgaz tüketimi üzerinde henüz belirgin bir ikame etkisi

yaratmadığını göstermektedir. Bu durum, yenilenebilir kaynakların sanayi üretim süreçlerinde doğalgazın yerini alabilecek ölçüde yaygınlaşmadığını ve doğalgazın sanayi sektöründe baskın rolünü koruduğunu göstermektedir.

Uzun dönem katsayılarının olasılık değerlerine bakıldığında, yalnızca sanayi üretim endeksi katsayısının istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Bu bulgu, sanayi üretimindeki %1’lik artışın uzun vadede doğalgaz talebini %1,76 artırdığını, dolayısıyla üretim hacmindeki genişlemelerin enerji tüketimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, reel doğalgaz fiyatı ve yenilenebilir enerji kurulu gücü değişkenlerinin uzun dönemde istatistiksel olarak anlamsız bulunması, Türkiye’de sanayi sektörünün doğalgaza olan yüksek bağımlılığını ve fiyat değişimlerine karşı duyarlılığın sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, doğalgazın sanayi üretiminde zorunlu bir girdi olduğunu da göstermektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kapasitesindeki artışın uzun dönemde doğalgaz talebini anlamlı biçimde azaltmaması, mevcut yenilenebilir kaynakların sanayi süreçlerinde doğalgazı ikame etmediğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında gelir göstergesi olarak GSYH yerine sanayi üretim endeksi değişkeni kullanılmıştır. Sanayi üretim endeksi, GSYH’nin önemli bir bileşeni olup ekonomik büyümenin üretim boyutunu yansıtmaktadır. Dolayısıyla, literatürde GSYH değişkeni üzerinden elde edilen bulgularla bu çalışmada sanayi üretimi değişkenine ilişkin sonuçların karşılaştırılabilir nitelikte olduğu düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, doğalgaz talebi üzerinde sanayi üretimindeki artışın pozitif etkisi olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle tez çalışması doğalgaz talebi üzerinde GSYH artışının pozitif etkisi olduğunu ortaya koyan Erdoğan (2010), Bernstein ve Madlener (2011), Heidari vd. (2013), Khan (2015), Rajabi ve Mousavi (2019), Tatlı (2022) ve Pavlova vd. (2025) çalışmalarının sonuçlarıyla örtüşmektedir.

Öte yandan, bu tez çalışmasında doğalgaz fiyatına ilişkin pozitif esneklik katsayısı tespit edilmiştir. Bu durum, fiyat ile talep arasındaki ilişkinin yönü bakımından Erdoğan (2010), Bernstein ve Madlener (2011), Payne vd. (2011), Khan (2015), Rajabi ve Mousavi (2019) ve Tatlı (2022) tarafından ulaşılan bulgulardan farklılık göstermektedir; çünkü bu çalışmalarda doğalgaz fiyatının talep üzerindeki etkisi negatif bulunmuştur. Bununla birlikte, söz konusu araştırmalarda bu tez çalışmasıyla benzer biçimde doğalgaz talebinin fiyat esnekliği inelastik olarak

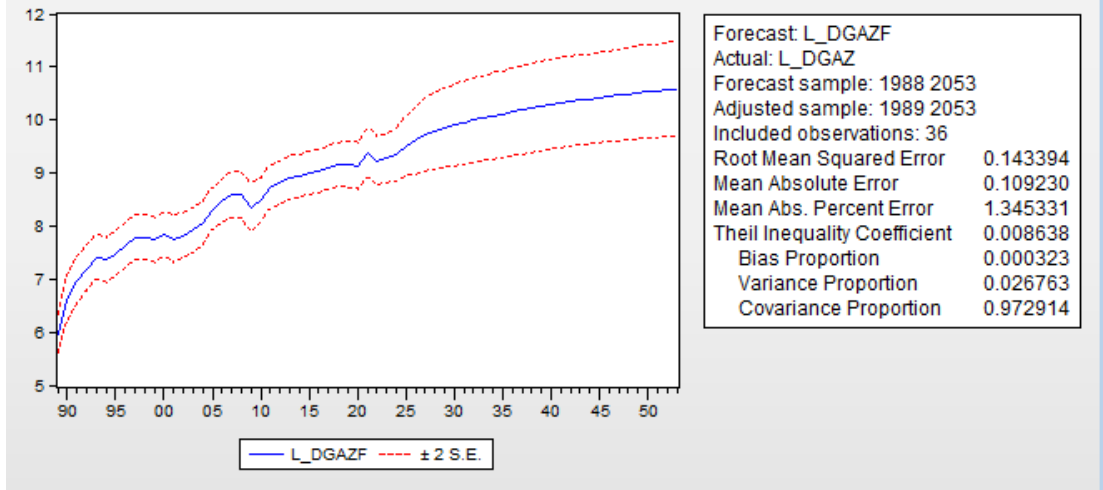
saptanmıştır; yani fiyat değişimlerine verilen tepkinin sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.2. 2053’e Yönelik Talep Projeksiyonu

Kısa ve uzun dönemli analizin ardından 2053 yılına yönelik tahminleme aşamasına geçilmiştir. Öncelikle, bağımsız değişkenler için 2053 yılına uzanan tahmin serileri oluşturulmuştur. Sanayi üretim endeksi için OECD’nin GSYH büyüme oranı tahminlerinden yararlanılmış (<http-13>); 2053 yılına kadar ortalama %2,7’lik yıllık büyüme oranı uygulanmıştır. Doğalgaz fiyatı için ise Rystad Energy’nin doğalgaz fiyatı projeksiyonları kullanılmıştır (Rystad Energy, 2025, s. 14). Bu rapora göre, Avrupa’da fiyatların 2035 yılına kadar yaklaşık 7,5 ABD doları/MMBtu seviyesinde sabitleneceği, 2035 sonrasında ise ortalama 9,5 ABD doları/MMBtu civarında istikrar kazanacağı öngörülmektedir. Bu değerler doğrultusunda, ilgili döneme lineer azalış ve artış uygulanarak doğalgaz fiyat tahmin serisi oluşturulmuştur.

Yenilenebilir enerji kurulu gücü tahmininde IEA’nın “Renewables 2025” raporundan yararlanılmıştır (IEA, 2025b). Rapora göre, 2025–2030 dönemi için küresel yenilenebilir enerji kapasite artışı tahminleri bir önceki yıla kıyasla yaklaşık %5 oranında aşağı yönlü revize edilmiştir. Bu revizyon, politika, regülasyon ve piyasa koşullarındaki belirsizliklerden kaynaklanmakla birlikte, küresel düzeyde yenilenebilir enerji büyümesinin güçlü seyrini koruduğunu göstermektedir. Türkiye’de ise son beş yılda yenilenebilir enerji kurulu gücü ortalama yıllık %10 oranında artmıştır. Küresel revizyon eğilimi dikkate alınarak bu çalışmada, 2025–2053 dönemi için yenilenebilir enerji kurulu gücü artışı yıllık %5 olarak öngörülmüştür.

Elde edilen tahmin serileri ARDL modeli kullanılarak doğalgaz talep projeksiyonu için kullanılmıştır. Tahmin sonuçları Şekil 12’de yer almaktadır.



