T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

İKTİSADİ GELİŞME VE ULUSLARARASI İKTİSAT

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GELİŞMEKTE OLAN ÜLKELERDE YEŞİL HİDROJEN POTANSİYELİ: EVRİMSEL EKONOMİK COĞRAFYA YAKLAŞIMI

Eda Nur EROĞLU

2501223620

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Emine TAHSİN

İSTANBUL – 2026

ÖZ

GELİŞMEKTE OLAN ÜLKELERDE YEŞİL HİDROJEN POTANSİYELİ: EVRİMSEL EKONOMİK COĞRAFYA YAKLAŞIMI

EDA NUR EROGLU

Bu çalışma, küresel sürdürülebilir enerji dönüşümünde stratejik bir platform teknolojisi olarak öne çıkan yeşil hidrojenin, gelişmekte olan ülkelerde endüstriyel yol yaratma potansiyelini Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) teorik çerçevesi içinde analiz etmektedir. Çalışma, yeşil hidrojenin yalnızca bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda fosil yakıt temelli karbon kilitlenmesini aşarak yeni endüstriyel yörüngeler oluşturabilen dönüştürücü bir araç olduğu argümanını ileri sürmektedir.

Teorik çerçeve, EEG'nin üç temel kavramı üzerine inşa edilmiştir: yol bağımlılığı, yol yaratma ve birlikte evrim. Bu kavramlar, ülkelerin yeşil hidrojen alanındaki farklılaşan yörüngelerini açıklamak üzere iki temel hipoteze dönüştürülmüştür. Birinci hipotez, endüstriyel avantajın tekno-ekonomik kapasiteler ile kurumsal çevrenin birlikte evriminin bir fonksiyonu olduğunu; ikinci hipotez ise ülkelerin tek tip bir yakınsama yerine başlangıç koşullarına bağlı olarak ayrışan yollar izleyeceğini öngörmektedir.

Ampirik analiz, Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika, Mısır, Fas ve Türkiye'yi kapsayan amaçlı bir örneklem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Metodolojik olarak, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ile Ağırlıklı Toplam Modeli'ni (ATM) bütünleştiren hibrit bir Çok Kriterli Karar Verme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu çerçevede, altı tekno-ekonomik ve dört kurumsal göstergeden oluşan on kriterli özgün bir Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi (YHPE) geliştirilmiştir. 2019–2023 dönemini kapsayan boylamsal veri seti, IEA, IRENA ve Dünya Bankası gibi uluslararası kaynaklardan derlenmiştir.

Bulgular, her iki hipotezi de doğrulamaktadır. Birinci olarak, ülkeler tekno-ekonomik ve kurumsal kapasitelerinin göreli güçlülüğüne göre farklılaşmaktadır: Çin, güçlü tekno-ekonomik varlıkları ile koordineli kurumsal kapasitesinin eşzamanlı geliştiği bir yapı sergilemekte ve 2023 yılındaki 0,952'lik YHPE skoruyla açık ara lider konumundadır. Hindistan ve Brezilya, geniş yenilenebilir enerji tabanlarına rağmen

kurumsal sürtüşmelerin dönüşümü yavaşlattığı bir görünüm sunmaktadır. Fas, sınırlı mevcut kapasitesine rağmen yüksek politik istikrar ve düzenleyici kalitesiyle yatırım çekmektedir. Güney Afrika, Türkiye ve Mısır ise hem tekno-ekonomik hem kurumsal boyutlarda kısıtlarla karşılaşmaktadır.

İkinci olarak, zaman içi dinamikler üç farklı yörünge ortaya koymaktadır: Çin'in yüksek skorlarını istikrarlı biçimde koruduğu pozitif kilitlenme; Hindistan, Brezilya, Fas ve Mısır'ın artan skorlarla sergilediği yukarı dallanma; ve Rusya'nın 0,147'den 0,036'ya düşen skoruyla somutlaşan kurumsal çöküş. Rusya örneği, güçlü tekno-ekonomik varlıkların dahi kurumsal bozulma karşısında sürdürülebilir bir endüstriyel yola dönüşemeyeceğini gösteren kritik bir bulgu sunmaktadır.

Çalışma, yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkeler için yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda ekonomik ve jeopolitik bir fırsat olduğu sonucuna ulaşmaktadır. Dekarbonizasyonu zor sektörlerin (çelik, amonyak, ağır taşımacılık) karbonsuzlaştırılması, enerji güvenliğinin artırılması, istihdam yaratımı ve küresel değer zincirlerinde yukarı yönlü hareket, bu fırsatın temel boyutlarını oluşturmaktadır. Ancak bulgular, bu potansiyelin gerçekleşmesinin otomatik olmadığını; aksine ülkelerin başlangıç tekno-ekonomik donanımları, kurumsal kaliteleri ve stratejik politika tercihlerinin birlikte evrimine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çerçevede çalışma, gelişmekte olan ülkelerin yenilenebilir enerji altyapı yatırımlarını ölçeklendirmelerini, tutarlı ve öngörülebilir düzenleyici çerçeveler oluşturmalarını ve teknoloji transferi ile yerel kapasite geliştirmeyi bütünleştiren kapsayıcı sanayi politikaları tasarlamalarını önermektedir.

Anahtar kelimeler: Yeşil Hidrojen, Sürdürülebilir Enerji Dönüşümü, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), Yol (Patika) Bağımlılığı, Yol (Patika) Yaratma

ABSTRACT

GREEN HYDROGEN POTENTIAL IN DEVELOPING COUNTRIES: AN EVOLUTIONARY ECONOMIC GEOGRAPHY APPROACH

EDA NUR EROGLU

This study analyzes the potential of green hydrogen as a strategic platform technology in the global sustainable energy transition for creating new industrial pathways in developing countries, within the theoretical framework of Evolutionary Economic Geography (EEG). The study advances the argument that green hydrogen is not merely an energy carrier, but a transformative instrument capable of overcoming fossil fuel-based carbon lock-in and establishing new industrial trajectories.

The theoretical framework is constructed upon three fundamental concepts of EEG: path dependency, path creation, and co-evolution. These concepts are operationalized into two core hypotheses to explain the divergent trajectories of countries in the green hydrogen domain. The first hypothesis posits that industrial advantage emerges as a function of the co-evolution of techno-economic capacities and institutional environment. The second hypothesis predicts that countries will follow divergent pathways contingent upon their initial conditions, rather than converging toward a uniform trajectory.

The empirical analysis is conducted on a purposive sample comprising Brazil, Russia, India, China, South Africa, Egypt, Morocco, and Türkiye. Methodologically, a hybrid Multi-Criteria Decision Making (MCDM) approach integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the Weighted Sum Model (WSM) is employed. Within this framework, an original Green Hydrogen Industrial Advantage Index (GHIAA) composed of ten criteria, six techno-economic and four institutional indicators, is developed. The longitudinal dataset covering the 2019–2023 period is compiled from international sources including IEA, IRENA, and the World Bank.

The findings confirm both hypotheses. First, countries diverge into four distinct evolutionary profiles: China exhibits a structure where strong techno-economic assets develop simultaneously with coordinated institutional capacity, achieving a GHIAA score of 0.952 as the clear leader. India and Brazil display extensive renewable energy

bases constrained by institutional frictions. Morocco attracts investment through high political stability and regulatory quality despite limited existing capacity. South Africa, Türkiye, and Egypt face limitations in both techno-economic and institutional dimensions.

Second, temporal dynamics reveal three distinct trajectories: positive lock-in, where China maintains its high scores with stability; upward branching, exhibited by India, Brazil, Morocco, and Egypt through increasing scores; and institutional collapse, embodied by Russia's dramatic decline from 0.147 to 0.036. The Russian case presents a critical finding demonstrating that even robust techno-economic assets cannot be transformed into a sustainable industrial pathway in the face of institutional deterioration.

The study concludes that green hydrogen represents not only an environmental imperative but also an economic and geopolitical opportunity for developing countries. Decarbonization of hard-to-abate sectors (steel, ammonia, heavy transport), enhancement of energy security, job creation, and upward mobility in global value chains constitute the fundamental dimensions of this opportunity. However, the findings reveal that the realization of this potential is not automatic; rather, it depends on the co-evolution of countries' initial techno-economic endowments, institutional quality, and strategic policy choices. Within this framework, the study recommends that developing countries scale up renewable energy infrastructure investments, establish consistent and predictable regulatory frameworks, and design inclusive industrial policies that integrate technology transfer with local capacity building.

Keywords: Green Hydrogen, Sustainable Energy Transition, Evolutionary Economic Geography (EEG), Analytic Hierarchy Process (AHP), Path Dependency, Path Creation

ÖNSÖZ

İklim değişikliğinin küresel ölçekte yarattığı tehditler, 21. yüzyılın en acil sorunları arasında yer almaktadır. Paris Anlaşması doğrultusunda net sıfır emisyonlu bir geleceğe ulaşma hedefi, ülkeleri köklü bir enerji dönüşümüne zorlamaktadır. Bu dönüşüm sürecinde yeşil hidrojen, özellikle çelik, amonyak ve ağır taşımacılık gibi karbonsuzlaştırılması güç sektörlerde kritik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu teknolojinin sunduğu fırsatlar yalnızca gelişmiş ekonomilerle sınırlı değildir; yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin gelişmekte olan ülkeler için de önemli bir endüstriyel sıçrama ve kalkınma potansiyeli barındırmaktadır.

Bu çalışma, yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkelerde yalnızca bir enerji taşıyıcısı olarak değil, aynı zamanda fosil yakıtlara dayalı karbon kilitlenmesini aşarak yeni endüstriyel yollar yaratabilecek dönüştürücü bir araç olarak değerlendirilmesi gerektiği varsayımından hareket etmektedir. Evrimsel Ekonomik Coğrafya yaklaşımı çerçevesinde, ülkelerin başlangıç koşullarının, tekno-ekonomik kapasiteleri ve kurumsal çevreleri, yeşil hidrojen yörüngelerini nasıl şekillendirdiği analiz edilmiştir. Bu perspektif, neden bazı ülkelerin bu dönüşüm sürecinde hızla ilerlerken bazılarının daha sınırlı bir performans sergilediğini açıklamaya yönelik güçlü bir teorik temel sunmaktadır.

Yüksek lisans tezimin hazırlanması, benim için akademik olduğu kadar kişisel bir öğrenme ve gelişim süreci olmuştur. Bu süreçte değerli bilgi birikimi, akademik titizliği ve yol gösterici yaklaşımıyla bana her aşamada rehberlik eden danışman hocam Prof. Dr. Emine Tahsin'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Yapıcı eleştirileri ve desteği, yalnızca bu çalışmanın niteliğini artırmakla kalmamış, akademik bakış açımı da önemli ölçüde geliştirmiştir.

Bu zorlu yolculuk boyunca manevi desteğini her an hissettiren, motivasyonumu diri tutan ve varlığıyla kendimi her zaman şanslı hissetmemi sağlayan hayat arkadaşım Melih Can Elmastaş'a gönülden teşekkür ederim. Onun desteği ve anlayışı olmaksızın bu süreci tamamlamak çok daha güç olurdu.

Son olarak, bugünlere gelmemde emeği ve katkısı büyük olan annem Fatma Eroğlu'na minnettarım. Koşulsuz sevgisi ve desteği, tüm akademik ve kişisel başarılarımın temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın, gelişmekte olan ülkelerin sürdürülebilir enerji dönüşümündeki rolünü daha iyi anlamaya ve yeşil hidrojenin kalkınma stratejileri içindeki potansiyelini değerlendirmeye anlamlı bir katkı sunmasını temenni ederim.

EDA NUR EROĞLU

İSTANBUL, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZ ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iv**

ÖNSÖZ ..... **vi**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xi**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **xii**

KISALTMALAR LİSTESİ ..... **xiii**

GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM

YEŞİL HİDROJEN VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

1.1. Küresel Sürdürülebilir Enerji Dönüşümü 13

1.1.1. Zorluklar ve Fırsatlar 16

1.2. Yeşil Hidrojenin Küresel Sürdürülebilir Enerji Dönüşümündeki Rolü 17

1.2.1. Karbonsuzlaşması Zor Sektörler ve Hidrojen 22

1.2.2. Enerji Güvenliği ve Ekonomik Dayanıklılık 26

1.2.3. Ulaşım Sektörü ve Altyapı Dönüşümü 28

1.2.4. Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Yeşil Hidrojen ve Kalkınma Fırsatları 29

1.2.5. Politika ve Yatırım Çerçevesi 32

1.3. Yeşil Hidrojenin Geleceği 34

1.3.1. Maliyet Eğilimleri ve Ölçeklenme 34

1.3.2. Küresel Proje Gelişmeleri 36

1.3.3. Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Fırsatlar 37

1.3.4. Zorluklar ve Beklentiler 38

1.4. Seçilmiş Ülkelerin Mevcut Durumu 42

İKİNCİ BÖLÜM

YEŞİL HİDROJEN VE EVRİMSEL EKONOMİK COĞRAFYA

2.1. Evrimsel Ekonomik Coğrafya Yaklaşımı 47

2.1.1. Evrimsel Ekonomik Coğrafyanın Temel Çerçevesi 49

2.1.2. Endüstriyel Evrim Süreçleri 52

2.1.3. Yeni Endüstriler ve Yol Yaratma 55
2.1.4. Bölgesel Uzmanlık ve Kalkınma 58
2.1.4.1. İlişkili Çeşitlenme 59
2.1.4.2. Karmaşıklık ve Kalkınma 61
2.1.4.3. Kümelerin Rolü ve Sınırları 62
2.1.4.4. Yol Bağımlılığından Çıkış 63
2.1.4.5. Uzmanlığın Kalkınmaya Dönüşümü 64
2.2. Gelişmekte Olan Ülkelerde Yeşil Hidrojen Üretimi 64
2.2.1. Kaynak Ekonomisinden İnovasyona Geçiş 66
2.2.2. Kıyı Bölgelerinin Stratejik Önemi 67
2.2.3. Yerel Talep ve Endüstriyel Ekosistemler 69
2.2.4. Teknolojik Bağımlılık Riskleri 71
2.2.5. Politika Tasarımı ve Endüstriyel Coğrafya 72
2.3. Yeşil Hidrojenin Pazar Potansiyeli 73
2.3.1. Büyüme Beklentileri ve Maliyet Dinamikleri 73
2.3.2. Coğrafi Dağılım ve Gelişmekte Olan Ekonomiler 75
2.3.3. Mevcut Kapasitelerin Değerlendirilmesi 76
2.3.4. Maliyet Rekabetçiliğinin Sağlanması 78
2.3.5. Talep Belirsizliği ve Strateji 79
2.3.6. Altyapı ve Uluslararası İşbirliği 79
2.3.7. Farklılaşan Gelecek Senaryoları 80