Şekil 12. 2053 Yılına İlişkin Tahmin Sonuçları

ARDL modeli kullanılarak elde edilen tahmin sonuçları, sanayi sektörünün doğalgaz talebinin 2053 yılına kadar artış eğilimini koruyacağını göstermektedir. Modelin tahmin performansına ilişkin istatistikler incelendiğinde, Root Mean Squared Error değerinin 0.143, Mean Absolute Error değerinin 0.109 ve Theil Inequality Coefficient değerinin 0.008 olması, modelin yüksek doğrulukta tahmin ürettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Bias Proportion (0.0003) ve Variance Proportion (0.026) değerlerinin oldukça düşük olması, tahminlerde yanlılık olmadığını göstermektedir.

Grafikte mavi çizgi, logaritmik doğalgaz talebinin model tarafından tahmin edilen değerlerini; kırmızı kesikli çizgiler ise %95 güven aralığını göstermektedir. Tahmin sonuçlarına göre, doğalgaz talebi 2025 yılı sonrasında artış trendini sürdürmekte ve 2050'li yıllarda daha ılımlı bir eğilimle denge seviyesine yaklaşmaktadır. Güven aralığının tahmin dönemi boyunca görece dar kalması, modelin tahmin belirsizliğinin düşük olduğunu ve parametrelerin istikrarlı tahminler sunduğunu göstermektedir.

Tablo 7. 2053 Yılına Kadar Uzanan Sanayi Doğalgaz Tüketim Tahminleri

Yıl	Sanayi Doğalgaz Tüketim Miktarı (Bin TEP)	Yıl	Sanayi Doğalgaz Tüketim Miktarı (Bin TEP)
2025	13.477,09	2041	30.068,45
2026	15.091,85	2042	30.937,69
2027	16.538,19	2043	31.842,05
2028	17.792,10	2044	32.694,13
2029	18.908,05	2045	33.567,33
2030	19.924,93	2046	34.425,59
2031	20.895,66	2047	35.222,14
2032	21.831,76	2048	36.055,74
2033	22.746,54	2049	36.841,10
2034	23.653,32	2050	37.557,89
2035	24.524,28	2051	38.245,84
2036	25.562,91	2052	38.941,74
2037	26.504,95	2053	39.560,77
2038	27.432,18		
2039	28.314,58		
2040	29.218,06		

Model tahminleri logaritmik değerler üzerinden elde edildiğinden, sonuçların yorumlanabilirliğini artırmak amacıyla tahmin edilen değerler logaritmadan üstel dönüşümle gerçek değerlere dönüştürülmüştür. Böylece sanayi doğalgaz talebinin seviyeye dayalı (bin TEP cinsinden) projeksiyonu elde edilmiştir ve Tablo 7’de yer verilmiştir. Dönüştürülen bu seriler, 2053 yılına kadar uzanan doğalgaz talep tahminlerinin hidrojenle ikamesi analizinde temel veri olarak kullanılmıştır.

4.3. Yeşil Hidrojenle İkame ve Emisyon Azaltımı Hesabı

Sanayi sektörünün enerji dönüşüm sürecinde yeşil hidrojenin doğalgazın ikamesi yoluyla kullanımı emisyon azaltımı ve enerji arz güvenliği açısından stratejik fırsatlar sunmaktadır.

Sanayi sektöründe özellikle de demir-çelik, kimya, çimento ve cam gibi emisyon azaltımının zor olduğu sektörlerde kullanılan endüstriyel fırınlarında yüksek ısı ihtiyacı vardır ve bu ihtiyaç genellikle yakıt olarak doğalgazın kullanılmasıyla karşılanmaktadır (Franco ve Rocca, 2024, s. 520). Hidrojenin, tam elektrifikasyonun mümkün olmadığı ve yüksek termal enerjiyi kullanan bu sektörlerde, doğalgazın

yerine kullanılarak ya da doğalgazla karıştırılarak yeşil enerjiye geçiş için önemli bir görev üstleneceği değerlendirilmektedir.

Hidrojenin farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesi için gerekli altyapının geliştirilmesi önemli bir zorluk olarak görülmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, özel sektör ve yerel ile ulusal düzeydeki kamu otoriteleri, hidrojenden faydalanırken yeni bir özel altyapı kurmanın ekonomik yükünü azaltmak amacıyla, hidrojeni mevcut doğalgaz boru hatlarına karıştırma (blending) seçeneğini değerlendirmektedir (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2022, s. 1). Her iki yakıt da gaz formunda olduğundan boru hatları, brülör sistemleri, kazanlar ve fırınlar gibi mevcut doğalgaz altyapısıyla hidrojen teknik olarak uyumlu olmaktadır (Franco ve Rocca, 2024, s. 520). Kömür ve petrol, katı ve sıvı formda olduğu için hidrojenin bu fosil yakıtların yerine kullanılması ciddi altyapı dönüşümü gerektirmektedir.

Literatürde, hidrojenin doğalgazla karıştırılmış formda veya doğrudan ikame olarak kullanımını inceleyen çok sayıda çalışma [(Field ve Derwent, 2021), (Neacsu vd., 2022), (Ozturk vd., 2023), (Wallat vd., 2024), (Mirshokraee vd., 2025)] bulunmaktadır. Bu çalışmalar, hidrojenin mevcut altyapı üzerinden güvenli bir şekilde taşınabileceğini ve belirli karışım oranlarına kadar (genellikle %25'e kadar) (Franco ve Rocca, 2024, s. 536) endüstriyel süreçlerde yakıt olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Doğalgaza hidrojen karıştırmaya yönelik çalışmalar ve girişimlere, son yıllarda daha yoğun bir şekilde odaklanılmıştır. Doğalgaza hidrojen enjekte etmek, enerji sistemlerinde hidrojenin varlığını artırmanın pratik bir yolu olarak görülmektedir (Ozturk vd., 2023, s. 2).

Uluslararası literatür ve politika belgeleri, yeşil hidrojenin enerji dönüşümündeki rolünü büyük ölçüde doğalgazın kısmi veya tam ikamesi üzerinden tanımlamaktadır. Avrupa Birliği'nin "Renewable and Low-Carbon Hydrogen: State of Play and Outlook" başlıklı raporunda, doğalgaza hidrojen eklenmesinin veya doğalgazın tamamen hidrojenle ikame edilmesinin teorik olarak mümkün olduğu belirtilmiş; ayrıca çelik, kimya ve rafineri sektörleri bu bağlamda potansiyel hidrojen kullanıcıları olarak tanımlanmıştır (EU, 2025, s. 4). Benzer biçimde IEA tarafından hidrojenin küresel termal enerji talebinin yaklaşık %35'ini karşılayan doğalgazla karıştırılabileceği veya doğalgazın bir kısmının yerine kullanılabileceği; ayrıca %5–20 oranlarındaki bu tür karışımlarda, büyük altyapı değişiklikleri gerektirmeden

mevcut doğalgaz altyapısından yararlanılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir (IEA, 2021, s. 88). IRENA’ya göre günümüzde endüstriyel süreçlerde örneğin çelik üretiminde enerji kaynağı olarak doğalgazdan yararlanıldığı ancak gelecekte bu süreçlerde doğrudan hidrojenin kullanıldığı, saf hidrojen temelli üretimlere geçileceği ifade edilmiştir (IRENA, 2022, s. 32). Türkiye Hidrojen Teknolojisi Stratejisi ve Yol Haritası’nda küresel yaklaşımlar ile uyumlu şekilde, hidrojenin doğalgazla kısmen ikame edilmesi örneğin doğalgaz şebekesine %20’ye kadar karıştırılması veya sanayide doğrudan yakıt olarak kullanılması öngörülmektedir (ETKB, 2023, s. 12).

SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi’nin “Türkiye’nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi” raporunda da vurgulandığı üzere, hidrojenin enerji sistemine entegrasyonu; çelik, çimento, rafineri ve petrokimya gibi enerji yoğun sanayi alanlarında karbon emisyonlarını azaltmada etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu raporda, hidrojenin ikamesine ilişkin olarak %5 ve %10’luk ikame oranları öngörülmektedir (SHURA, 2021, s. 65). Bu oranlar dikkate alınarak, bu tez çalışmasında 2030 yılına kadar %5; 2030 sonrasında ise %10 ikame senaryosu esas alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Tablo 8. %5 ve %10 Yeşil Hidrojen İkamesi Senaryosu

Dönem	Sanayi Sektörü Toplam Doğalgaz Tüketimi (Bin TEP)	Yeşil Hidrojen İkamesi ile Sağlanabilecek Doğalgaz Tasarrufu (Bin TEP)
2030’a kadar	101.732,24	%5 İkame: 5.086,61
2030-2053 arası	706.644,82	%10 İkame: 70.664,48

Tablo 8’de görüldüğü üzere, 2030 yılına kadar sanayi sektörünün kümülatif doğalgaz tüketimi yaklaşık 101,7 milyon TEP düzeyindedir. Bu dönemde yeşil hidrojenin doğalgazın %5’ini ikame etmesi durumunda yaklaşık 5,1 milyon TEP tutarında doğalgaz tasarrufu sağlanabilecektir. 2030–2053 döneminde ise toplam doğalgaz tüketiminin yaklaşık 706 milyon TEP’e ulaşması beklenmektedir. Bu dönemde hidrojenin %10 oranında doğalgazı ikame etmesi hâlinde yaklaşık 70,6 milyon TEP düzeyinde doğalgaz tasarrufu elde edilmesi öngörülmektedir.

Hesaplanan doğalgaz tüketim miktarlarının yeşil hidrojen ile ikame edilmesi durumunda karbon salımı gerçekleşmeyeceği ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarında önemli bir azalma sağlanacağı öngörülmektedir. Doğalgazın yanması sonucu ortaya çıkan emisyonlar, 2,15 kg CO₂/Nm³ emisyon faktörü temel alınarak hesaplanmıştır (Mirshokraee vd., 2025). Bu çalışmada doğalgaz verileri ton eşdeğeri petrol (TEP) cinsinden değerlendirildiğinden, TEP–normal metreküp dönüşüm katsayısı 1 TEP = 1.163 Nm³ doğalgaz olarak kabul edilmiştir (BP, 2021, s. 2).

Bu varsayımlar altında, 1 TEP doğalgazın yaklaşık 2,5 ton CO₂ salınımına karşılık geldiği hesaplanmıştır.

Tablo 9. CO₂ Azaltımı Öngörülleri

Dönem	Yeşil Hidrojen İkamesi ile Sağlanabilecek Doğalgaz Tasarrufu (Bin TEP)	CO₂ Azaltımı
2030’a kadar	%5 İkame: 5.086,61	12,7 Milyon Ton
2030-2053 arası	%10 İkame: 70.664,48	176,6 Milyon Ton

Bu temel üzerinden yapılan hesaplamalar, yeşil hidrojenin doğalgazın kısmi ikamesi yoluyla sanayi sektöründe sağlayabileceği emisyon azaltım potansiyelini niceliksel olarak Tablo 9’da ortaya koymaktadır. Sanayi sektöründe yeşil hidrojenin %5 oranında ikame edilmesi durumunda 2030’a kadar yaklaşık 12,7 milyon ton CO₂, 2030–2053 döneminde %10 ikame senaryosunda ise yaklaşık 176,6 milyon ton CO₂ düzeyinde emisyon azaltımı sağlanabileceği hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla da genel olarak uyumludur. Field ve Derwent (2021), Birleşik Krallık’ta konut sektöründe doğalgazın yeşil hidrojenle ikame edilmesiyle yılda 76 milyon ton CO₂ eşdeğeri emisyonun önüne geçilebileceğini ortaya koymuşlardır. Neacsu vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, doğalgazın %10’unun hidrojenle ikame edilmesi durumunda CO₂ emisyonlarının %5 oranında azaldığı; hidrojen oranının %50’ye çıkarılması halinde ise bu azalmanın %30’a kadar yükselebileceği tespit edilmiştir. Bu durum kullanılan hidrojenin yeşil hidrojen olması durumunda emisyon azaltım oranının ikame oranına yaklaşık olarak denk düşeceğini göstermektedir. Ozturk vd. (2023), doğalgaz-hidrojen karışımlarında hidrojen oranı yükseldikçe CO₂ emisyonunda azalma olduğunu ve hacimce %30 hidrojen karışımı senaryosunda küresel ısınma

potansiyelinin 6.233'ten 6.123 kg CO₂eşdeğer/kg karışım düzeyine düşeceğini tespit etmişlerdir. Zeng vd. (2023), gaz türbinlerine %15 ve %30 oranlarında hidrojen karıştırılmasıyla yıllık bazda sırasıyla yaklaşık 11.000 ton ve 28.400 ton CO₂ emisyonunun önlenebileceğini hesaplamışlardır. Mirshokraee vd. (2025), doğalgaz-hidrojen karışımlarında hidrojen kullanımının artmasıyla CO₂ emisyonlarında kayda değer bir azalma sağlanmakta olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu tez çalışmasının bulguları, Türkiye'de yeşil hidrojenin yalnızca enerji dönüşümünde değil, aynı zamanda Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasında kritik bir politika aracı olabileceğini ortaya koymaktadır. 2030 yılına kadar %5'lik kısmi ikame bile yaklaşık 12,7 milyon ton CO₂ azaltımı sağlayarak karbon yoğun üretim süreçlerinde dikkate değer bir fark yaratma potansiyeline sahiptir. Bu düzeydeki bir tasarruf, Türkiye'nin Ulusal Katkı Beyanında (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023, s. 2) öngörülen toplam 695 milyon ton CO₂ azaltımına önemli bir katkı sağlayabilecek niteliktedir. Bu da politika yapıcılar açısından yeşil hidrojen yatırımlarının ve altyapı planlamalarının önceliklendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, tez çalışmasında yürütülen literatür taraması ve ampirik analizler kapsamında elde edilen sonuçlara yer verilmektedir. Ayrıca bu sonuçlara dayalı olarak Türkiye’de yeşil hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi amacıyla birtakım politika önerileri sunulmaktadır.

5.1. Sonuçlar

Sanayi devriminin başlangıcından günümüze kadar hızla artan enerji tüketimi ve sanayileşme süreci, iklim değişikliğinin etkilerinin giderek daha fazla hissedilmesini beraberinde getirmektedir. Çevresel bozulmanın temel nedenlerinden biri, fosil yakıtların küresel ölçekte yaygın ve artan düzeyde kullanımı sonucunda oluşan karbon emisyonlarıdır. Karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir bir enerji ekosistemine geçilmesi amacıyla küresel hedefler ortaya konulmuş olup bu hedeflere ulaşmaya yönelik adımlar atılmakta ve politikalar geliştirilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları söz konusu dönüşüm açısından önemli bir araç olmakla birlikte kesikli üretim yapıları, depolama sorunları ve elektrifikasyonu zor olan sektörlerde fosil yakıtlar yerine ikame edilememeleri sebebiyle birtakım güçlüklerle karşı karşıyadır.

Bu sebeple hidrojen, sürdürülebilir enerji dönüşümde bir alternatif olarak son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Hidrojenin nihai kullanımında karbon emisyonu ve atık oluşmaması stratejik açıdan en önemli avantajlarından. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla üretilen “yeşil hidrojenin” karbonsuz bir geleceğe geçişte ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol üstlenmesi beklenmektedir.