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SEÇİLMİŞ ÜLKELERDE YEŞİL HİDROJEN POTANSİYELİ: AMPİRİK ANALİZ

3.1. Örneklem Seçimi 83
3.2. Yöntem 87
3.2.1. Araştırma Yönteminin Ayrıntılandırılması 89
3.2.2. Araştırma Tasarımı 91
3.2.3. Veri Seti 93
3.2.4. Değişkenler ve Kriterler 94
3.2.5. Veri Kaynakları 95
3.2.6. Analiz Yöntemi 96
3.2.6.1. Kriter Ağırlıklandırması 97

3.2.6.2. Veri Normalleştirme 100
3.2.6.3. Skor Hesaplama 101
3.2.6.4. Tutarlılık Kontrolü 103
3.2.7. Ülke Profilleri 104
3.3. Bulgular 108
3.4. Tartışma 113
3.4.1. Birlikte Evrim Hipotezinin Değerlendirilmesi 113
3.4.1.1. Güçlü Tekno-Ekonomik ve Kurumsal Yapı – Çin..... 113
3.4.1.2. Güçlü Tekno-Ekonomik, Sınırlı Kurumsal Yapı – Hindistan, Brezilya ve Rusya 113
3.4.1.3. Sınırlı Tekno-Ekonomik, Güçlü Kurumsal Yapı – Fas..... 114
3.4.1.4. Her İki Boyutta Kısıtlı Yapı – Güney Afrika, Türkiye ve Mısır 114
3.4.2. Yol Ayrışması Hipotezinin Değerlendirilmesi 115
SONUÇ 117
KAYNAKÇA 122
EKLER 136

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Küresel Endüstriyel CO_2 Emisyonları (1900-2023) 15
Şekil 2: Küresel Temiz Hidrojen Arzı Projeksiyonu (1,5°C Senaryosu)..... 19
Şekil 3: Elektrolizör Maliyet Eğilimleri 21
Şekil 4: Hidrojen Üretimine Ayrılan Yenilenebilir Kapasite (2021-2027) 24
Şekil 5: Çelik Sektörü CO_2 Emisyonları 26
Şekil 6: Hidrojenin Endüstriyel Karbonsuzlaşmadaki Rolü..... 28
Şekil 7: AB'de Yeşil Hidrojen İstihdam Potansiyeli (2030) 32
Şekil 8: Düşük Emisyonlu Hidrojen Üretim Projeksiyonu (2030)..... 34
Şekil 9: Yeşil Hidrojen Maliyet Projeksiyonları (2020-2030)..... 35
Şekil 10: Küresel Yeşil Hidrojen Üretim Tahminleri 36
Şekil 11: Duyurulan Elektrolizör Projeleri (2030) 37
Şekil 12: Sektörel Hidrojen Talebi 39
Şekil 13: Düşük Emisyonlu Hidrojen Talep Projeksiyonu..... 40
Şekil 14: Küresel Hidrojen Talep Senaryoları (2010-2050)..... 55
Şekil 15: Ulusal Hidrojen Stratejilerinin Gelişimi 60
Şekil 16: Ülkelere Göre Yeşil Hidrojen Üretim Projeksiyonu (2023-2030) 65
Şekil 17: Kıyıya Uzaklığa Göre Hidrojen Projeleri (2030)..... 67
Şekil 18: Duyurulan Projelere Göre Hidrojen Üretimi (2030)..... 69
Şekil 19: Sektör ve Bölgeye Göre Hidrojen Talebi (Net Sıfır Senaryosu)..... 70
Şekil 20: Bölgelere Göre Elektrolizör Kapasitesi (2020-2030) 72
Şekil 21: Yeşil Hidrojen Maliyet Düşüş Eğilimi 75
Şekil 22: Kümülatif Elektrolizör Üretim Kapasitesi 78
Şekil 23: Yeşil Hidrojen Pazar Projeksiyonu (2024-2035)..... 80
Şekil 24: Ülkelere Göre Yeşil Hidrojen Üretim Kapasitelerinin Payları..... 86
Şekil 25: Seçilmiş Ülkelerin Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (2023) 86
Şekil 26: Araştırma Tasarımı Akış Şeması 93
Şekil 27: Analiz Süreci 97
Şekil 28: YHPE Zamansal Yörüngeleri (2019-2023)..... 110
Şekil 29: Ülkelerin YHPE Yörüngeleri (2019-2023) 111

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1: Temiz Hidrojen Performans Göstergeleri (2030-2050 Senaryoları) 11
Tablo 2: Enerji Dönüşümünde Zorluklar ve Fırsatlar..... 17
Tablo 3: Seçilmiş Ülkelerin Enerji Dönüşüm Profilleri (2019-2023) 43
Tablo 4: EEG Kavramları ve Karşılık Gelen Göstergeler 88
Tablo 5: Endeks Kriterleri ve Veri Kaynakları 96
Tablo 6: Kriter Ağırlıkları..... 99
Tablo 7: Çin YHPE Hesaplama Örneği (2023) 102
Tablo 8: Ülkelerin Evrimsel Koşulları 107
Tablo 9: YHPE Sonuçları (2019-2023) 109

KISALTMALAR LİSTESİ

AB : Avrupa Birliği

ABD : Amerika Birleşik Devletleri

AHS : Analitik Hiyerarşi Süreci

ATM : Ağırlıklı Toplam Model

BRICS : Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika

CAPEX : Capital Expenditure (Sermaye Harcamaları)

CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism (Karbon Sınır Düzenleme Mekanizması)

CCS : Carbon Capture and Storage (Karbon Yakalama ve Depolama)

CO_2 : Karbondioksit

CO_2e : Karbondioksit Eşdeğeri

ÇKKV : Çok Kriterli Karar Verme

DRI : Direct Reduced Iron (Doğrudan İndirgenmiş Demir)

EEG : Evrimsel Ekonomik Coğrafya

GSYİH : Gayri Safi Yurtiçi Hasıla

GW : Gigawatt

GVC : Küresel Değer Zincirleri

H_2 : Hidrojen

H-DRI : Hydrogen-based Direct Reduced Iron (Hidrojen Bazlı Doğrudan Demir İndirgeme)

HBI : Hot Briquetted Iron (Sıcak Briketlenmiş Demir)

IEA : International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)

IDOS : German Institute of Development and Sustainability (Alman Kalkınma ve Sürdürülebilirlik Enstitüsü)

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)

IRENA : International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)

JETP : Just Energy Transition Partnerships (Adil Enerji Dönüşüm Ortaklıkları)

LCOH : Levelized Cost of Hydrogen (Düzleştirilmiş Hidrojen Maliyeti)

Mt : Megaton

MW : Megawatt

NDC : Nationally Determined Contributions (Ulusal Katkı Beyanları)

OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü)

PEM : Proton Exchange Membrane (Proton Değişim Membranı)

RE : Rastgele Endeks

SKA : Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları

TE : Tutarlılık Endeksi

TO : Tutarlılık Oranı

TWh : Terawatt-saat

UHS : Ulusal Hidrojen Stratejisi

UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)

UNIDO : United Nations Industrial Development Organization (Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü)

USD : United States Dollar (Amerikan Doları)

WGI : Worldwide Governance Indicators (Dünya Yönetişim Göstergeleri)

YE : Yenilenebilir Enerji

YH_2 : Yeşil Hidrojen

YHPE : Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi

YKG : Yerli Katkı Gereksinimleri

GİRİŞ

İklim değişikliğine ilişkin artan kaygılar, dünyayı sürdürülebilir enerji çözümleri aramaya yöneltmiştir. Sürdürülebilir enerji dönüşümü olarak adlandırılan bu süreç, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda üretim sistemlerini yüksek karbonlu modellerden düşük karbonlu modellere kaydırmayı amaçlayan bir ekonomik yeniden yapılanma sürecidir (OECD, 2015). Bu dönüşüm; sermayenin, teknolojinin ve işgücünün fosil yakıt endüstrilerinden yenilenebilir enerji temelli sektörlere yeniden dağıtımını yansıtmakta, böylece büyüme ve rekabet kalıplarını yeniden tanımlamaktadır. Paris Anlaşması'nda 2050 yılına kadar net sıfır emisyonlu bir gezegene ulaşma hedefinin kabul edilmesiyle bu dönüşüm ivme kazanmıştır (UNFCCC, 2015).

Bu çalışmada sürdürülebilir enerji dönüşümü, yeşil hidrojenin ortaya çıkışını ve gelişimini anlamak için gerekli olan daha geniş bir yapısal bağlam olarak ele alınmaktadır. Çalışma, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımı çerçevesinde, belirli ülkelerde yeşil hidrojen üretiminin mevcut endüstriyel kapasiteler, kurumsal düzenlemeler ve tarihsel olarak şekillenmiş üretim yollarıyla nasıl etkileşime girdiğine odaklanmaktadır.

Sürdürülebilir bir geleceğin aciliyeti, temiz enerji çözümlerinin geliştirilmesine ve düşük karbonlu teknolojilerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Bu çabalar yalnızca birçok enerji kaynağının keşfedilmesine ve geliştirilmesine değil, aynı zamanda yeni fırsat alanlarının açılmasına da katkı sağlamıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için bu fırsatlar, sürdürülebilirliği ekonomik kalkınmayla ilişkilendiren yeni bir endüstriyel inovasyon ve yatırım alanı oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, gelişmekte olan ülkelerin yeşil hidrojen ekonomisindeki konumu homojen değildir. Bazı ülkeler yüksek güneş ve rüzgâr potansiyeli, geniş arazi varlığı ve düşük yenilenebilir enerji maliyetleri sayesinde potansiyel üretici ve ihracatçı olarak öne çıkarken; diğerleri mevcut sanayi altyapıları, enerji yoğun sektörleri ve iç talep dinamikleri nedeniyle daha çok yerel kullanım ve sanayi entegrasyonuna odaklanmaktadır. Brezilya, Hindistan, Çin, Güney Afrika, Türkiye, Fas ve Mısır gibi ülkeler, bu iki eğilimin farklı bileşimlerini temsil eden örnekler sunmaktadır.

Net sıfır hedefine ulaşma yolunda temiz enerji kaynakları arasında hidrojen, yeşil bir gelecek için umut vadeden bir enerji çözümü olarak öne çıkmaktadır (IEA, 2021). Hidrojen, üretim sürecinde çok az veya hiç zararlı emisyon üretmemesiyle temiz bir enerji taşıyıcısıdır (IRENA, 2019).

Ancak ekonomik açıdan bakıldığında, hidrojenin asıl önemi, geleneksel elektrifikasyonun maliyet ve teknolojik sınırlamalarla karşı karşıya kaldığı çelik, ulaşım ve kimya gibi karbonsuzlaştırması zor sektörlerin karbonsuzlaştırma potansiyelinde yatmaktadır (IEA, 2019). Yeşil hidrojen, sıfır karbon üretimi özelliğiyle mavi veya gri hidrojenden ayrılmaktadır. Dolayısıyla yeşil hidrojen, küresel temiz enerji arayışının odak noktası haline gelmiştir. Aynı zamanda ülkelerin yeni düşük karbonlu değer zincirleri kurmasını mümkün kılarak sürdürülebilir endüstriyel rekabetçilik için bir araç işlevi görmektedir (IRENA, 2020).

Dünyanın sürdürülebilirliğe ulaşabilmesi için özellikle sektörel düzeyde karbonsuzlaşması gerekmektedir (IPCC, 2022). Bu amaçla pek çok önemli sektörün temiz enerji kaynağı olarak yeşil hidrojenle gelişimini çeşitli yollarla sürdürebilirliği sağlayacağı ve hızlandırabileceği öngörülmektedir. Yeşil hidrojen, üretim, ihracat ve teknolojik öğrenme alanlarında yeni karşılaştırmalı üstünlükler yaratarak sektörel dönüşüme katkıda bulunmaktadır; bu olgu aynı zamanda ekonomik büyümenin temel itici güçleri arasında yer almaktadır. Yeşil hidrojen üreticisi ülkelerde yerel katma değer yaratmak için yeni modeller geliştirilmesi yolu ile ekonomilerin gelişimi desteklenebilecektir. Özetle, yeşil hidrojenin benimsenmesinin çevresel faydaları açık olmakla birlikte, asıl hedef uzun vadeli sürdürülebilir endüstriyel büyümeyi sağlamaktır (UNIDO, 2023).

Temiz enerji kaynaklarıyla birlikte yeşil hidrojen, düşük karbonlu bir ekonomiye geçişte kritik bir öneme sahiptir. Yeşil hidrojenin karbon emisyonlarını azaltma vaadi, birçok sektörde karbonsuzlaşmayı desteklemekte ve çeşitli faydalar sunmaktadır (OECD, 2022). Dahası bu süreç, küresel sürdürülebilir enerji dönüşümünün özünü yansıtmaktadır. Buna göre fosil yakıta dayalı, yol (patika) bağımlı bir ekonomik yapıdan yenilenebilir enerji güdümlü endüstriyel çeşitlenmeyle karakterize edilen bir yapıya geçiş öngörülmektedir. Bu nedenle, bu dönüşümü anlamak yalnızca yeni bir

yakıtı benimsemekle ilgili değil, aynı zamanda tarihsel endüstriyel kilitlenmeleri (industrial lock-in) aşmak için belirli bir "fırsat penceresini" yakalamakla ilgilidir (Unruh, 2000).

Bu bağlamda yeşil hidrojen, özellikle fosil yakıta dayalı enerji ve sanayi sistemlerine tarihsel olarak bağımlı ülkeler için mevcut yolların dışına çıkma potansiyeli sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından görece avantajlı olan gelişmekte olan ülkeler, hidrojen teknolojileri aracılığıyla yalnızca karbon yoğun yolları terk etmekle kalmayıp, aynı zamanda küresel değer zincirlerinde daha üst konumlara yükseltecek yeni endüstriyel yollar yaratma fırsatına sahiptir. Dolayısıyla temel soru, bu ülkelerin yeşil hidrojen aracılığıyla yol bağımlılıklarını kırıp kıramayacakları ve hidrojen ekonomisinde öncü aktörler haline gelme olasılıklarının hangi koşullara bağlı olduğudur.

Özellikle yenilenebilir enerji üretiminde benzersiz coğrafi ve ekonomik güçlere sahip gelişmekte olan ülkeler için küresel sürdürülebilirlik yönelimi büyük bir avantaj taşımaktadır. Bu ülkeler, yenilenebilir enerji potansiyellerini yeşil hidrojene dönüştürerek ortaya çıkan sürdürülebilir yeşil enerji ekosisteminin fırsatlarından yararlanabileceklerdir. Yeşil hidrojen, bu ülkeler için yerel değer yaratma, istihdam sağlama, uluslararası rekabet gücünü artırma ve yeni eğitim programları geliştirme gibi pek çok kalkınma alanı açmaktadır (UNIDO, IRENA & IDOS, 2023). Bu anlamda küresel enerji dönüşümü hem bir zorluk hem de bir fırsat olarak değerlendirilebilir. Dönüşüm sürecinde yüzleşilen zorluklar; fosil yakıta dayalı sistemlerdeki mevcut kurumsal kilitlenmelerin aşılmasını gerektirmektedir. Bu süreçteki fırsatlar ise gelişmekte olan ekonomilerin yenilenebilir enerji endüstrileri etrafında tamamen yeni karşılaştırmalı üstünlükler inşa etmelerine olanak tanımaktadır.

Mevcut literatür büyük ölçüde yeşil hidrojenin teknik fizibilitesi ve maliyet rekabetçiliğine odaklanmaktadır (IEA, 2019; IRENA, 2020). Politika raporları ve yol haritaları, yeşil hidrojenin enerji dönüşümündeki potansiyel rolünü ortaya koysa da (European Commission, 2020; OECD, 2022; UNIDO vd., 2023), gelişmekte olan ülkelerde yeşil hidrojenin kurumsal ve mekânsal dinamiklerini sistematik biçimde ele alan çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Özellikle yeşil hidrojenin, bu ülkelerde mevcut

fosil yakıt temelli sanayi patikalarını dönüştürme veya yeni sanayi patikaları yaratma kapasitesi yeterince incelenmemiştir. Bu çalışma, söz konusu eksikliği bölgesel çeşitlenme ve patika gelişimi yaklaşımlarına dayanan Evrimsel Ekonomik Coğrafya literatüründen yararlanarak ele almaktadır (Martin vd., 2006; Trippl vd., 2020). Bu bağlamda, Unruh'un (2000) ortaya koyduğu karbon kilitlenmesi (carbon lock-in) çerçevesinden hareketle, düşük karbonlu dönüşüm süreçlerinde bu tür kilitlenmelerin nasıl aşılabileceğine ve buna yönelik fırsatların nasıl ortaya çıktığına dair literatürde bir analitik boşluk bulunmaktadır. Bu boşluğu dikkate alan araştırma, seçilmiş gelişmekte olan ülkelerin yeşil hidrojen üretim potansiyelini Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımıyla analiz ederek, mevcut kaynakların yeni bir yeşil sanayi yönelimine nasıl dönüştürülebileceğini incelemektedir.

Bu çalışma ilgili yazındaki tartışmalara iki temel başlıkta katkı sunmayı hedeflemektedir. Birincisi, yeşil hidrojen potansiyelini değerlendirmek üzere tekno-ekonomik ve kurumsal boyutları birleştiren bir bileşik endeks (Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi – YHPE) geliştirilmektedir. İkincisi, Evrimsel Ekonomik Coğrafya kavramları (yol bağımlılığı, yol yaratma ve birlikte evrim), literatürde ağırlıklı olarak kavramsal veya bölgesel vaka çalışmalarıyla ele alınırken, bu çalışmada yeşil hidrojen bağlamında ve gelişmekte olan ülkeleri kapsayan nicel göstergeler aracılığıyla sistematik biçimde değerlendirilmektedir.

EEG çerçevesinin benimsenmesi ekonomik bir mantığa dayanmaktadır. Bu çerçeve, endüstriyel evrimin ve bölgesel kalkınmanın tarihsel kapasiteler, rutinler ve kurumlar tarafından nasıl şekillendirildiğinin incelenmesine olanak tanımaktadır (Boschma vd., 2006). Yeşil hidrojen üretme kapasitesinin kilidinin açılmasının, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin ülkelerin kalkınma yolunu nasıl kolaylaştırdığı araştırılmaktadır. Yeşil hidrojenin ekonomik kalkınmayı yönlendirmedeki önemli rolü vurgulanmaktadır (IRENA, 2022; UNIDO, 2023). Ayrıca gelişmekte olan ülkelerin doğal kapasitelerinin sürdürülebilir ekonomik büyümelerine nasıl katkıda bulunabileceğine odaklanılmaktadır (IRENA, 2022). Bu teorik perspektiften EEG, ülkelerin fosil yakıtlara bağımlılıklarını nasıl ortadan kaldırabileceklerini ve yeni düşük karbonlu endüstriyel yörüngeler nasıl oluşturabileceklerini analiz ederek sürdürülebilirlik dönüşümleri (sustainability

transitions) literatürü ile ekonomik coğrafya arasında bir köprü kurmaktadır (Martin vd., 2006; Geels, 2011).

Bu çalışma üç bölümden oluşmakta olup ampirik analiz 2019–2023 dönemini kapsamaktadır. Birinci bölümde yeşil hidrojenin sürdürülebilir enerji dönüşümündeki rolü ve önemi ele alınmaktadır. Yeşil hidrojenin tanımı, elektroliz teknolojilerine odaklanan üretim yöntemleri ve çelik, amonyak, ulaşım ile enerji depolama gibi kilit sektörlerdeki uygulamaları tartışılmaktadır. Bu bölüm, yeşil hidrojenin karbonsuz enerji üretimini nasıl sağladığına, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretiminde ne kadar önemli olduğuna ve özellikle güçlü yenilenebilir kaynaklara sahip bölgelerde ekonomik kalkınma için sunduğu fırsatlara odaklanmaktadır. Ayrıca seçilmiş gelişmekte olan ülkelerin mevcut yol bağımlılıkları, düşük karbonlu dönüşüm sürecindeki konumları ve yeşil hidrojen yoluyla ortaya çıkabilecek potansiyel yeni sanayi yolları karşılaştırmalı biçimde sunulmaktadır.

İkinci bölümde yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkelerdeki endüstriyel uygulamaları Evrimsel Ekonomik Coğrafya perspektifinden incelenmektedir. Yeşil hidrojen bakımından zengin ülkelerde yol bağımlılığının, kilitlenmenin ve yol yaratmanın sanayileşme sürecini nasıl şekillendirdiği analiz edilmektedir. EEG çerçevesi, yeşil dönüşümde ekonomik uyum, endüstriyel çeşitlenme ve yeni yol yaratmanın arkasındaki mekanizmaları anlamak için teorik bir araç olarak kullanılmaktadır. EEG perspektifinden, yükselen ekonomilerin yerel kaynaklardan nasıl yararlanabileceğine, pazarları nasıl maksimize edebileceğine ve rekabetçi hidrojen endüstrileri nasıl geliştirebileceğine odaklanılmaktadır. Kıyı bölgelerinin endüstriyel katalizör rolü, talep yönelimli inovasyon ve teknolojik yollar gibi farklı bölgelerin mekânsal avantajları ve zorlukları da bu bağlamda incelenmektedir.

Üçüncü bölümde yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkeler için endüstriyel faydaları, 2019–2023 dönemini kapsayan ampirik bir analizle değerlendirilmektedir. Bu bölümde Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ile Ağırlıklı Toplam Modeli'ni (ATM) bütünleştiren hibrit bir Çok Kriterli Karar Verme metodolojisi kullanılarak YHPE skorları hesaplanmakta ve ülkeler dört kademeli bir yapıda sıralanmaktadır. Bulgular, 2023 yılında Çin'in 0,952'lik skorla baskın lider konumunda olduğunu; Hindistan

(0,293), Brezilya (0,226) ve Fas'ın (0,209) rekabetçi adaylar olarak öne çıktığını; Güney Afrika (0,174) ve Türkiye'nin (0,169) gelişen takipçiler kategorisinde yer aldığını; Mısır (0,092) ve Rusya'nın (0,036) ise farklı nedenlerle dezavantajlı konumda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle Rusya'nın 2019–2023 döneminde 0,147'den 0,036'ya düşen skoru, kurumsal çöküşün güçlü tekno-ekonomik varlıkları dahi etkisizleştirebileceğini gösteren çarpıcı bir bulgu olarak dikkat çekmektedir.

Buna göre bu araştırma, birbiriyle ilişkili iki hipotezi test etmektedir:

Hipotez 1 (Birlikte Evrim Hipotezi): Yeşil hidrojen alanında endüstriyel avantaj, tekno-ekonomik kapasiteler ile kurumsal çevrenin birlikte evriminin (co-evolution) bir fonksiyonudur (Nelson vd., 1982; Boschma vd., 2006; Martin vd., 2006). Birlikte evrim en güçlü ve sürdürülebilir sonuçları üretmekle birlikte, tek boyutlu güçler de belirli koşullarda ilerleme sağlayabilir (Martin, 2009; Trippl vd., 2020). Bununla birlikte, tek boyutlu avantajlara dayalı yollar yapısal kırılganlıklar taşımaktadır: (i) güçlü tekno-ekonomik varlıklar, kurumsal bozulma durumunda sürdürülebilir bir yola dönüşemeyebilir (Unruh, 2000); (ii) güçlü kurumsal kapasite, sınırlı tekno-ekonomik taban nedeniyle erken aşama büyümeyi tetikleyebilir ancak uzun vadeli ölçeklenme için fiziksel kapasite birikimi gereklidir (Trippl vd., 2020).

Hipotez 2 (Yol Ayrışması Hipotezi): Ülkeler, yeşil hidrojen endüstriyel üstünlüğünde tek tip bir yakınsama yerine, başlangıç tekno-ekonomik donanımları ve kurumsal koşullarına bağlı olarak farklı evrimsel yörüngeler izleyecektir (Martin vd., 2006; Boschma, 2015). Bu ayrışma; pozitif kilitlenme (positive lock-in) (kendini pekiştiren büyüme), yukarı dallanma (kapasite artışı) ve kurumsal çöküş (negatif kilitlenme – negative lock-in) olmak üzere farklı yol tipleri üretecektir (Martin, 2009; Unruh, 2000; Boschma, 2017).

Bu hipotezleri test etmek amacıyla çalışmada "Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi (YHPE)" olarak tanımlanan bir indeks geliştirilmiştir. Endeks, altı tekno-ekonomik gösterge (toplam yenilenebilir enerji kapasitesi, güneş ve rüzgâr kurulu gücü, hidrojen üretim projeleri, hidrojen ihracatı ve kişi başına GSYİH) ile dört kurumsal göstergeden (hükümet etkinliği, düzenleyici kalite, politik istikrar ve yolsuzluğun kontrolü) oluşmaktadır. AHS kriter ağırlıklarını belirlemek, ATM ise ülkelerin nihai skorlarını

hesaplamak için kullanılmıştır. Bu metodolojik çerçeve, Evrimsel Ekonomik Coğrafya kavramlarının ampirik olarak işlevselleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda, yol bağımlılığı tekno-ekonomik göstergeler üzerinden, yol yaratma kurumsal göstergeler üzerinden temsil edilmekte; tekno-ekonomik ve kurumsal boyutların birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen toplam YHPE skoru ise bu iki boyutun birlikte evrimini yansıtmaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

YEŞİL HİDROJEN VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda şekillenen küresel dönüşüm süreci, karbonsuzlaşmanın önemini artırmış ve bu süreç yeşil hidrojenin tüm dünyada stratejik bir enerji kaynağı olarak öne çıkmasına yol açmıştır (IEA, 2021; IRENA 2019). Bu "dönüşüm", yalnızca çevresel bir zorunluluğu değil; aynı zamanda üretim, ticaret ve endüstriyel organizasyonda yüksek karbonlu yapılardan düşük karbonlu yapılara doğru uzanan yapısal bir yeniden yapılanma sürecini temsil etmektedir. Başka bir deyişle, sürdürülebilir enerji dönüşümü, ekonomilerin sermayeyi, teknolojiyi ve işgücünü fosil yakıt endüstrilerinden yenilenebilir enerji temelli sektörlere nasıl yeniden dağıtıldığını tanımlamaktadır (OECD, 2015). Sürdürülebilir enerji dönüşümü, yalnızca enerji arzında yenilenebilirler enerjinin payının artması olarak değil; emisyonların yaşam döngüsü boyunca azaltılması, enerji güvenliği ve fiyat oynaklığı risklerinin düşürülmesi, sanayinin rekabet gücünü koruyacak biçimde teknoloji ve altyapının yeniden inşası ve dönüşüm maliyetlerinin adil biçimde yönetilmesi (istihdam, bölgesel eşitsizlikler) başlıklarını kapsamaktadır (IPCC, 2022; IRENA, 2023; UNIDO, 2016). Bu dönüşümün mevcut aşamasını daha somut biçimde değerlendirebilmek için, küresel enerji sisteminde yenilenebilir kaynakların bugünkü ağırlığına kısaca bakmak gerekmektedir. Küresel enerji dönüşümünün mevcut durumu incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji sistemi içindeki payının hâlâ sınırlı olduğu ancak istikrarlı biçimde arttığı görülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, 2023 yılı itibarıyla yenilenebilir enerji kaynakları dünya toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %18'ini oluşturmaktadır. Elektrik üretimi özelinde bakıldığında ise bu oran daha yüksek olup, yenilenebilir kaynaklar küresel elektrik üretiminin yaklaşık %30'unu karşılamaktadır. Bu durum, enerji dönüşümünün özellikle elektrik sektöründe daha hızlı ilerlediğini, buna karşın sanayi, ulaşım ve ısıtma gibi sektörlerde fosil yakıt bağımlılığının büyük ölçüde devam ettiğini göstermektedir (IEA, 2024; IRENA, 2023). Dolayısıyla dönüşüm, enerji sisteminin yalnızca teknik optimizasyonuna indirgenemeyen, kurumlar, yatırım akışları ve değer

zincirleri üzerinden ilerleyen yapısal bir yeniden yapılanmadır (Geels, 2011; IPCC, 2022; Boschma, 2024). Bu bağlamda, yenilenebilir elektriğin özellikle sanayi ve ulaşım gibi elektrifikasyonu zor alanlardaki sınırlılıkları, yeşil hidrojenin önemini artırmakta; bu teknoloji, söz konusu sektörlerde karbonsuzlaşmayı mümkün kılarken aynı zamanda yeni bir sanayi politikası alanı açmaktadır. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) açısından bakıldığında, bu durum yeşil hidrojenin yalnızca bir ikame yakıt değil; mevcut endüstrilerin (çelik, gübre/kimya, rafineri, liman lojistiği) etrafında ilişkili çeşitlilik yaratarak yeni bir uzmanlaşma hattı doğurabilen bir yol yaratma alanı olduğu anlamına gelmektedir.

Yeşil hidrojen, emisyon azaltımının özellikle zor olduğu ulaşım ve ağır sanayi (IPCC, 2022) dahil olmak üzere birçok endüstride karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltma kapasitesi sunmaktadır. Bunun yanı sıra yeşil hidrojen, çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine entegrasyonuna katkıda bulunmakta ve haftalarca, hatta aylarca enerji depolaması sağlayabilmektedir (IEA, 2024). Bu özellikler, enerji sisteminin istikrar ve güvenilirliğini artırmaya yardımcı olmakta ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaktadır. Dolayısıyla yeşil hidrojen, sürdürülebilir endüstriyel büyüme ve enerji güvenliğinin sağlanmasında önemli bir bileşen olarak uzun vadeli makroekonomik istikrarın güvence altına alınmasına katkıda bulunmaktadır. IRENA'ya göre yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji üretimini özellikle elektrifikasyonu zor endüstrilerle ilişkilendirebilmektedir. Bu noktada hidrojen, yüksek enerjili uygulamalar için etkili bir enerji taşıyıcısı işlevi görmektedir. Bu tür sektörler arası bağlantılar, bölgesel uzmanlaşma örüntülerini ve değer zincirlerini yeniden şekillendirebilir. Özetle, yeşil hidrojen; sistem esnekliğini artırma, depolama kapasitesini geliştirme, enerji güvenliğini iyileştirme, hava kirliliğini azaltma, ekonomik kalkınmayı teşvik etme, istihdam yaratma ve yüksek endüstriyel rekabet gücü elde etme gibi pek çok fayda sağlamaktadır (IRENA, 2020). Bu faydalar, endüstriyel yapıları küresel ölçekte yeniden organize eden devam eden bir teknolojik paradigma değişiminin işaretleri olarak yorumlanabilir.