Türkiye’nin 2053 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşması yolunda yeşil hidrojenin nasıl bir rol üstlenebileceğini ortaya koymak önem arz etmektedir. Türkiye’nin enerji dönüşümünde yeşil hidrojenin sağlayabileceği net katkıları belirlemek bu tez çalışmasının temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu kapsamda, bu çalışmada yeşil hidrojen kullanımıyla enerji dönüşümünde öncelikli sektörlerden

biri olarak kabul edilen sanayi sektörüne odaklanılarak, Türkiye sanayi sektörünün 1988–2024 dönemine ilişkin verileri doğrultusunda doğalgaz talebinin belirleyicileri analiz edilmiştir. Ayrıca 2053 yılına yönelik doğalgaz talep projeksiyonu oluşturulmuş ve doğalgazın yeşil hidrojenle ikamesi sonucunda ortaya çıkabilecek doğalgaz tüketimi ve emisyon tasarrufları tahmin edilmiştir.

Analiz kapsamında sanayi sektöründe doğalgaz tüketimi bağımlı değişken olarak belirlenmiş; doğalgaz fiyatı, sanayi üretim endeksi ve yenilenebilir enerji kurulu gücü bağımsız değişkenler olarak modele dâhil edilmiştir. Değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönem ilişkilerin ortaya konulabilmesi amacıyla ARDL sınır testi yaklaşımı uygulanmış ve eşbütünleşme ilişkisi sınanmıştır. Elde edilen en uygun model olan ARDL (1,1,1,0) sonuçlarına göre, değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkisi olduğu tespit edilmiştir.

Ampirik bulgular, kısa dönemde doğalgaz fiyatı ve sanayi üretim endeksinin, sanayi doğalgaz tüketimi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Buna göre, sanayi üretim endeksindeki %1’lik bir artış, doğalgaz tüketimini %1,71 artırmakta iken; doğalgaz fiyatındaki %1’lik bir artış doğalgaz tüketimini %0,15 oranında artırmaktadır. Kısa vadede fiyat artmasına rağmen doğalgaz tüketiminin de artıyor olması doğalgazın sanayi sektörü açısından zorunlu bir girdi olduğunu doğrulamaktadır. Yenilenebilir enerji kurulu gücünün ise kısa dönemde doğalgaz tüketimi üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir.

Uzun dönemde ise bağımsız değişkenlerden yalnızca sanayi üretim endeksinin sanayi doğalgaz talebi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etki yarattığı, sanayi üretim endeksindeki %1’lik bir artışın doğalgaz talebini %1,76 artırdığı tespit edilmiştir. Doğalgaz fiyatı ve yenilenebilir enerji kurulu gücünün sanayi doğalgaz tüketimi üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığı ortaya konulmuştur. Bu bulgu, üretim hacmindeki genişlemenin, enerji tüketimini artırma noktasında temel belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Analizin devamında, ARDL modeli kullanılarak oluşturulan projeksiyonlara göre, önümüzdeki 30 yıllık süreçte sanayi sektörünün doğalgaz talebinin artış trendini sürdüreceği ve 2053 yılında yaklaşık 40 milyon TEP doğalgaz tüketimi oluşacağı tahmin edilmiştir. Bu çerçevede tez kapsamında iki farklı ikame senaryosu değerlendirilmiştir. İlk olarak, Türkiye sanayi sektöründe 2030 yılına kadar doğalgazın %5 oranında yeşil hidrojenle ikame edilmesi durumunda 5,1 milyon TEP

doğalgaz tasarrufu sağlanacağı hesaplanmıştır. İkinci senaryoda ise, 2030-2053 yılları arasında yeşil hidrojen ekosisteminin gelişimiyle birlikte ikame oranının %10'a çıkması durumunda 70,6 Milyon TEP doğalgaz tasarrufunun mümkün olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu tasarruflara karşılık gelen emisyon azaltımları hesaplandığında, 2030 yılına kadar yaklaşık 12,7 milyon ton, 2030–2053 döneminde ise 176,6 milyon ton CO₂ salınımının önlenebileceği tahmin edilmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışması, Türkiye'de sanayi sektöründe yeşil hidrojen kullanımının potansiyel katkılarını nicel olarak ortaya koyan bir çerçeve sunmaktadır. Ampirik bulgular, yeşil hidrojenin sanayi sektöründe doğalgaz ikamesi yoluyla net sıfır hedeflerine ulaşmada stratejik bir araç olabileceğini göstermektedir.

5.2. Öneriler

İklim değişikliğinin etkilerinin küresel ölçekte giderek daha belirgin hale gelmesiyle birlikte, birçok ülkede çevresel düzenlemelerin bağlayıcılığı ve kapsamı artmakta; karbon emisyonlarını sınırlandırmaya yönelik politika araçları daha sıkı bir yapıya kavuşmaktadır. Çevresel sıklık düzeyinin yükselmesi, düşük karbonlu teknolojilerin rekabet gücünün güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Türkiye açısından değerlendirildiğinde; karbon fiyatlaması mekanizmalarının sınırlı olması, fosil yakıt kullanımına yönelik desteklerin devam etmesi ve maliyet minimizasyonu önceliği gibi hususlar, yeşil hidrojen benzeri düşük karbonlu ancak maliyetli teknolojilerin piyasa koşulları altında rekabet gücünü sınırlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu durum, çevresel sıklığın düşük olduğu bir politika ortamında yeşil hidrojenin yaygınlaşmasının, piyasa dinamikleriyle değil, hedefli kamu müdahaleleri ve bütüncül politika setleri aracılığıyla mümkün olabileceğine işaret etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen ampirik bulgular, yeşil hidrojenin yaygın şekilde benimsenmesi ve enerji sisteminde daha fazla yer bulmasının, sera gazı emisyonlarını azaltma ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine ulaşma açısından somut fırsatlar sunabileceğini doğrulamaktadır. Bu nedenle, Türkiye'de yeşil hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi, 2053 net sıfır emisyon yolunda uygulamaya konulacak kritik ve önemli politika araçlarından biri olarak değerlendirilebilir. Ancak yeşil hidrojenin uygulamadaki bazı güçlüklerinin ortadan kaldırılması ya da en azından

minimize edilmesi için birtakım politika gereksinimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunları aşağıda yer alan alt başlıklardaki gibi gruplandırmak mümkündür:

Yeşil hidrojen maliyetlerinin düşürülmesi: Tüm dünya genelinde en çok kullanılan hidrojen türü olan ve doğalgazdan üretilen gri hidrojen maliyeti ile yeşil hidrojen maliyeti arasındaki fark, yeşil hidrojenin yaygın kullanımının önündeki en temel engeldir. Yeşil hidrojen üretim ve tüketiminin artırılması için gri hidrojen ve yeşil hidrojen arasındaki fiyat farkının kapatılması ve yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yeşil hidrojenin üretiminin girdileri olan yeşil elektriğin ve elektrolizör maliyetlerinin düşürülmesine yönelik politikalar geliştirilmesi önem arz etmekte olup yeşil hidrojene özel teşvik ve sübvansiyonlar oluşturulmalıdır.