Yenilenebilir enerji ve elektrolizör maliyetlerindeki düşüş, yeşil hidrojeni rekabetçi bir üretim kaynağı konumuna getirmiştir ve 2050 yılına kadar yeşil hidrojenin küresel arz tercihinin yüzde 50 ila 65'ine katkıda bulunması beklenmektedir

(McKinsey&Company, 2024). Projeksiyonlar, 2025 sonrasında temiz hidrojenin yeni üretilen hidrojen arzının baskın payını oluşturacağını göstermektedir (McKinsey&Company, 2024). IEA'ya (2024) göre, 2023 itibarıyla küresel hidrojen üretiminin %1'inden azı yeşil hidrojen olmakla birlikte, duyurulan projeler bu oranı 2030'a kadar yaklaşık %20-25'e ve 2050'ye kadar %60'ın üzerine çıkarabilir. Ek olarak, 2050 yılına kadar hidrojenin %94'ü yenilenebilir kaynaklardan sentezlenecektir. Hidrojen, nihai kullanımların karbonsuzlaştırılmasında ve enerji sisteminde esnekliğin garanti altına alınmasında temel bir unsur olacaktır (IRENA, 2023). Bu veriler, küresel enerji sektöründe kademeli ama kaçınılmaz ekonomik yeniden yapılanmayı ortaya koymaktadır. Bu projeksiyon, büyük ölçekli bir sermaye yeniden tahsisini ima etmektedir. Yatırımların fosil yakıta dayalı endüstrilerden yenilenebilir enerji ve hidrojen değer zincirlerine kayması, yeni temiz teknolojilerin eski karbon yoğun sistemlerin yerini aldığı Schumpeterci anlamda küresel bir "yaratıcı yıkım"[1] (Schumpeter, 1942) sürecini tetiklemektedir. Seçilmiş gelişmekte olan ülkeler için bu geçiş, bir yandan fosil yakıtlara dayalı mevcut sektörlerde ortaya çıkabilecek batık varlık risklerini derinleştirirken, diğer yandan yeni endüstriyel yetkinliklere sıçrama fırsatlarını da beraberinde getirmektedir (Unruh, 2000).

[1] Bu kavramın iktisat literatüründeki temel referansı, Joseph Schumpeter'in 1942 tarihli Capitalism, Socialism and Democracy adlı eseridir. Kavram, ekonomik yapının içten içe ve sürekli biçimde değiştiği bir süreci ifade eder: Bu süreçte eski üretim biçimleri ve yapılar ortadan kalkarken, onların yerine sürekli olarak yenileri ortaya çıkar. Enerji bağlamında ise bu yaklaşım, yenilenebilir teknolojilerin fosil yakıta dayalı varlıkları geçersiz kılmasıyla birlikte, aynı anda yeni pazarlar ve ekonomik faaliyet alanları yaratmasını anlatmaktadır.

Tablo 1: Temiz Hidrojen Performans Göstergeleri (2030-2050 Senaryoları)

		Tarihsel	2030		2050	
		2020	PES	1.5°C Senaryosu	PES	1.5°C Senaryosu
Temiz hidrojen üretimi (EJ)	Küresel	<1	<1	15	3	63
	G20	<1	<1	11	2	45
Temiz hidrojen (doğrudan kullanım ve e-yakıtlar) toplam nihai enerji tüketimi (TNET) payı (%)	Küresel	<1%	<1%	2%	<1%	14%
	G20	<1%	<1%	2%	<1%	15%
Temiz hidrojen (doğrudan kullanım ve e-yakıtlar) ulaştırma toplam toplam nihai enerji tüketimi (TNET) payı (%)	Küresel	<1%	<1%	<1%	2%	24%
	G20	<1%	<1%	<1%	2%	17%
Temiz hidrojen (doğrudan kullanım ve e-yakıtlar) sanayi toplam nihai enerji tüketimi (TNET) payı (%)	Küresel	<1%	<1%	5%	<1%	17%
	G20	<1%	<1%	6%	<1%	17%
Temiz hidrojen (doğrudan kullanım ve e-yakıtlar) binalar toplam nihai enerji tüketimi (TNET) payı (%)	Küresel	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
	G20	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%

Kaynak: IRENA (2023). World Energy Transitions Outlook 2023 (CC BY 3.0 IGO)

Yeşil hidrojen yatırımı, hükümetlere düşük karbonlu ekonomiye geçişi hızlandırma ve iklim değişikliğinin etkilerini sınırlandırma fırsatı sunmaktadır (IEA, 2019). Gelişmekte olan ülkeler için yeşil hidrojene yönelim salt bir teknoloji benimseme meselesi değil, bir kalkınma stratejisidir. Bu yönelim, yenilenebilir kaynak

bakımından zengin bölgelerin yeni enerji altyapıları aracılığıyla sanayileşmesine olanak tanımakta ve böylece küresel değer zincirlerindeki konumlarını yeniden tanımlamalarını sağlamaktadır (IRENA, 2023). Bu açıdan bakıldığında, dünya genelinde hükümetler ve şirketler iklim nötrlüğünün sağlanmasında hidrojenin potansiyelini giderek daha fazla kabul etmektedir. Üretim verimliliğindeki ilerlemeler ve azalan maliyetler sayesinde yenilenebilir hidrojenin 2050 yılına kadar yenilenebilir elektrik kapasitesindeki artışla uyumlu biçimde yaygın kullanıma ulaşması beklenmektedir (European Commission, 2020).

Temiz enerjiye yönelik artan talep, küresel sürdürülebilirlik hedeflerinin karşılanması için yeşil hidrojen sistemlerine ve teknolojilerine önemli yatırımlar yapılmasını gerektirmektedir. Kamu-özel sektör ortaklıkları, teknoloji transferi mekanizmaları ve yeşil hidrojenin yaygın kullanımına yönelik koordineli sanayi politikası, bu dönüşümün kapsayıcı büyüme üretip üretmeyeceğini ya da mevcut bölgesel eşitsizlikleri pekiştirip pekiştirmeyeceğini belirleyecektir. Etkili bir koordinasyon, gelecek nesiller için daha sürdürülebilir bir geleceği hızlandırabilir.

Hükümetler iklim yükümlülüklerini yerine getirmeye çalışırken, yeşil hidrojen hem çevresel hem de ekonomik avantajlar sunarak kritik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Yeşil hidrojenin benimsenmesi artık salt teknik bir mesele değil, bir ekonomik coğrafya sorusudur. Bu bağlamda uluslar ve bölgeler, sürdürülebilirliğe yönelik küresel değişime yanıt olarak üretimi, bilgiyi ve altyapıyı nasıl organize edeceklerini yeniden tanımlamak zorundadır (Boschma, 2015).

Bu bölümde, sürdürülebilir enerji dönüşümü dört boyut (emisyon, güvenlik, rekabetçilik, adalet) üzerinden okunarak yeşil hidrojenin ülkeler açısından hangi koşullarda “yeni yol”a dönüşebileceğine odaklanılacaktır.

İlk olarak, sürdürülebilir enerji dönüşümünün kavramsal çerçevesi, Paris Anlaşması hedefleri ve Schumpeterci "yaratıcı yıkım" kavramı bağlamında ortaya konulmakta; gelişmekte olan ülkeler için dönüşümün zorlukları ve fırsatları değerlendirilmektedir. İkinci olarak, yeşil hidrojenin bu sektörlerdeki (çelik, amonyak, ağır taşımacılık) rolü, enerji güvenliğine katkısı, mobilite uygulamaları ve gelişmekte olan ülkelerde yeni kalkınma yollarını mümkün kılma kapasitesi incelenmektedir. Üçüncü olarak, maliyet

düşüşleri, küresel projeler ve gelişmekte olan ülkeler için fırsatlar çerçevesinde yeşil hidrojenin geleceği ve ölçeklenebilirliği değerlendirilmektedir.

1.1. Küresel Sürdürülebilir Enerji Dönüşümü

Sürdürülebilir enerji dönüşümü, sadece fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak anlamına gelmez. Aynı zamanda, fosil yakıtların aşırı kullanımıyla gezegenin sınırlarının aşıldığı ve bunun Paris Anlaşması'nda (2015) belirtilen hedeflerle uyuşmadığı kabulüne dayanır. Bu nedenle bu dönüşüm, ekonomik yapının ve sermaye ile emek arasındaki ilişkilerin köklü biçimde değiştirilmesini gerektiren bir süreçtir (IPCC, 2022; Rockström et al., 2009). Bu bağlamda sürdürülebilir enerji dönüşümü, bu çalışmada benimsendiği üzere, çevresel hedeflerle ekonomik yapısal dönüşümün eş zamanlı olarak gerçekleşmesini gerektirir. Yani bu dönüşüm, sadece yüksek karbon salımı yapan teknolojilerin ortadan kaldırılması değildir. Aynı zamanda yeni üretim biçimlerinin, yeni iş alanlarının ve farklı bölgesel uzmanlıkların ortaya çıkmasını da içerir. Böyle bir değişim, sermayenin, emeğin ve teknolojinin yüksek karbonlu sektörlerden düşük karbonlu sektörlere büyük ölçekte yeniden yönlendirilmesini gerektirir (Schumpeter, 1942). Bu perspektiften yeşil hidrojen, yeni ekonomik değer alanları, endüstriyel yığılmalar ve istihdam yaratırken, yerleşik fosil tabanlı teknolojilerin piyasa gücünü aşındıran yıkıcı bir inovasyon işlevi görmektedir.

Ancak gelişmekte olan ülkeler için bu dönüşüm kolay ve sorunsuz değildir. Yeni ekonomik fırsatların ortaya çıkabilmesi için önce önemli yapısal sorunların aşılması gerekir. Bu süreç, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile, özellikle Erişilebilir ve Temiz Enerji (Amaç 7), Sanayi, Yenilik ve Altyapı (Amaç 9) ve İklim Eylemi (Amaç 13) hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Tablo 2'de bu yapısal faktörler özetlenmektedir (United Nations, 2015).

Bu küresel değişim, Paris Anlaşması ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları gibi, karbon salımını azaltmayı ve iklim üzerindeki etkiyi en aza indirmeyi amaçlayan uluslararası hedeflerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir enerji dönüşümü yalnızca yeni teknolojilere geçiş anlamına gelmez. Aynı zamanda sermayenin, emeğin ve bilginin düşük karbonlu ekonomik yapılara

yönlendirilmesini de içerir. Bu açıdan küresel enerji dönüşümü, yüksek karbonlu üretim sistemlerinden düşük karbonlu üretim sistemlerine doğru büyük ölçekli ve yapısal bir kaynak kayması olarak değerlendirilebilir.

Bu dönüşüm, iklim değişikliğinin maliyetlerinin piyasalarda hesaba katılmaması gibi bir soruna ve temiz enerji teknolojilerinin zamanla ucuzlamasına verilen bir tepkidir. Karbon fiyatlandırması, standartlar ve sübvansiyonlar gibi dönüşüm politikaları; çevresel zararları fiyatlara yansıtır, fiyat dengelerini değiştirir ve yatırımların temiz enerjiye yönelmesini sağlar (Pigou, 1920).

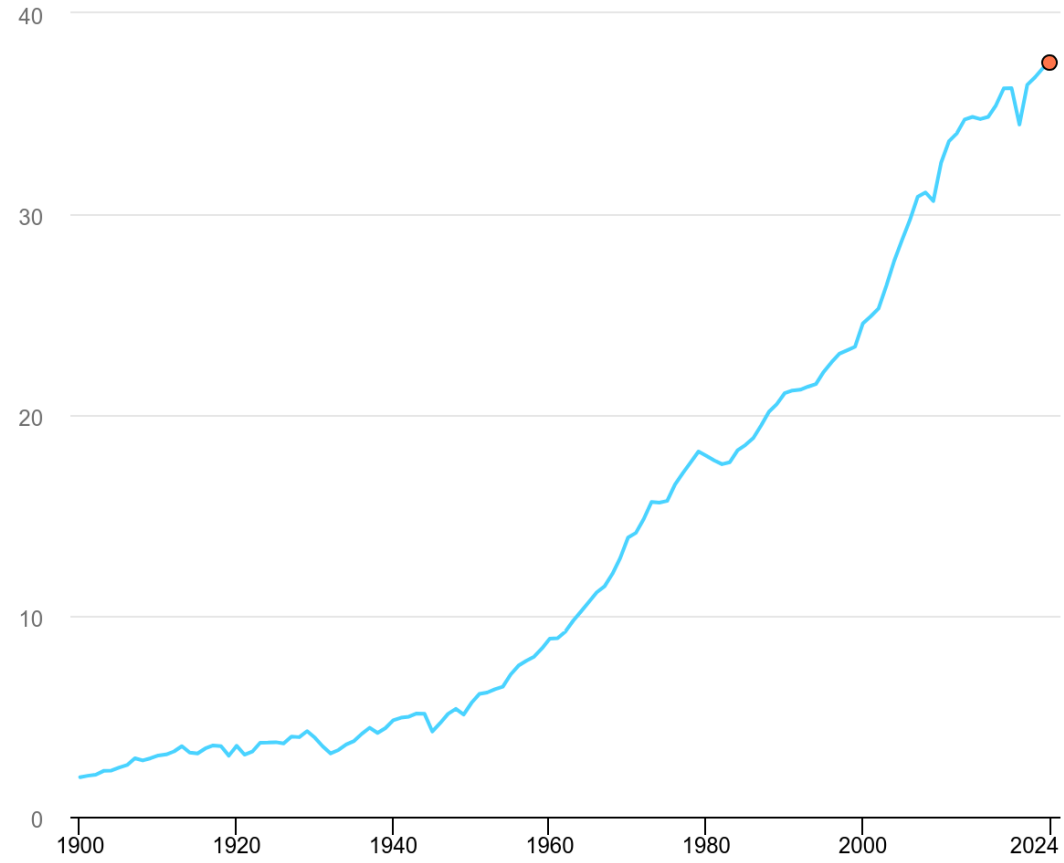
Karbon salımının yol açtığı zararlar ekonomik kararlara dâhil edilmediğinde, ülkeler daha fazla iklim kaynaklı fiziksel hasarla, değersiz hâle gelen fosil yakıt yatırımlarıyla ve dalgalanan yakıt fiyatlarının yarattığı enerji güvenliği sorunlarıyla karşı karşıya kalır. Teşviklerin yenilenebilir enerjiye yönlendirilmesi bu riskleri azaltır. Aynı zamanda yenilik, üretim ölçeğinin büyümesi ve verimlilik artışı sayesinde ekonomilere yeni rekabet avantajları kazandırır.

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımı, enerji dönüşümünde sermaye, emek ve bilginin yeniden dağılımının mekânsal ve kurumsal koşullardan nasıl etkilendiğini anlamak açısından yararlıdır (Boschma, R., & Frenken, K., 2006). EEG, bu tür dönüşümlerin hem yol bağımlılığı hem de yol kırıcı (path-breaking) inovasyonlar ile karakterize edildiğini ve bu sürecin yalnızca politika koordinasyonunu değil, aynı zamanda bölgesel kapasite geliştirmeyi de gerektirdiğini savunur. Bu bağlamda yol kırma (path breaking), yalnızca yeni bir teknolojiye geçişi değil; mevcut fosil-temelli altyapıların, teşvik yapılarının ve endüstriyel çıkar koalisyonlarının yön değiştirmesini ifade eder (Unruh, 2000; Garud, R., vd., 2001). Bu nedenle sürdürülebilir enerji dönüşümü, bu çalışmada yalnızca düşük karbonlu teknolojilerin yayılması olarak değil, yol bağımlılığıyla şekillenmiş enerji ve sanayi sistemlerinin bilinçli politikalarla yeniden yönlendirilmesi olarak ele alınmaktadır.

Dönüşümün başarısı, teknolojik seçeneklerin mevcudiyetinden çok, bu seçeneklerin mevcut kurumsal ve endüstriyel yapılar ile nasıl entegre edildiğine bağlıdır. Yenilenebilir kaynak bolluğu tek başına yeterli değildir; ancak ölçeklenebilir yenilenebilir üretim, düşük maliyetli finansman, elektrolizör, şebeke ve limanlar gibi

tamamlayıcı altyapılar, standartlar ve sertifikasyon mekanizmaları ile talep yaratıcı sanayi politikaları bir araya geldiğinde ülkeler karbon kilitlenmesinden çıkabilir ve yeni bir hidrojen yolu oluşturabilir (IRENA, 2020). Bu koşullar sağlandığında bazı gelişmekte olan ekonomiler, yalnızca ithalatçı ya da ham madde tedarikçisi olmak yerine, hidrojen ve türevlerinde (amonyak, e-yakıtlar, yeşil çelik girdileri) bölgesel üretim merkezleri olarak öne çıkabilir (IEA, 2024). Dolayısıyla hidrojen ekonomisinde liderlik potansiyeli, ülkelerin kaynak donanımından çok, kurumsal koordinasyon ile endüstriyel yetkinlikleri ilişkilendirerek yeni uzmanlaşmalar yaratabilme kapasitesine bağlıdır (Boschma, 2017).

Şekil 1: Küresel Endüstriyel CO_2 Emisyonları (1900-2023)



Kaynak: IEA (2025). Global Energy Review 2025 (CC BY 4.0)

1.1.1. Zorluklar ve Fırsatlar

Sürdürülebilir bir enerji sistemine geçiş, sorunsuz ve kendiliğinden gerçekleşen bir süreç değildir. Özellikle gelişmekte olan ekonomiler açısından bu dönüşüm, yeni ekonomik kazanımların (fırsatların) ortaya çıkabilmesi için önemli yapısal engellerin (zorlukların) aşılmasını gerektirmektedir. Bu süreçte ortaya çıkan dinamikler, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle Erişilebilir ve Temiz Enerji (SKA 7), Sanayi, Yenilik ve Altyapı (SKA 9) ile İklim Eylemi (SKA 13), sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel politika çerçevesini oluşturmaktadır (United Nations, 2015).

Tablo 2: Enerji Dönüşümünde Zorluklar ve Fırsatlar

	Zorluklar (Dönüşümün Önündeki Engeller)	**Fırsatlar (Endüstriyel Avantajlar)**	**İlgili SKA**
Ekonomik	Altyapı yatırımları için yüksek başlangıç sermaye maliyetleri (CAPEX); "karbon kilitlenmesi" riski ve batık fosil varlıklar	Yeni ihracat pazarlarının geliştirilmesi (yeşil H_2); fosil yakıt ithalatına olan bağımlılığın azaltılması	SKA 8, SKA 7
Teknolojik	Yerel teknik uzmanlık eksikliği (beceri açığı); şebeke istikrarına ilişkin sorunlar	Teknoloji transferi; yerel Ar-Ge kapasitesinin geliştirilmesi ve teknolojik sıçrama olanakları	SKA 9 (Sanayi, Yenilik ve Altyapı)
Kurumsal	Düzenleyici belirsizlikler; yabancı yatırımlar için yetersiz politika ve teşvik çerçeveleri	Yönetişim yapılarının modernizasyonu; yeni "yeşil sanayi politikası" çerçevelerinin oluşturulması	SKA 16 (Güçlü Kurumlar)
Çevresel	Özellikle kurak bölgelerde elektroliz süreçleri için su kıtlığına ilişkin endişeler	Karbonsuzlaştırılması zor sektörlerin (çelik, çimento) emisyonlarının azaltılması; Paris Anlaşması kapsamındaki NDC'lerin karşılanması	SKA 13 (İklim Eylemi), SKA 6

Kaynak: Yazar tarafından ChemKlub, Ramboll, Franco (2025), Younus vd. (2025), UNIDO/IRENA/IDOS (2024), European Court of Auditors (2024), GH2 (2023), UNIDO (2024) ve OECD (2024) kaynaklarından derlenmiştir.

1.2. Yeşil Hidrojenin Küresel Sürdürülebilir Enerji Dönüşümündeki Rolü

Bu çalışmanın sürdürülebilir enerji dönüşümü yaklaşımı içinde yeşil hidrojen, yalnızca bir enerji girdisi olarak değil; dönüşümün dört temel boyutunu aynı anda

etkileyen bir platform teknolojisi olarak ele alınmaktadır. Bu boyutlar emisyon azaltımı, enerji güvenliği, sanayi rekabet gücü ve adil dönüşümdür. Enerji dönüşümü, karbon maliyetlerinin içselleştirilmesi ve göreli faktör fiyatlarını değiştiren teknolojik öğrenme süreçleri tarafından yönlendirilen, çıktı bileşiminde genel bir denge kayması olarak anlaşılmaktadır.

Yeşil hidrojen, düzleştirilmiş maliyeti (LCOH) büyük ölçüde yenilenebilir enerji fiyatlarına, elektrolizör CAPEX'ine, kapasite kullanım oranlarına ve finansman maliyetlerine bağlı olan bir enerji taşıyıcısı ve ara girdidir. Bu nedenle bol ve düşük maliyetli yenilenebilir kaynaklara sahip ülkeler, hidrojen bazlı ürünlerde (amonyak, DRI-HBI, e-yakıtlar) karşılaştırmalı üstünlük geliştirerek uluslararası ticaret kalıplarını ve endüstriyel uzmanlaşmayı yeniden şekillendirebilir (Hausmann, 2022).

Seçilmiş gelişmekte olan ülkeler, yeşil hidrojenin stratejik kullanım biçimleri açısından farklı konumlanmalar sergilemektedir. Bu konumlanmalar, başlangıç koşullarının ve izlenen yörüngelerin ortaya çıkardığı işlevsel roller olarak değerlendirilmelidir. Bu çerçevede ülkeler genel olarak üç stratejik grupta toplanmaktadır:

(i) büyük iç pazarları ve mevcut sanayi talepleri sayesinde hidrojen üretimini öncelikle iç tüketime yönelten "yerli tüketim odaklı ölçekleyiciler" (örneğin Çin ve Hindistan), (ii) yenilenebilir kaynak avantajını dış talebe bağlamayı hedefleyen "ihracat-koridoru kurucular" (örneğin Fas, Mısır ve Güney Afrika) ve

(iii) mevcut fosil yakıt uzmanlaşmasını hidrojen ekonomisine uyarlamaya çalışan "dönüştürücü fosil ihracatçıları" (örneğin Rusya).

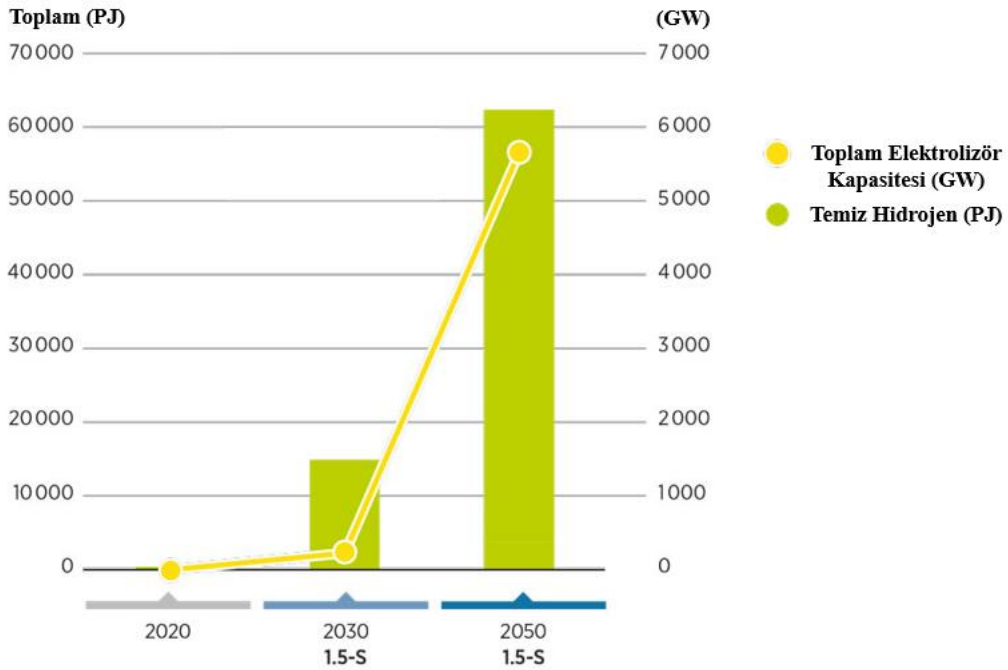
Bu farklı stratejik roller, ülkelerin hidrojen politikalarında hangi kaldıraçların, iç talep, ihracat altyapısı, teknoloji üretimi veya finansmana erişim, öncelikli olacağını da belirlemektedir.

Bölüm 1.1'de ortaya konulan dönüşüm çerçevesi içinde yeşil hidrojen, yenilenebilir elektrik üretimi ile karbonsuzlaştırılması zor sektörler arasında köprü işlevi görmektedir (IRENA, 2020).

İklim değişikliğine karşı küresel ölçekte artan çabalar kapsamında yeşil hidrojen, en dönüştürücü temiz enerji seçeneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Ülkeler, küresel sıcaklık artışını 1,5 °C ile sınırlandırmayı hedefleyen Paris Anlaşması yükümlülüklerini yerine getirmeye çalışırken, yeşil hidrojen kritik bir ayrıştırma (decoupling) platformu sunmaktadır. Özellikle doğası gereği maliyet etkin biçimde elektriklendirilemeyen sektörlerde uygulanabilir bir çözüm sağlayarak, endüstriyel büyüme ile sera gazı emisyonları arasındaki bağı koparmaya olanak tanımaktadır (Truby vd., 2023).

Bu çerçevede yeşil hidrojen, küresel enerji dönüşümü anlatısında stratejik bir rol üstlenmektedir. Hidrojenin, 2050 yılına kadar başta sanayi sektörü ve ağır taşımacılık kaynaklı olmak üzere küresel CO_2 emisyonlarında yaklaşık 80 gigatonluk bir azalma sağlama potansiyeline sahip olduğu tahmin edilmektedir. Bu miktar, küresel ısınmayı 1,5 °C ile sınırlamak için gerekli toplam emisyon azaltımlarının yaklaşık %11'ine karşılık gelmektedir (Heid vd., 2022).

Şekil 2: Küresel Temiz Hidrojen Arzı Projeksiyonu (1,5°C Senaryosu)



Kaynak: IEA (2025). Global Energy Review 2025 (CC BY 4.0)

Emisyon azaltımı fırsatı, yeşil hidrojenin daha geniş makroekonomik etkilerini görünür kılmaktadır. Bu etkiler; yeni sermaye akışlarının oluşmasından, işgücü

piyasalarındaki değişen örüntülere ve yerel ölçekte "yeşil" endüstriyel kümelerin ortaya çıkmasına kadar uzanmaktadır. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinden bakıldığında bu süreç, üretim kapasitesinin yüksek yenilenebilir enerji potansiyeline sahip bölgelere doğru kaymasıyla birlikte, sermaye ve teknolojik kapasitenin mekânsal olarak nerede yoğunlaştığının yeniden tanımlanması anlamına gelmektedir (Boschma, 2017).

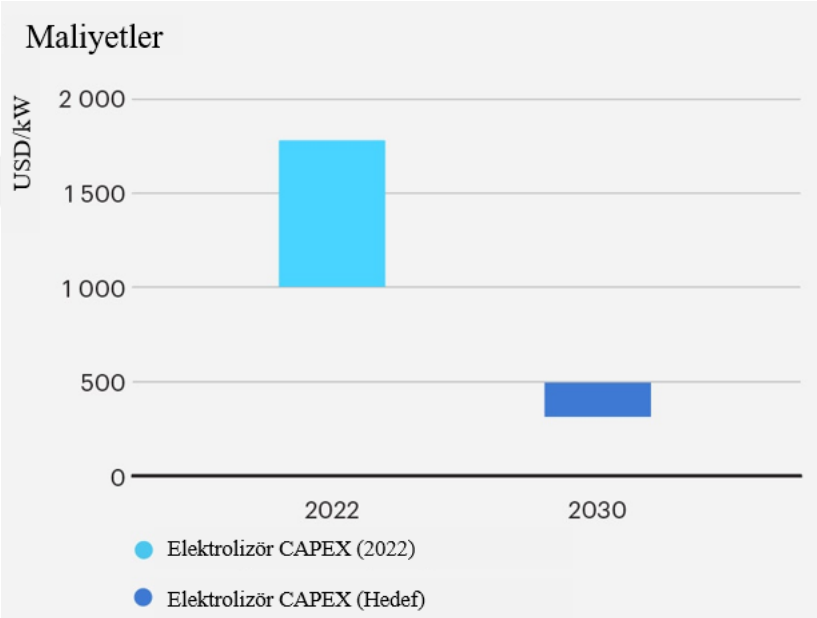
Küresel net sıfır hedefleriyle uyumlu olabilmesi için, yeşil hidrojenin yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının kilogram hidrojen başına 1 kg CO_2e'yi aşmaması gerekmektedir (Green Hydrogen Organisation, 2022). Gri hidrojen, yüksek CO_2 emisyonlarıyla doğal gaza dayalı bir üretim biçimi sunarken; mavi hidrojen hâlen fosil girdilere bağımlı olup karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerini içermektedir. Buna karşılık yeşil hidrojen, hidrojen tedarikini fosil kaynak kullanımından tamamen ayırmaktadır.