Yatırımcı firmaların tesis, makine ve altyapı gibi sabit sermaye harcamaları ile işletme giderlerinin finanse edilmesi, yeşil hidrojen yatırım ortamının geliştirilmesine katkı sağlayarak; elektrolizör kurulu gücünü ve yeşil hidrojen üretim hacmini artırma potansiyeline sahiptir. Bunun yanında kamu alımlarında öncelik ya da uzun dönemli alım garantileri gibi uygulamaların da yeşil hidrojen üretim kapasitesinin gelişmesine katkı sağlayabileceği öngörülmektedir. Arz tarafını destekleyen bu gibi teşviklerle yeşil hidrojenin birim maliyeti düşürülerek, talep tarafının yaratılmasına ve piyasa mekanizmasının oluşmasına katkı sağlanabilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ve buna bağlı olarak yeşil elektrik maliyetinin düşürülmesine yönelik politikalar da yeşil hidrojen girdi fiyatlarında avantaj sağlayacağı için maliyetleri düşürücü etkiler yaratması beklenmektedir.

Elektrolizör teknolojisinde yerli üretim kapasitesinin geliştirilmesi: Elektrolizör temininde dışa bağımlılığın azaltılması ve yerli üretimin teşvik edilmesi, Türkiye’de iç pazarda yeşil hidrojen ekosisteminin gelişmesine katkı sağlayarak; yurt dışına ihracat potansiyeli doğurabilir. Bu alanda ar-ge çalışmalarının yürütülmesi ve desteklenmesi ile üniversite-sanayi iş birliğinin geliştirilmesi, yeşil hidrojen üretiminde ihtiyaç duyulan makine-ekipmanların yerlileşmesi adına önem arz etmektedir.

Yeşil hidrojene yönelik altyapı unsurlarının geliştirilmesi: Yeşil hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi açısından yeşil hidrojen üretiminin artırılmasının yanı sıra yeşil hidrojenin depolanması ve taşınmasına yönelik altyapının da geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yeşil hidrojenin katı, sıvı ve gaz formunda depolanması

ve taşınmasına yönelik destekleyici politikalar hayata geçirilmelidir. Doğalgaz hatlarına yeşil hidrojen karıştırılması, yalnızca hidrojen taşıyabilen boru hatlarının fizibilitesinin yapılması, depolama ve taşımaya yönelik standardizasyon ve sertifikasyon süreçlerinin geliştirilmesi altyapı geliştirilmesine yönelik atılabilecek stratejik adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Yeşil hidrojen türevlerinde üretim kapasitesinin geliştirilmesi: Türkiye yeşil hidrojenin yanı sıra yeşil amonyak ve yeşil metanol gibi katma değerli ürünlerin üretimi ve ihracatı açısından da potansiyellere sahiptir. Bu doğrultuda yeşil hidrojen türevlerinin üretimi ve kullanımının teşvik edilmesi, sanayi ve ulaşım sektörlerinde kullanımının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

Bölgesel kümelenmelerin yaygınlaştırılması: Yeşil hidrojenin ekosisteminin üretim, depolama, dağıtım ve kullanım gibi tüm unsurlarını bünyesinde barındıran hidrojen vadisi modellerinin yaygınlaştırılması, değer zinciri yaratarak sektörel entegrasyonu artırmaktadır. Bu kapsamda Türkiye’de hidrojen vadisi ve benzeri bölgesel kümelenmelerin yaygınlaşması ölçek ekonomisinin oluşmasına ve verimliliğin artırılmasına katkıda bulunabilecektir.

KAYNAKÇA

- Alzyadat, J.M. (2022). The price and income elasticity of demand for natural gas consumption in Saudi Arabia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12 (6), 357-363. doi:10.32479/ijeep.13597.
- Bernstein, R. and Medlener, R. (2011). Residential natural gas demand elasticities in OECD countries: An ARDL bounds testing approach. *Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) Working Paper*, 15, 1-23.
- Beswick, R.R. Oliveira, M.A. and Yan, Y. (2021). Does the green hydrogen economy have a water problem? *ACS Energy Letters*, 6 (9), 3167-3169. doi: 10.1021/acsenenergylett.1c01375.
- Bhuiyan, M.H.Md. and Siddique, Z. (2025). Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 102, 1026-1044. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.01.033.
- BM. (1992). United Nations framework convention on climate change. https://unfccc.int/sites/default/files/convention_text_with_annexes_english_for_posting.pdf (Erişim tarihi: 10.11.2025).
- BM. (1997). Kyoto protocol. https://treaties.un.org/doc/Treaties/1998/09/19980921%2004-41%20PM/Ch_XXVII_07_ap.pdf (Erişim tarihi: 10.11.2025).
- Boettcher, W.S. (2024). Introduction to green hydrogen. *Chemical Reviews* 2024, 124 (23), 13095-13098. doi:10.1021/acs.chemrev.4c00787.
- BP. (2021). Statistical review of world energy – approximate conversion factors. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-approximate-conversion-factors.pdf> (Erişim tarihi: 13.09.2025).
- Braga, H. Gouvea, R. and Gutierrez, M. (2024). The green hydrogen economy and the global net zero agenda: A green powershoring & green watershoring perspective. *Modern Economy*, 15, 23-48.
- Catoire, L. (2021). Hydrogen, the future of combustion. <https://www.polytechnique-insights.com/en/braincamps/energy/sustainable-hydrogen-still-a-long-way-to-go/hydrogen-the-future-of-combustion/> (Erişim tarihi: 09.12.2025).
- Concas, G. Cocco, G. Lecis, L. ve Petrollese, M. (2022). Life cycle analysis of a hydrogen valley with multiple end-users. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385 (012035), 1-12. doi:10.1088/1742-6596/2385/1/012035.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (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\(1\).pdf](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(1).pdf) (Erişim tarihi: 06.11.2025).
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). İklim değişikliği azaltım stratejisi ve eylem planı.

- [https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi%20Azalt%C4%B1m%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan%C4%B1%20\(2024-2030\).pdf](https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi%20Azalt%C4%B1m%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan%C4%B1%20(2024-2030).pdf) (Erişim tarihi: 11.12.2025).
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). Paris anlaşması. <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34> (Erişim tarihi: 12.11.2025).
- Daiyan, R. MacGill, I. and Amal, R. (2020). Opportunities and challenges for renewable power-to-x. *ACS Energy Letters*, 5 (12), 3843-3847. doi:10.1021/acsenergylett.0c02249.
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: A crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 157-175. doi:10.1016/S1364-0321(99)00011-8.
- Eike, L. and De Blasio, N. (2022). Green hydrogen value chains in the industrial sector — Geopolitical and market implications. *Energy Research & Social Science*, 93, 102847. doi:10.1016/j.erss.2022.102847.
- Elegbeleye, I. Oguntona, O. and Elegbeleye, F. (2025). Green hydrogen: pathway to net zero green house gas emission and global climate change mitigation. *Hydrogen* 2025, 6, 29.
- EPDK. (2024). Doğalgaz piyasası yıllık sektör raporu listesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-94/dogal-gazyillik-sektor-raporu> (Erişim tarihi: 18.08.2025).
- Erdoğan, E. (2010). Natural gas demand in Turkey. *Applied Energy*, 87, 211-219. doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.006.
- Erias, A.F. and Iglesias, E.M. (2022). Price and income elasticity of natural gas demand in Europe and the effects of lockdowns due to Covid-19. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100945. doi:10.1016/j.esr.2022.100945.
- 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 (Erişim tarihi: 30.12.2025).
- 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 (Erişim tarihi: 12.10.2025).
- ETKB. (2024) Enerji denge tabloları. <https://enerji.gov.tr/preview/tr/63d0007a-f593-458b-9610-353eb2545897> (Erişim tarihi: 06.08.2025).
- EU. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301> (Erişim tarihi: 03.12.2025).
- EU. (2023). Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng> (Erişim tarihi: 11.11.2025).
- EU. (2025). Renewable and low-carbon hydrogen - state of play and outlook. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/767227/EPRS_BRI\(2025\)767227_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/767227/EPRS_BRI(2025)767227_EN.pdf) (Erişim tarihi: 13.01.2026).

- European Comission Joint Research Centre. (2025). GHG emissions of all world countries. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025#data_download (Erişim tarihi: 10.11.2025).
- EUROSTAT. (2023). Gas prices components for household consumers. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_202_c/default/table?lang=en (Erişim tarihi: 18.08.2025).
- Field, R.A. and Derwent, R.G. (2021). Global warming consequences of replacing natural gas with hydrogen in the domestic energy sectors of future low-carbon economies in the United Kingdom and the United States of America. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 30190-30203. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.06.120.
- Foye, O.F. and Benjamin, O.O. (2021). Natural gas consumption and economic performance in selected sub-Saharan African countries: A heterogeneous panel ARDL analysis. *African Development Review*, 33, 518-532. doi:10.1111/1467-8268.12591.
- Franco, A. and Giovannini, C. (2023a). Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: Critical analysis and perspectives. *Sustainability*, 15, 16917. doi:10.3390/su152416917.
- Franco, A. and Giovannini, C. (2023b). Routes for hydrogen introduction in the industrial hard-to-abate sectors for promoting energy transition. *Energies*, 16, 6098. doi:10.3390/en16166098.
- Franco, A. and Rocca, M. (2024). Industrial decarbonization through blended combustion of natural gas and hydrogen. *Hydrogen* 2024, 5, 519-539. doi:10.3390/hydrogen5030029.
- Ghenai, C. and Betteyab, M. (2017). Optimized design and control of an off grid solar PV/hydrogen fuel cell power system for green buildings. *Earth and Environmental Science*, 93, 1-11. doi:10.1088/1755-1315/93/1/012073.
- Glanville, P. Fridlyand, A. Sutherland, B. Liszka, M. Zhao, Y. Bingham, L. and Jorgensen, K. (2022). Impact of hydrogen/natural gas blends on partially premixed combustion equipment: NO_x emission and operational performance. *Energies*, 15, 1706. doi:10.3390/en15051706.
- Golstov, V.A. Veziroglu, T.N. and Golstova, L.F. (2006). Hydrogen civilization of the future - a new conception of the IAHE. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 153-159. doi:10.1016/j.ijhydene.2005.04.045.
- Gritz, A. and Wolff, G.B. (2024). CBAM, Hydrogen partnerships and Egypt's industry: Potential for synergies. *Intereconomics*, 59 (2), 92-97. doi:10.2478/ie-2024-0020.
- Guillotin, A. Bergaentzle, C. Dussartre, V. Heggarty, T. Massol, O and Perez, M. (2025). Hydrogen subsidies under three pillar-frameworks: A Europe-United States multi-stakeholder comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211, 115284. doi:10.1016/j.rser.2024.115284.
- Güven, D. and Kayalica, M.O. (2025). Spatial variability of green hydrogen in Türkiye: Environmental and economic perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 136, 533-545. doi:10.1016/j.rser.2024.115284.

- Habib, M.A. Abdulrahman, G. Alquaity, A. Qasem, N. (2024). Hydrogen combustion, production, and applications: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 100, 182-207. doi:10.1016/j.aej.2024.05.030.
- Hamukoshi, S.S. Mama, N. Shimanda, P.P. and Shafudah, N.H. (2022). An overview of the socio-economic impacts of the green hydrogen value chain in Southern Africa. *Journal Energy in Southern Africa*, 33 (3), 12-21. doi:10.17159/2413-3051/2022/v33i3a12543.
- Hassan, Q. Algburi, S. Sameen, A.Z. Salman, H.M. and Jaszczur, M. (2024). Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 310-333. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.08.321.
- Hausmann, J.N. Schlögl, R. Menezes, P.W. and Driess, M. (2021). Is direct seawater splitting economically meaningful? *Energy & Environmental Science*, 14, 3679. doi:10.1039/d0ee03659e.
- Heidari, H. Katircioglu, S.T. and Saeidpour, L. (2013). Natural gas consumption and economic growth: Are we ready to natural gas price liberalization in Iran? *Energy Policy*, 63, 638-645. doi:10.1016/j.enpol.2013.09.001.
- Hidrojen Teknolojileri Derneği. (2021). Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritası. https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf (Erişim tarihi: 13.11.2025).
- Hydrogen Council. (2024). Hydrogen insights 2024. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2024/09/Hydrogen-Insights-2024.pdf> (Erişim tarihi: 13.11.2025).
- Hydrogen Europe. (2025). Clean hydrogen monitor 2025. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2025/09/Clean_Hydrogen_Monitor_09-2025_DIGITAL.pdf (Erişim tarihi: 09.12.2025).
- IEA. (2019a). The role of gas in today's energy transitions. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc35f20f-7a94-44dc-a750-41c117517e93/TheRoleofGas.pdf> (Erişim tarihi: 11.11.2025).
- IEA. (2019b). The future of hydrogen. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (Erişim tarihi: 11.12.2025).
- IEA. (2021). Global hydrogen review 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf> (Erişim tarihi: 20.10.2025).
- IEA. (2023a). Global hydrogen review 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf> (Erişim tarihi: 17.11.2025).
- IEA. (2023b). What are the main sources of global CO₂ emissions? <https://www.iea.org/world/emissions#what-are-the-main-sources-of-global-co2-emissions> (Erişim tarihi: 21.12.2025).
- IEA. (2025a). Global hydrogen review 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a6c466dd-b6f0-44bd-a60a-6940eccfb1c3/GlobalHydrogenReview2025.pdf> (Erişim tarihi: 17.11.2025).

- IEA. (2025b). Renewables 2025. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/76ad6eac-2aa6-4c55-9a55-b8dc0dba9f9e/Renewables2025.pdf> (Erişim tarihi: 03.09.2025).
- IIEEC. (2023). Türkiye yeşil hidrojen geleceği. https://iieec.sabanciuniv.edu/sites/iieec.sabanciuniv.edu/files/inline-files/Hidrojen%20Kitap%20%20bask%C4%B1_web_KORUMALI_0.PDF (Erişim Tarihi: 17.05.2024).
- Incer-Valverde, J. Korayem, A. Tsatsaronis, G. and Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, 291, 117294. doi:10.1016/j.enconman.2023.117294.
- IPCC. (2018). Summary for policy makers. In: global warming of 1.5°C. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf (Erişim tarihi: 09.11.2025).
- IRENA. (2020). Green hydrogen a guide to policy making. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf (Erişim Tarihi: 08.12.2025).
- IRENA. (2022). Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf (Erişim tarihi: 05.11.2025).
- IRENA. (2024). International co-operation to accelerate green hydrogen deployment. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Apr/IRENA_CF_Green_hydrogen_deployment_2024.pdf (Erişim tarihi: 10.12.2025).
- IRENA. (2025). Renewable capacity statistics 2025. <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025> (Erişim tarihi: 14.11.2025).
- Johnston, B. Mayo, M.C. and Khare, A. (2005). Hydrogen: the energy source for the 21st century. *Technovation*, 25, 569-585. doi:10.1016/j.technovation.2003.11.005.
- Kahraman, N. ve Akansu, S.O. İten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak hidrojen kullanılması. *Mühendis ve Makina*, 48 (569), 9-15.
- Karakaya, E. Nuur, C. and Assbring, L. (2018). Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: Towards a hydrogen-based future? *Journal of Cleaner Production*, 195, 651-663. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.142.
- Kazi, M.K. Eljack, F. El-Halwagi, M.M. and Haouari, M. (2021). Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on hydrogen economy in Qatar. *Computers and Chemical Engineering*, 145, 107144. doi:10.1016/j.compchemeng.2020.107144.
- Khan, M.A. (2015). Modelling and forecasting the demand for natural gas in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1145-1159. doi:10.1016/j.rser.2015.04.154.
- Koşar, C. (2021). Hidrojen depolama yöntemleri. *Open Journal Of Nano*, 6 (1), 1-10.