Yeşil hidrojenin teknik üretimi[2], yenilenebilir enerjiyle beslenen elektroliz süreçlerine dayanmakla birlikte (Renewables Advice, 2024), ekonomik değeri esas olarak çok yönlü bir "enerji taşıyıcısı" olmasından kaynaklanmaktadır. Hidrojen, enerji içeriğinde kayıp olmaksızın uzun süre depolanabilmekte ve petrol ya da doğal gaz gibi, ancak sıfır emisyonla, uluslararası ticarete konu olabilmektedir. Elektriğin aksine bu özellik, yenilenebilir enerjinin mevsimsel ve zamansal dengesizliklerinin aşılmasına imkân tanımaktadır. Bu husus, seçilmiş gelişmekte olan ülkeler açısından özellikle önemlidir. Zira bu ülkeler, sahip oldukları geniş güneş ve rüzgâr potansiyelini yeşil hidrojen ve türevleri aracılığıyla ekonomik değere dönüştürebilmektedir. Böylece bu ülkelerdeki görece "pasif" yenilenebilir kaynak sahipleri, yüksek katma değerli küresel değer zincirlerinde (GVC) aktif üretim ve ticaret aktörlerine dönüşme potansiyeli elde etmektedir. Ayrıca Yeşil Hidrojen Standardı, yeşil hidrojen üretiminde yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarının kg H_2 başına 1 kg CO_2e'yi aşmaması gerektiğini belirtmektedir. Küresel iklim hedefleriyle uyumlu olan bu standart, yeşil

[2] Süreç, bir elektrolit içine yerleştirilmiş katot ve anottan oluşan bir elektrolizör içinde gerçekleşir. Elektrik akımı verildiğinde, su molekülleri katotta indirgenerek hidrojen gazı ve hidroksit iyonları oluşturur. Anotta ise oksidasyon gerçekleşir ve bu süreçte oksijen gazı ile H^+ iyonları açığa çıkar (IRENA, 2019).

hidrojenin sürdürülebilir biçimde ve çevresel korumayı destekleyecek şekilde üretilmesini güvence altına almaktadır. Bu düşük emisyon eşiği, uluslararası karbon fiyatlandırma sistemleri kapsamında yeşil hidrojenin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Green Hydrogen Organisation, 2022).

Şekil 3: Elektrolizör Maliyet Eğilimleri



Kaynak: IEA (2023). Breakthrough Agenda Report 2023: Hydrogen (CC BY 4.0)

Şekil 3, elektrolizörlerin birim yatırım maliyetlerinin 2022'den 2030'a kadar önemli ölçüde düşmesinin beklendiğini göstermektedir. Mevcut yüksek maliyetler, yeşil hidrojenin yaygınlaşması açısından kısa vadede bir kısıt oluştururken, uzun vadede teknoloji gelişimi, ölçek ekonomileri ve politika destekleri sayesinde rekabetçi bir enerji seçeneğine dönüşmesi için bir olanak sunmaktadır. Bu durum, yeşil hidrojenin enerji dönüşümünde başlangıçta maliyet dezavantajına sahip olsa da stratejik bir yatırım alanı olduğunu ortaya koymaktadır.

Sürdürülebilir dönüşüm perspektifinden bakıldığında bu tablo, yeşil hidrojeni yalnızca bir teknolojik yenilik olarak değil, aynı zamanda sistemik bir ekonomik fırsat olarak konumlandırmaktadır. Yeşil hidrojen, ülkelerin ekonomik büyümeyi karbon yoğunluğundan ayrıştırmasına ve yenilenebilir kaynak donanımlarına dayalı yeni rekabet avantajları geliştirmesine olanak tanımaktadır. Sürdürülebilir bir enerji

geleceği hedeflenirken yeşil hidrojen temel bir bileşen olarak öne çıkmakta; geleneksel olarak fosil yakıtların egemen olduğu sektörlerin karbonsuzlaştırılması için uygulanabilir ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Küresel ölçekte giderek daha fazla hükümet ve şirketin net sıfır hedefleri benimsemesiyle birlikte, yeşil hidrojenin temiz enerjiye geçişte kilit bir rol oynayacağı öngörülmektedir (IRENA, 2020).

Devam eden teknolojik ilerlemeler, örneğin düşük maliyetli katalizörler, elektrolizörlerin modüler tasarımı ve hidrojen depolama seçenekleri, bu gelişmekte olan sektörün dinamik ve sürekli evrim hâlinde olduğunu göstermektedir (Pathak, 2024). Bu gelişmeler, teknolojik yeniliklerin kurumsal yapılar ve bölgesel kapasiteler ile etkileşime girerek yeni endüstriyel yapılanmalar oluşturduğu özgün "yol yaratma" süreçlerine işaret etmektedir (Garud, R. vd., 2001). Aynı zamanda bu süreçler, bölgelerin "yol kırıcı" inovasyonlar yoluyla karbon kilitlenmesinden nasıl çıkabildiğini ortaya koymakta ve küresel sürdürülebilirlik dönüşümlerinin mekânsal boyutunu güçlendirmektedir (Unruh, 2000).

1.2.1. Karbonsuzlaşması Zor Sektörler ve Hidrojen

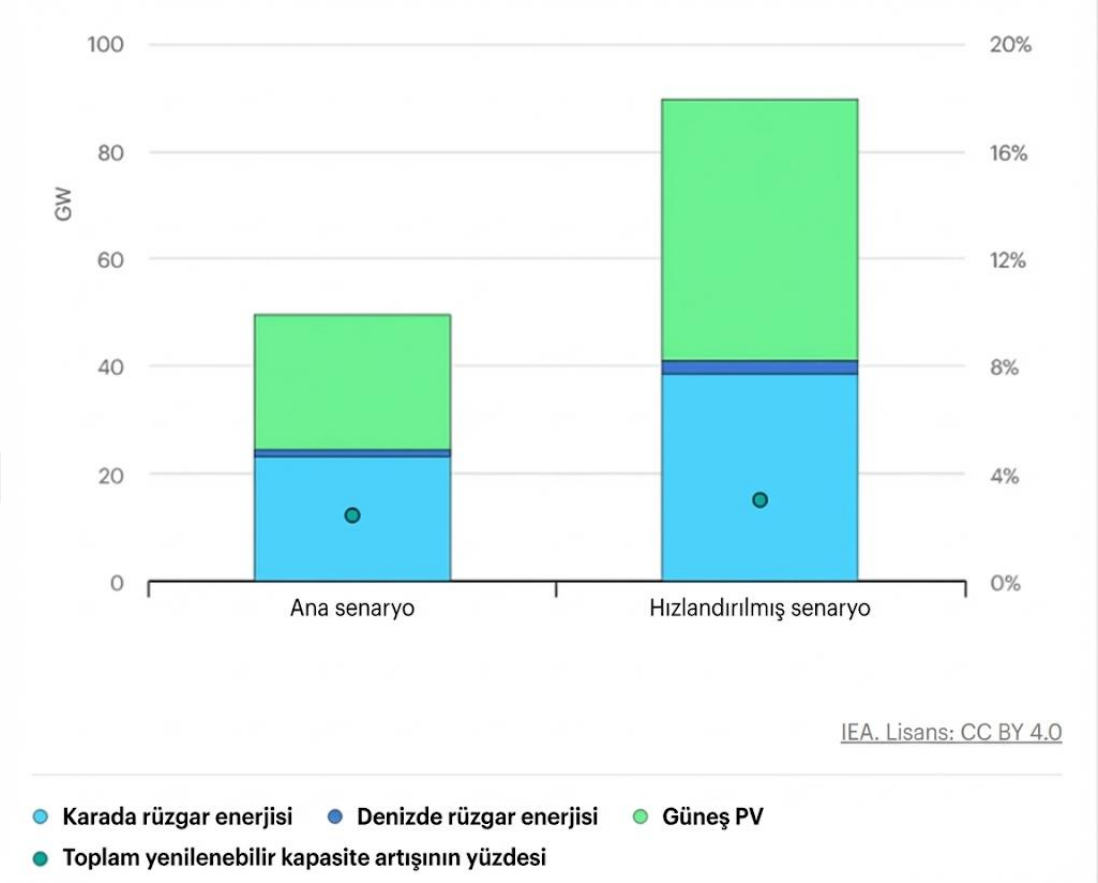
Yeşil hidrojen, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin gelişmekte olan ülkeler için önemli bir stratejik fırsat sunmaktadır. Düşük karbonlu sanayileşmeyi, ihracatın çeşitlendirilmesini ve teknolojik kapasitenin yükseltilmesini mümkün kılarak, çevresel hedefler ile sanayi politikası amaçları arasında bir köprü işlevi görmektedir (UNIDO, 2022).

İklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik uluslararası çabaların güçlenmesiyle birlikte yeşil hidrojen, daha önce yenilenebilir elektrikle doğrudan elektriklendirilmesi zor kabul edilen sektörlerde karbonsuzlaşmanın kilit bir sağlayıcısı hâline gelmektedir. Yeşil hidrojenin yaygınlaşması esas olarak iki faktöre bağlıdır: teknolojik ilerlemeler ve kurumsal entegrasyon. Bu durum, ekonomik dönüşümün pratikte inovasyon sistemleri ile politika rejimleri arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olduğunu ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerjinin düzenleyici araçlar yoluyla sisteme entegrasyonuna yönelik bu gelişmeler, önemli ekonomik zorluklar sürse de, yeşil hidrojen gibi çok yönlü bir enerji taşıyıcısının küresel ölçekte benimsenmesini hızlandırmaktadır (Franco, 2025).

Kolayca elektriklendirilemeyen termal endüstriyel süreçler ve uzun mesafeli taşımacılık, küresel enerji kullanımının yarısından fazlasını oluşturmaya devam etmektedir (Franco, 2025). Yenilenebilir elektrik ve yeşil hidrojenin fosil yakıtlara kıyasla daha düşük maliyetli hâle geldiği bir eşik noktaya ulaşılana kadar, bu "dekarbonizasyonu zor" sektörlerde üretimin, karbonsuzlaştırma avantajına sahip olmayan ancak maliyet açısından daha düşük görülen yollar üzerinden sürdürülmesi olasıdır. Doğal gazdan elde edilen gri hidrojen ve karbon yakalama teknolojileriyle üretilen mavi hidrojen ile karşılaştırıldığında, yeşil hidrojen hiçbir fosil girdi kullanmamakta ve bu nedenle yaşam döngüsü emisyonlarını sıfıra veya sıfıra yakın seviyelere indirmektedir (Lhyfe, 2024). Küresel iklim hedeflerinin karşılanabilmesi için 2050 yılına kadar yıllık 200–430 milyon ton temiz hidrojen talebinin ortaya çıkacağı; bunun da yenilenebilir enerji kapasitesi, elektrolizörler ve ilgili altyapılara yaklaşık 6,5 trilyon ABD doları tutarında yatırım gerektireceği tahmin edilmektedir (Green Hydrogen Organisation, 2025). Bu büyüklükte bir yatırım ihtiyacı, küresel sermaye akışlarının kapsamlı biçimde yeniden yönlendirilmesine işaret etmektedir (IEA, 2021). Bu süreç, dünya genelinde endüstriyel sektörleri, değer zincirlerini ve istihdam yapısını yeniden şekillendiren, klasik anlamda bir "Schumpeterci dönüşüm" olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4, küresel ölçekte hidrojen üretimine ayrılan toplam yenilenebilir enerji kapasitesini göstermektedir. 2022–2027 döneminde, küresel yenilenebilir kapasite artışının yaklaşık %2'sinin hidrojen üretimine tahsis edilmesi beklenmektedir. Hızlandırılmış senaryoda ise bu oranın %8'e kadar yükseldiği görülmektedir.

Şekil 4: Hidrojen Üretimine Ayrılan Yenilenebilir Kapasite (2021-2027)



Kaynak: IEA (2022). How much will renewable hydrogen production drive demand for new renewable energy capacity by 2027? (CC BY 4.0)

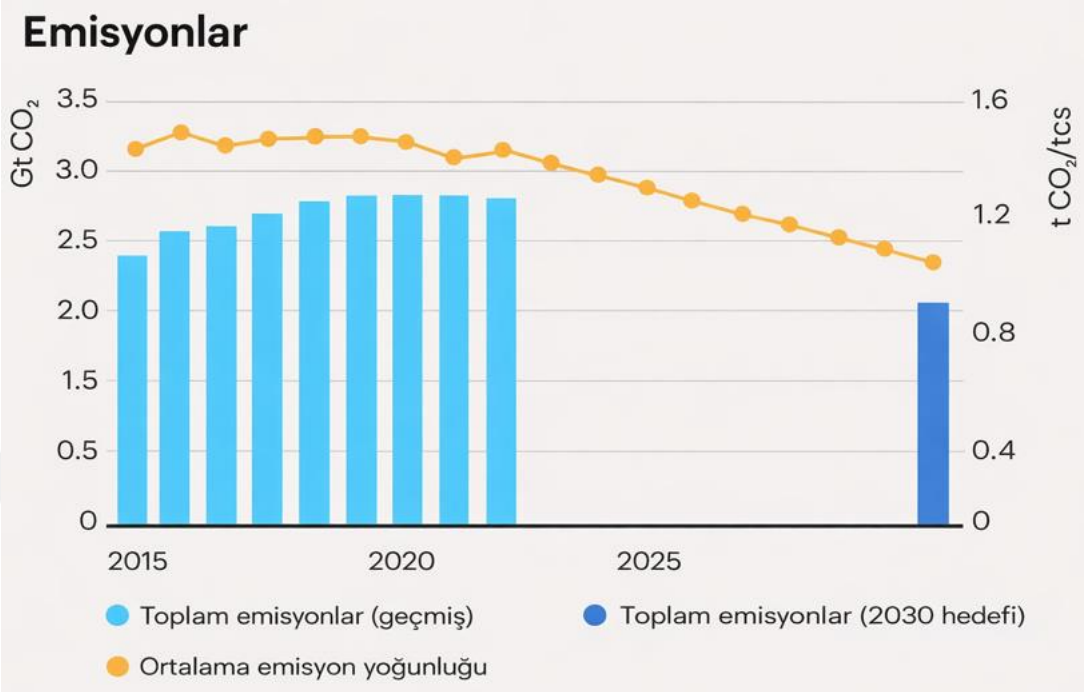
Yeşil hidrojen, geleneksel karbonsuzlaştırma yöntemlerinin yetersiz kaldığı alanlarda özellikle yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu sektörler, çelik, kimyasallar ve çimento, küresel endüstriyel rekabet gücünün temel bileşenleridir. Dolayısıyla bu alanların karbonsuzlaştırılması, yalnızca teknolojik bir dönüşümü değil, aynı zamanda yapısal bir endüstriyel dönüşüm meydan okumasını temsil etmektedir.

Demir ve çelik sektörü, yıllık 2,6 Gt CO_2 emisyonuyla küresel CO_2 emisyonlarında birinci sırada yer almakta; aynı zamanda küresel enerji sistemlerinden kaynaklanan emisyonların %7'sini oluşturarak enerji tüketiminde ikinci sırada bulunmaktadır (IEA, 2020). Benzer şekilde amonyak ve gübre endüstrisi, üretiminin büyük ölçüde fosil tabanlı hidrojene dayanması nedeniyle, küresel CO_2 emisyonlarının yaklaşık %1,8'ini oluşturmaktadır. Bu bağlamda Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) teknolojisi, çelik

endüstrisinin tam karbonsuzlaştırılması için uygulanabilir bir yol sunmaktadır (IEA, 2019; IEA, 2021). Bu süreçte hidrojen, indirgen madde olarak kömür veya doğal gazın yerini alabilmekte ve sıfır emisyonlu çelik üretimini mümkün kılmaktadır (Franco, 2025). Hidrojen bazlı doğrudan demir indirgeme (H-DRI) süreçlerine geçiş ve amonyak sentezinde yeşil hidrojen kullanımı, sanayi için dönüştürücü yollar sunmaktadır. Bu uygulamaların, yıllık 2,3 Gt CO_2'ye kadar emisyon tasarrufu sağlayabileceği ve kimyasal hammadde üretiminin tam karbonsuzlaştırılmasına olanak tanıyabileceği öngörülmektedir (Bhaskar, vd., 2020).

Çelik üretiminin ötesinde hidrojen, yakıtın temiz yanma özellikleri ve yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel süreçlerde fosil yakıtların ikame edilebilmesi nedeniyle karbonsuzlaştırma açısından önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır (Franco, 2025). Bu dönüşümün etkileri yalnızca emisyon azaltımıyla sınırlı değildir; aynı zamanda küresel endüstriyel değer zincirlerinin yeniden örgütlenmesini tetiklemektedir. Bu çerçevede, bol yenilenebilir enerji potansiyeline ve gelişmiş teknolojik kapasitelere sahip bölgeler, İskandinav ülkeleri, Avustralya, Mısır ve Fas gibi, kendilerini hidrojen temelli endüstriyel merkezler olarak konumlandırmaktadır. Kimyasallar, gübreler ve metalurji alanlarındaki mevcut yetkinliklerin yeniden bir araya gelmesiyle yeni yeşil teknoloji endüstrileri ortaya çıkmaktadır. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinden bakıldığında bu süreç, mevcut endüstriyel kapasitelerin ilişkili düşük karbonlu yörüngelere evrilmesini ve bu yolla yeni karşılaştırmalı üstünlüklerin oluşmasını temsil eden yol kırıcı bir uzmanlaşma dinamiğine karşılık gelmektedir (Boschma, 2017).

Şekil 5: Çelik Sektörü CO_2 Emisyonları



Kaynak: IEA (2023). Breakthrough Agenda Report 2023 (CC BY 4.0)

1.2.2. Enerji Güvenliği ve Ekonomik Dayanıklılık

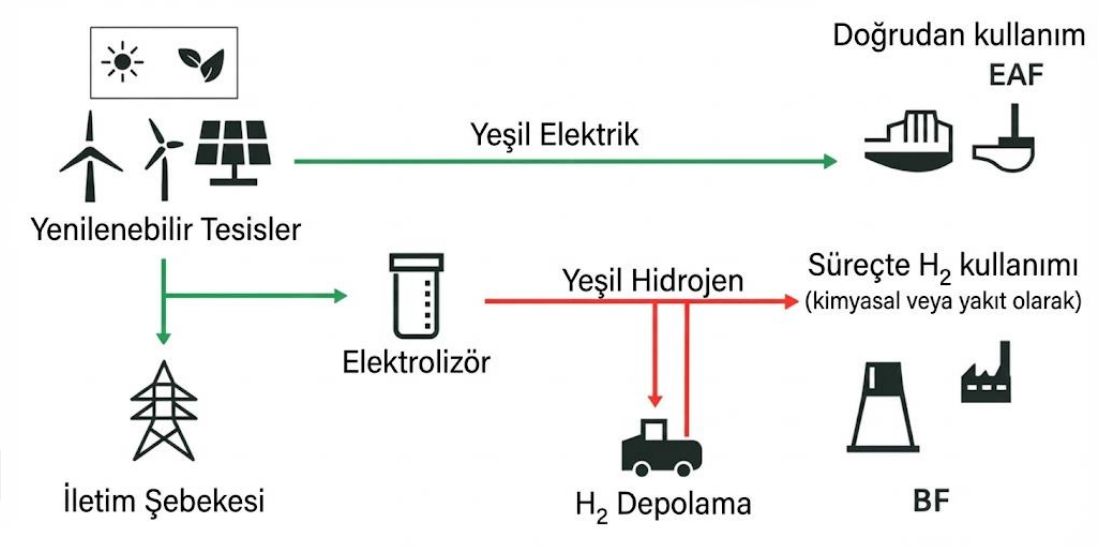
Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek paya sahip olduğu elektrik şebekeleri için uzun vadeli enerji kullanımında kritik bir büyük ölçekli enerji depolama çözümü işlevi görmektedir. Bu bağlamda yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji ekonomisinde arz ve talebi dengeleyen bir "sistem entegratörü" olarak hareket etmektedir (Lund, 2016). Bu özelliğiyle yeşil hidrojen, sürdürülebilir enerji dönüşümünün yalnızca çevresel değil, aynı zamanda makroekonomik ve jeopolitik boyutlarına da yanıt veren bir araç olarak öne çıkmaktadır. Enerji arzının çeşitlendirilmesi ve depolanabilirliği, bu çalışmada dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmaktadır.

Elektrolizörler, pik üretim dönemlerinde önemli miktarda güneş ve rüzgâr enerjisini yakalayabilmekte; bu enerjiyi daha sonra depolanabilir hidrojene dönüştürebilmektedir. Bu özellik, yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip geleneksel şebekelerde ortaya çıkan istikrar sorunlarının hafifletilmesine katkı sağlamaktadır (Franco, 2025). Buna ek olarak yeşil hidrojen, yenilenebilir tabanlı elektrik sistemlerinde arz-talep dengesini sağlamak amacıyla bir enerji deposu olarak

da kullanılabilmektedir. Elektrik santrallerinde hidrojenin doğal gazla birlikte kullanılması, yanma kaynaklı emisyonların azaltılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca hidrojen yakıt hücreleri, şebekeden bağımsız ve uzak uygulamalarda ekonomik ve güvenilir enerji üretimini mümkün kılmaktadır (European Commission, 2025).

Yeşil hidrojenin bir diğer önemli katkısı, yenilenebilir enerji piyasalarındaki oynaklığın azaltılmasıdır. Fazla elektriğin hidrojene dönüştürülerek depolanması sayesinde gelişmekte olan ülkeler, küresel fosil yakıt fiyat şoklarına karşı kırılganlıklarını azaltabilir ve endüstriyel faaliyetler için istikrarlı bir enerji arzı sağlayabilir (Global Renewables Congress , 2025). Hidrojen bu yönüyle yalnızca anlık kullanım imkânı sunan bir enerji girdisi değil, zamandan bağımsız değere sahip, zamanlar arası bir enerji taşıyıcısı olarak hizmet vermektedir. Bu özellik, ulusal elektrik piyasalarının istikrara kavuşmasına ve fiyat oynaklığının azalmasına katkı sağlarken, enerji bağımsızlığını da güçlendirmektedir. Bu teknolojik geçiş, yalnızca yenilenebilir temelli şebekeler için daha istikrarlı bir yapı oluşturmakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda enerjinin depolanması, dönüştürülmesi ve iletimi alanlarında yeni endüstriyel faaliyetlerin gelişmesini de teşvik etmektedir. Yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek ancak yüksek gerilim iletim altyapısı sınırlı olan Şili ve Güney Afrika gibi ülkeler, hidrojen ihracatını endüstriyel yükseltme ve ekonomik çeşitlendirme aracı olarak değerlendirmektedir. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinden bakıldığında bu gelişmeler, yerel enerji sistemlerinin yalnızca belirli oranlarda yenilenebilirlerle işletilmesinden, yenilenebilir üretim kaynaklarının daha bütüncül biçimde değerlendirilmesine doğru evrildiğini göstermektedir. Bu süreç, kapasite geliştirme ve kurumsal adaptasyonun eş zamanlı ilerlediği bir dönüşüme işaret etmektedir. Enerji sistemleri, teknolojik altyapılar ve piyasa yapıları, yeni bir enerji taşıyıcısı olan hidrojenin sisteme entegrasyonu için paralel ve birlikte evrimleşmektedir.

Şekil 6: Hidrojenin Endüstriyel Karbonsuzlaşmadaki Rolü



Kaynak: Alessandro Franco (2025). Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities'den yazar tarafından uyarlanmıştır.

1.2.3. Ulaşım Sektörü ve Altyapı Dönüşümü

Mobilite sektöründe yeşil hidrojen, basit bir yakıt ikamesinin ötesine geçerek endüstriyel yeniden yapılanmayı beraberinde getirmektedir. Özellikle uzun mesafeli yük taşımacılığı, denizcilik ve havacılık gibi alanlarda, doğrudan elektrifikasyonun sınırlı kaldığı nişleri hedefleyerek mevcut çözümleri tamamlamaktadır. Küresel CO_2 emisyonlarının önemli bir bölümü ulaştırma sektöründen kaynaklanmakta olup, yeşil hidrojenin bu alanda kullanımı çevresel etkilerin önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlamaktadır (IPCC, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC., 2014).

Hidrojen yakıt hücreleri, uzun mesafeli yük taşımacılığında mevcut batarya teknolojilerine kıyasla daha kısa yakıt ikmali süreleri ve daha uzun menzil avantajları sunmaktadır. Bu potansiyel, politika yapıcılar tarafından da giderek daha fazla kabul görmektedir. Örneğin Fransa, mobilite sektöründe yeşil hidrojenin stratejik önemini kabul ederek, Avrupa Birliği düzenlemelerinin ötesine geçmiş ve 2030 yılına kadar ulaştırma yakıtlarında %1,5 oranında yeşil hidrojen kullanımını zorunlu hâle getirmiştir (Green Hydrogen Organisation, 2025). Bu örnek, düzenleyici çerçevelerin

hidrojen üretimi, altyapısı ve hizmetleri için nasıl yeni talep ekosistemleri oluşturabildiğini göstermektedir.

Denizcilik ve havacılık sektörleri de, liman ve havalimanı ekonomilerini dönüştürme potansiyeline sahip alternatifler olarak amonyak ve sıvı hidrojen kullanımını test etmektedir. Denizcilik sektöründe hidrojenden türetilen amonyak yakıtlarının, ağır fuel oil'in yerini alarak sektörün küresel enerji tüketimindeki payını yaklaşık %1'den %19'a kadar yükseltebileceği öngörülmektedir (Callari, 2025).

Buna ek olarak, küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %2'si havacılık sektöründen kaynaklanmakta olup, bu sektörün emisyonları kara ve deniz taşımacılığına kıyasla daha hızlı artmaktadır. Hidrojen yakıt hücrelerinin havacılıkta iklim etkisini %75–90 oranında azaltma, hidrojenle çalışan uçakların ise %50–75 oranında azaltma potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir (European Commission, 2025).

Bu gelişmeler, küresel taşımacılık sistemine entegre olmuş endüstriyel ağları ve tedarik zincirlerini dönüştürmektedir. Hidrojen yakıt ikmali altyapısına, liman tesislerine ve uçak motoru teknolojilerine yapılan yatırımlar; taşımacılık, lojistik ve enerji sektörleri arasında yeni sektörler arası işbirliklerini teşvik etmektedir. Almanya, Japonya ve Güney Kore gibi hidrojen taşımacılık koridorları oluşturan ülkeler, bu alanda ilk hamle avantajı elde ederek küresel temiz teknoloji yarışında daha güçlü bir konum kazanma potansiyeline sahiptir.

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinden bakıldığında mobilite sektörü, başarılı bölgelerin ilişkili teknolojik çeşitlilikten yararlanarak liderliklerini sürdürdüğü; koordineli teknolojik gelişim ve kurumsal destek yoluyla yeni yollar yarattığı bir dönüşüm alanını temsil etmektedir.

1.2.4. Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Yeşil Hidrojen ve Kalkınma Fırsatları

Gelişmekte olan ülkeler, yeşil hidrojeni benimseme konusunda kritik bir eşikte bulunmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir enerji dönüşümünün bu çalışmada yalnızca emisyon azaltımı olarak değil, aynı zamanda kalkınma yollarının yeniden tanımlanması olarak ele alındığını göstermektedir. Bu bağlamda yeşil hidrojen, bazı

ülkeler için yalnızca yeni bir enerji taşıyıcısı değil; fosil-temelli ya da ithalata bağımlı yolların aşılmasını sağlayarak daha yüksek katma değerli sanayi ve ihracat faaliyetlerine geçişi mümkün kılan bir "yol kırıcı" platform teknolojisi niteliği taşımaktadır. Bu nedenle yeşil hidrojen, gelişmekte olan ülkelerde hem çevresel hem de kalkınmaya yönelik bir araç işlevi görmektedir. Bu durum, geleneksel "kaynak çıkarma yollarından" daha bilgi yoğun üretim yollarına geçiş potansiyeline işaret etmektedir (UNIDO, 2016; 2020). Önceki bölümlerde sunulan çerçeve doğrultusunda, Brezilya, Fas ve Hindistan gibi yüksek güneş ve rüzgâr potansiyeline sahip ülkeler yeşil hidrojeni şu amaçlarla kullanabilmektedir:

(i) düşük karbonlu sanayileşme (ham madde ihracatından endüstriyel üretime yükseltme),

(ii) istihdam yaratma (hidrojen yatırımlarında her 1 milyar ABD doları yaklaşık 20.000 doğrudan ve dolaylı istihdam yaratabilmektedir (Rodríguez, 2023),

(iii) enerjiye erişimin artırılması (merkezi olmayan ve temiz enerji çözümlerinin yaygınlaştırılması) (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023)

Bununla birlikte birçok gelişmekte olan ülke hâlen fosil yakıt ihracatına veya enerji yoğun sanayilere bağımlı durumdadır ve bu yapı, söz konusu ülkeleri küresel karbonsuzlaşma sürecine bağlı ekonomik risklere açık hâle getirmektedir. Ancak Hindistan ve Güney Afrika örneklerinde görüldüğü üzere, sanayi politikası, yenilenebilir enerji üretim potansiyeli ve doğrudan yabancı yatırım arasında uyum sağlanması, yeşil hidrojen temelli endüstriyel kümelerin oluşmasına ve yatırım ile teknoloji transferinin çekilmesine olanak tanımaktadır (OECD, 2022). Bu strateji, gelişmekte olan ekonomilerin hammadde çıkarımına dayalı konumdan, temiz imalat ve enerji ihracatına yönelerek küresel değer zincirinde yukarı doğru hareket etmesini mümkün kılmaktadır.