- Kothari, R. Buddhi, D. and Sawhney, R.L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 553-563. doi:10.1016/j.rser.2006.07.012.
- Kusoglu, A. (2022). (Re)defining clean hydrogen: From colors to emissions. *The Electrochemical Society Interface*, 31, 47-51. doi:10.1149/2.F08224IF
- Le, H.T.H. Quang, N.N. Sanserverino, E.R. Hoai, N.N. Cong, T.L. Quyet, T.D. and Tu, Q.T.T. (2025). Green hydrogen: A pathway to Vietnam's energy security. *Applied Sciences*, 15, 10981. doi:10.3390/app152010981.
- Leicher, J. Nowakowski, T. Giese, A. and Görner, K. (2017). Power-to-gas and the consequences: Impact of higher hydrogen concentrations in natural gas on industrial combustion processes. *Energy Procedia*, 120, 96-103. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.157.
- Liu, J. Rigola, J. Schillaci, E. Ruano, J. and Perez-Segarra, C. Numerical investigation of methane-air jet flame with hydrogen addition in industrial kiln burners. *Journal of Physics: Conference Series*, 2766, 012087. doi:10.1088/1742-6596/2766/1/012087.
- Manoharan, Y. Hosseini, S.E. Butler, B. Alzahrani, H. Senior, B.T.F. Ashuri, T. and Krohn, J. (2019). Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect. *Applied Science*, 9 (2296), 1-17. doi:10.3390/app9112296.
- Masri, B. (2023). The transition from fossil energy to renewable energy: difficulties and opportunities. <https://kenyaclimatedirectory.org/resources/673cc2831022f> (Erişim tarihi: 11.11.2025).
- Mayrhofer, M. Koller, M. Seeman, P. Prieler, R. and Hochenauer, C. (2021). Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 21672-21686. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.03.228.
- Melikoğlu, M. (2013). Vision 2023: Forecasting Turkey's natural gas demand between 2013 and 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 393-400. doi:10.1016/j.rser.2013.01.048.
- Mielich, T. Dobler, R. Hollnagel, J. Akca, O. and Kirchenbauer, J.M. (2025). Europe's way from natural gas to green hydrogen: Modeling and simulation of the transforming European gas transport infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 135, 156-171. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.04.408.
- Mirshokraee, S.A. Bedogni, S. Bindi, M. and Santoro, C. (2025). Substituting natural gas with hydrogen for thermal application in a hard-to-abate industry: A real case study. *Hydrogen*, 6, 37. doi:10.3390/hydrogen6020037.
- Mneimneh, F. Ghazzawi, H. Hejjeh, M.A. Manganelli, M. and Ramakrishna, S. (2023). Roadmap to achieving sustainable development via green hydrogen. *Energies*, 16, 1368. doi:10.3390/en16031368.
- Momirlan, M. and Veziroglu, T.N. (2005). The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 795-802. doi:10.1016/j.ijhydene.2004.10.011.

- Narayan, P.K. (2004). *Reformulating Critical Values for the Bounds F-statistics Approach to Cointegration: An application to the Tourism Demand Model for Fiji*. Monash University: Avustralya.
- Neacsu, A. Eparu, C.N. and Stoica, D.B. (2022). Hydrogen–natural gas blending in distribution systems - an energy, economic, and environmental assessment. *Energies*, 15, 6143. doi:10.3390/en15176143.
- Nikolaidis, P. and Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. doi:10.1016/j.rser.2016.09.044.
- NREL. (2022). Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: review of the state of technology. <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf> (Erişim tarihi: 21.10.2025).
- OECD. (2000). Natural gas information. https://www.oecd.org/en/publications/natural-gas-information_16834267.html (Erişim tarihi: 22.10.2025).
- Oliveira, A. Beswick, R. and Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33 (100701), 1-7. doi:10.1016/j.coche.2021.100701.
- Ozturk, M. Sorgulu, F. Javani, N. and Dincer, İ. (2023). An experimental study on the environmental impact of hydrogen and natural gas blend burning. *Chemosphere*, 329, 138671. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.138671.
- Pavlova, O. Pavlov, K. Liashenko, O. Jamroz, A. and Kopec, S. (2025). Gas in transition: An ARDL analysis of economic and fuel drivers in the European Union. *Energies*, 18, 3876. doi:10.3390/en18143876.
- Payne, J.E. Loomis, D. and Wilson, R. (2011). Residential Natural gas demand in Illinois: Evidence from the ARDL bounds testing approaches. *The Journal of Regional Analysis & Policy*, 41 (2), 138-147. doi:10.22004/ag.econ.133345.
- Penner, S.S. (2006). Steps toward the hydrogen economy. *Energy*, 31, 33-43. doi:10.1016/j.energy.2004.04.060.
- Pesaran, M.H. and Shin, Y. (1997). An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis. *Econometrics and Economic Theory in the 20st Century: The Ragnar Frisch Centennial Symposium*, 31.
- Pesaran, M.H. Shin, Y. and Smith, R. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16, 289-326. doi:10.1002/jae.616.
- Province of Zuid Holland. (2020). Hydrogen vision and strategy. <https://www.zuid-holland.nl/publish/pages/25450/hydrogenvisionandstrategyprovinciezuid-hollandapril2020englishversion.pdf>
- Rajabi, M.M. and Mousavi, M. (2019). Estimating industrial natural gas demand elasticities in selected OECD countries. *Energy Economics Letters*, 6 (1), 52-65. doi:10.18488/journal.82.2019.61.52.65.
- Ramachandran, R. and Menon, R.K. (1998). An overview of industrial uses of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23 (7), 593-598. doi:10.1016/S0360-3199(97)00112-2.

- Rasul, M.G. Hazrat, M.A. Sattar, M.A. Jahirul, M.I. and Shearer, M.J. (2022). The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Conversion and Management*, 272 (116326), 4-29. doi:10.1016/j.enconman.2022.116326.
- Romero, A.V. Sanchez, M.C, Cisternas, C. Ardura, F.S. Rodriguez, I. Aledo, A. Boso, A. Prades, J. and Alvarez, B. (2023). Green hydrogen and social sciences: Issues, problems, and future challenges. *Sustainability*, 15, 303. doi:10.3390/su15010303.
- Rystad Energy. (2025). Forecasting future gas prices. <https://www.rystadenergy.com/insights/whitepaper-forecasting-future-gas-prices> (Erişim tarihi: 03.09.2025).
- Sadik-Zada, E.R. (2021). Political economy of green hydrogen rollout: A global perspective. *Sustainability*, 13, 13464. doi:10.3390/su132313464.
- Scita, R. Raimondi, P.P. and Noussan, M. (2020). Green hydrogen: The holy grail of decarbonisation? An analysis of the technical and geopolitical implications of the future hydrogen economy. *Fondazione Eni Enrico Mattei Future Energy Program*, 305824, 9-15. doi:10.2139/ssrn.3709789.
- Shahbaz, M. Arouri, M. and Teulon, F. (2014). Short and long-run relationships between natural gas consumption and economic growth: Evidence from Pakistan. *Economic Modelling*, 41, 219-226. doi:10.1016/j.econmod.2014.05.019.
- SHURA. (2021). Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi. https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2022/01/rapor_TR-.pdf (Erişim Tarihi: 12.10.2025).
- Sorrenti, I. Rasmussen, T.B.H. You, S. and Wu, Q. (2022). The role of power-to-X in hybrid renewable energy systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112380. doi:10.1016/j.rser.2022.112380.
- Spasowska, H.M. (2023). The European Hydrogen Bank as an element of support for the EU hydrogen strategy. *Wroclaw Review of Law, Administration & Economics*, 13 (1), 1-12. doi:10.2478/wrlae-2023-0006.
- Svanberg, M. Ellis, J. Lundgren, J. and Landalv, I. (2018). Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1217-1228. doi:10.1016/j.rser.2018.06.058.
- Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 86-94. doi:10.1016/j.rser.2019.01.051.
- Tatlı, H. ve Lebe, F. (2017). Türkiye'de doğalgaz tüketimi, sermaye ve istihdamın ekonomik büyümeyle ilişkisi: Eşbütünleşme ve nedensellik analizi. *Dokuz Eylöl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Faköltesi Dergisi*, 32 (1), 1-28. doi:10.24988/deuiibf.2017321536.
- Tatlı, H. (2022). Long-term price and income elasticity of residential natural gas demand in Turkey. *Theoretical and Applied Economics*, 29 (1), 101-122.
- TEİAŞ. (2024). Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre yıllar itibariyle gelişimi. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (Erişim tarihi: 10.09.2025).

- Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi. (2023). Enerji krizinin çözümünde yeşil hidrojen devrimi III: Türkiye’de yeşil hidrojen araştırmaları ve politikaları. <https://thinktech.stm.com.tr/tr/enerji-krizinin-cozumunde-yesil-hidrojen-devrimi-iii-turkiyede-yesil-hidrojen-arastirmalari-ve-politikalari> (Erişim tarihi: 12.11.2025).
- Tunçbilek, Ö.F. (2024). Hidrojen enerjisi ve çevresel etkileri üzerine değerlendirmeler. *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15 (2), 189-197.
- Tutar, F. ve Eren M. (2011). Geleceğin enerjisi: Hidrojen ekonomisi ve Türkiye. *International Journal of Economic and Administrative Studies*, 3 (6), 6-9.
- TÜİK. (2020). Elektrik ve doğalgaz fiyatları haber bülteni. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Elektrik-ve-Dogal-Gaz-Fiyatlari-I.Donem:-Ocak-Haziran,-2020-33647%20> (Erişim tarihi: 18.08.2025).
- TÜİK. (2024). Sanayi üretim endeksi tarihsel seriler. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sanayi-Uretim-Endeksi-Temmuz-2025-57923> (Erişim tarihi: 10.09.2025).
- Ueckerdt, F. Verpoort, P. C. Anantharaman, R. Bauer, C. Beck, F. Longden, T and Roussanaly, S. (2024). On the cost competitiveness of blue and green hydrogen. *Joule*, 8, 104-128. doi:10.1016/j.joule.2023.12.004.
- Umutlu, H. ve Bayraç, H.N. (2020). Türkiye’de doğalgaz tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişki: Granger nedensellik analizi. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 20 (40), 217-226. doi:10.30976/susead.738737.
- Ural, T. Karaca, G. (2016). Hidrojen ekonomisi. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3 (2), 145-154.
- US Department Of Energy. (2020). Hydrogen program plan. <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf?Status=Master> (Erişim tarihi: 02.12.2025).
- Wallat, S. Adler, W. Rimpel E. and Giese, R. (2024). Using hydrogen to decarbonize the brick and tile industry. *ISEC 2024 – 3rd International Sustainable Energy Conference*’da sunulan bildiri. <https://www.tib-op.org/ojs/index.php/isec/article/view/1155> (Erişim tarihi: 19.10.2025).
- Widera, B. (2020). Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 16, 100460. doi:10.1016/j.tsep.2019.100460.
- Wei, M. McMillan, C.A. and de la Rue du Can, Stephane. (2019). Electrification of industry: Potential, challenges and outlook. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6 (4), 140-148. doi:10.1007/s40518-019-00136-1.
- World Bank. (2023). <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (Erişim tarihi: 21.12.2025).
- Xie, Z. Jin, Q. Su, G. and Lu, W. (2024). A review of hydrogen storage and transportation: Progresses and challenges. *Energies*, 17, 4070. doi:10.3390/en17164070.

- Yap, J. and McLellan, B. (2023). A historical analysis of hydrogen economy research, development, and expectations, 1972 to 2020. *Environments*, 10, 11. doi:10.3390/environments10010011.
- Zeng, G. Xu, Z. Zhang, Z. and Bai, H. (2023). Natural gas-hydrogen hybrid combustion retrofit method and practice for F-class heavy-duty combustion engines. *Engineering Research Express*, 5, 030561. doi:10.1088/2631-8695/acf5cb.
- Zhang, C. Shao, Y. Shen, W. Li, H. Nan, Z. Dong, M. Bian, J and Cao, X. (2023). Key technologies of pure hydrogen and hydrogen-mixed natural gas pipeline transportation. *ACS Omega*, 8, 19212-19222. doi:10.1021/acsomega.3c01131.
- Zhou, H. Xue, J. Gao, H. and Ma, N. (2024). Hydrogen-fueled gas turbines in future energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, 569-582. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.03.327.
- http-1:** https://www.ab.gov.tr/avrupa-yesil-mutabakati_53729.html (Erişim tarihi: 11.11.2025).
- http-2:** <https://hydrogencouncil.com/en/founding-story/> (Erişim tarihi: 19.11.2025).
- http-3:** <https://hydrogeneurope.eu/> (Erişim tarihi: 18.11.2025).
- http-4:** <https://sdgs.un.org/> (Erişim tarihi: 24.11.2025).
- http-5:** <https://h2v.eu/> (Erişim tarihi: 20.11.2025).
- http-6:** https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en#investing-in-hydrogen (Erişim tarihi: 10.12.2025).
- http-7:** <https://www.limakcimento.com/haber/airliquide-x-limak-cimento-hidrojen-denemesi> (Erişim tarihi: 20.12.2025).
- http-8:** <https://www.tupras.com.tr/tr/stratejik-donusum?activesection=sustainable-refining> (Erişim tarihi: 20.12.2025).
- http-9:** <https://www.tekfen.com.tr/tekfen-ve-enerjisa-uretimden-yesil-enerjide-is-birligi-6-115> (Erişim tarihi: 20.12.2025).
- http-10:** <https://www.akfen.com.tr/haberler/akfen-yenilenebilir-enerji-operasyon-direktoru-eren-yigit-yesil-hidrojen-yakin-gelecekte-turkiyenin-enerji-bagimsizligina-katki-saglayacak/> (Erişim tarihi: 20.12.2025).
- http-11:** <https://h2der.org/> (Erişim tarihi: 20.12.2025).
- http-12:** <https://www.gmka.gov.tr/hidrojen-ekonomisi> (Erişim tarihi: 11.12.2025).
- http-13:** <https://www.oecd.org/en/data/indicators/real-gdp-long-term-forecast.html?utm> (Erişim tarihi: 02.09.2025).