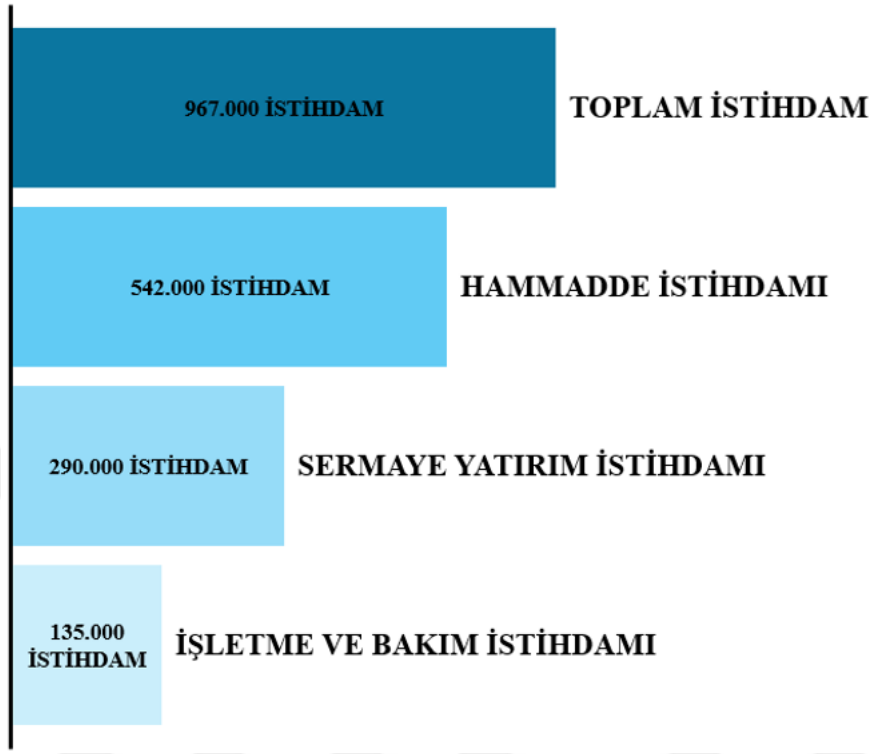
Buna karşın eşitlik ve kapsayıcılık konusundaki kaygılar devam etmektedir. Bilinçli ve bütüncül bir strateji geliştirilmediği takdirde, gelişmekte olan ekonomiler yerli endüstriyel kapasiteyi güçlendirmek yerine yalnızca hidrojen ihracatçısı konumunda kalma riskiyle karşı karşıya kalabilir. Bu noktada UNIDO–IRENA–IDOS politika araç seti, elektroliz ve hidrojen sistemlerinin tasarımında yerel bilgi üretimini, teknoloji

transferini, toplumsal faydaları ve altyapı geliştirmeyi birlikte gözeten kapsayıcı çerçevelerin önemini vurgulamaktadır.

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) terminolojisiyle ifade edildiğinde bu süreç, gelişmekte olan ülkelerin yeni hidrojen kapasitelerini çelik, gübre ve lojistik gibi mevcut sektörlerle ilişkilendirdiği bir kurumsal birlikte evrim ve ilişkili çeşitlilik dinamiğine karşılık gelmektedir. Bu tür bir entegrasyon, merkez–çevre bağımlılıklarını yeniden üretmek yerine kapsayıcı endüstriyel kalkınmayı desteklemektedir. Kaynak tedarikçisinden endüstriyel oyuncuya doğru gerçekleşen bu geçiş, ampirik modelde (Bölüm 3) yer alan "Tekno-Ekonomik Kapasiteler" kümesinin teorik temelini oluşturmakta; özellikle yenilenebilir kaynak bolluğunun endüstriyel avantaj yaratmada birincil itici güç olarak işlediği önermesini güçlendirmektedir. Bu nedenle, hammadde tedarikçisinden yüksek değerli enerji vektörleri üreticisine doğru gerçekleşen dönüşüm, bir sonraki bölümde ele alınan Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinin merkezinde yer almaktadır.

Gelişmekte olan ülkeler için kapsamlı istihdam tahminleri henüz mevcut olmamakla birlikte, Şekil 7'deki AB örneği yeşil hidrojenin istihdam yaratma potansiyelinin boyutunu göstermektedir.

Şekil 7: AB'de Yeşil Hidrojen İstihdam Potansiyeli (2030)



Kaynak: Dr Paramaconi Rodríguez (2023). Betting on green hydrogen to fulfil employment growth'dan yazar tarafından uyarlanmıştır.

1.2.5. Politika ve Yatırım Çerçevesi

Hidrojenin tam potansiyelinin ortaya çıkarılabilmesi için eşgüdümlü çabalar ve kalıcı politika araçları gerekmektedir. Yeşil hidrojen, sanayi politikası, iklim stratejisi ve yatırım koordinasyonunu bir araya getiren kapsamlı bir yönetişim çerçevesi gerektirir. Bu çerçevede öne çıkan beklentilerden biri, yeşil hidrojenin 2025 yılına kadar önemli maliyet düşüşleri yaşamasıdır. Nitekim yenilenebilir kaynaklar bakımından zengin bölgelerde yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin kilogram başına 2 avronun altına düşebileceği öngörülmektedir (IRENA, 2020). Ancak bu maliyet düşüşü yalnızca teknolojik ilerlemelerin sonucu değildir; aynı zamanda ölçek ekonomileri, düzenleyici istikrar ve kamu–özel sektör ortak yatırımları ile mümkündür. Elektroliz teknolojilerindeki gelişmeler ve yenilenebilir enerji fiyatlarındaki düşüş bu süreci desteklemektedir. Bu düzleştirilmiş maliyet seviyesi,

yeşil hidrojenin fosil yakıt bazlı hidrojen ve diğer enerji kaynaklarıyla rekabet edebilir hâle gelmesi açısından kritik önemdedir (IRENA, 2023).

IRENA'nın 1,5 °C Senaryosu, 2030 yılına kadar küresel emisyonlarda %43'lük bir azaltım gereksinimine işaret etmektedir. Bu hedef, enerji sistemi genelinde verimlilik artışlarının yanı sıra, hidrojen gibi platform teknolojilerinin kilit dönüşüm sektörlerinde hızla devreye alınmasını ve yenilenebilir enerji arzında hızlı bir genişlemeyi zorunlu kılmaktadır. Bu yönüyle yeşil hidrojen, teknolojik ve finansal kaynakları düşük karbonlu yollara yönlendiren "yönlendirici" politika hedefleri açısından önemli bir fırsat sunmaktadır (Takkı, 2024).

Yeşil hidrojen her sektörde evrensel bir çözüm değildir; ancak alternatiflerin sınırlı ya da maliyet açısından elverişsiz olduğu ilgili sektörler için kritik bir araçtır. Enerji dönüşümüne başarılı biçimde entegre edilebilmesi; elektrik şebekesinin aşırı yüklenmesini önlemek ve dolaylı fosil yakıt bağımlılığını azaltmak amacıyla, hidrojen üretiminin ayrılmış (dedike) yenilenebilir projelerle entegrasyonunu içeren sistem entegrasyonunu gerektirmektedir. Aynı zamanda çelik, kimyasallar, taşımacılık ve uzun vadeli depolama gibi alanlarda, hidrojenin alternatiflerin yerine değil, tamamlayıcı bir çözüm olarak hedefli biçimde kullanılmasına odaklanılmalıdır.

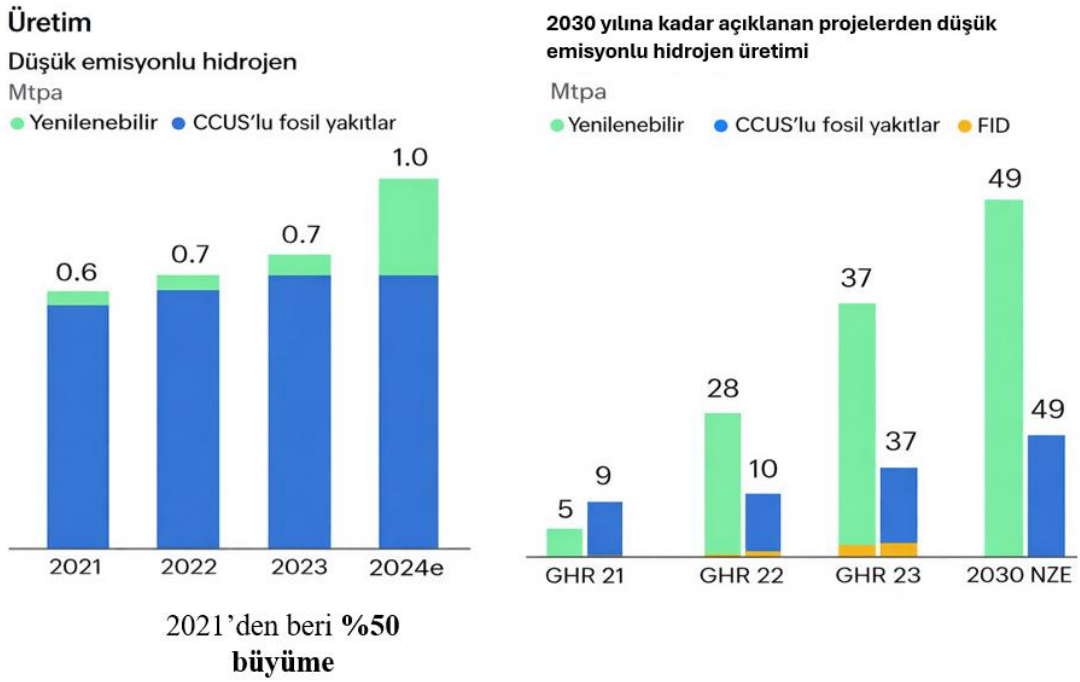
Bu çerçeve, gelişmekte olan ülkelerin yalnızca hidrojen ihracatçısı değil, aynı zamanda hidrojenin üreticisi ve nihai kullanım faydalanıcısı olabilmesini sağlayan adil ve kapsayıcı bir yönetişim anlayışını da zorunlu kılmaktadır (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023). Enerji dönüşümlerinin başarısı, teknolojik inovasyon ile kurumsal adaptasyonun birlikte evrimleşmesine bağlıdır.

Uluslararası yatırımlar artmaya devam ederken, teknik potansiyelin iklim istikrarı için gerekli terawatt ölçeğinde uygulanabilir projelere dönüştürülebilmesi için önümüzdeki on yılda olağanüstü düzeyde bir işbirliği gerekmektedir. Bu bağlamda ihtiyaç duyulan; hidrojen gelişimini kapsayıcı ve bölgesel olarak dengeli büyümenin bir aracı hâline getirebilmek amacıyla, uluslararası finansmanı, ulusal sanayi stratejilerini ve yerel inovasyon ekosistemlerini birbirine bağlayan çok düzeyli bir yönetişim yapısıdır.

1.3. Yeşil Hidrojenin Geleceği

Daha önce tartışıldığı üzere, yeşil hidrojen endüstrilerin karbonsuzlaştırılmasını mümkün kılarak küresel enerji görünümünü dönüştürme potansiyeline sahiptir. Ancak bu etki yalnızca emisyon azaltımıyla sınırlı değildir; aynı zamanda endüstriyel kalkınmada yeni bir dönemin kapısını aralayabilir. Teknolojik ilerlemeler, artan uzmanlaşma ve düşen maliyetler, yeşil hidrojen üretimini giderek daha ölçeklenebilir ve uygulanabilir hâle getirmektedir. Bu çerçevede, yeşil hidrojenin 2050 yılına kadar küresel hidrojen talebinin yaklaşık üçte ikisini karşılaması ve net sıfır enerji sistemlerinin kilit bir bileşeni hâline gelmesi beklenmektedir. Özellikle dekarbonizasyonu zor endüstriler için saf bir alternatif sunması, yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkelerde ekonomik kalkınmayı destekleyen stratejik bir araç olarak öne çıkmasını sağlamaktadır (Jensen, 2025).

Şekil 8: Düşük Emisyonlu Hidrojen Üretim Projeksiyonu (2030)



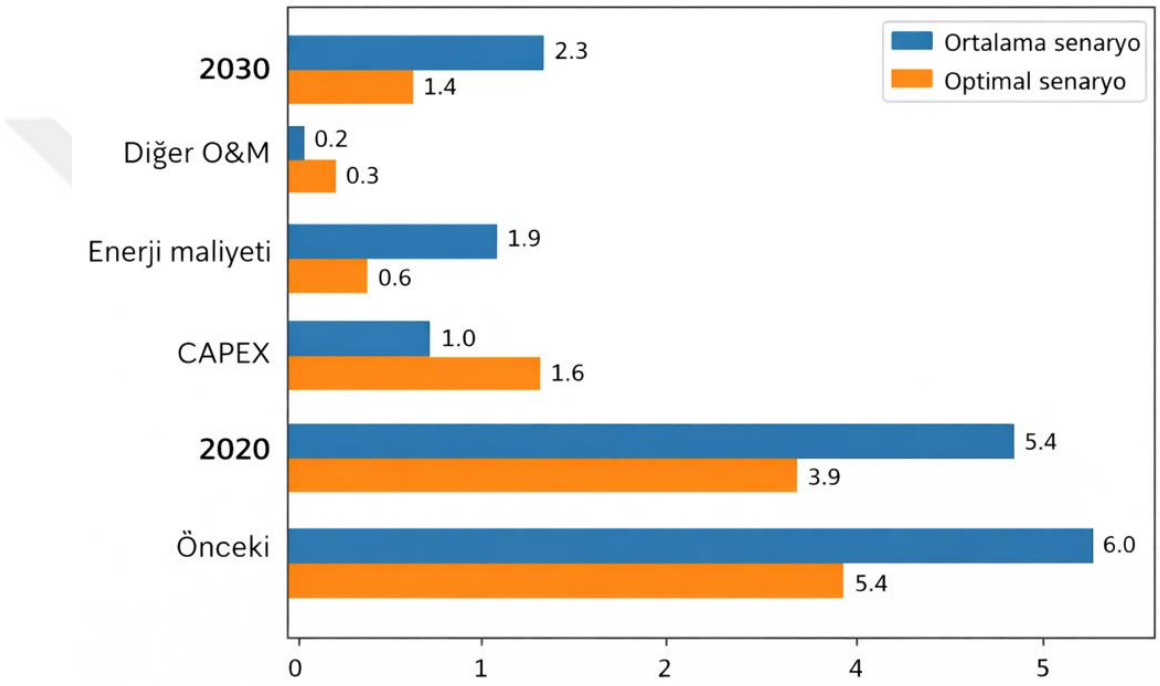
Kaynak: IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024 (CC BY 4.0)

1.3.1. Maliyet Eğilimleri ve Ölçeklenme

Uluslararası Enerji Ajansı, düşen yenilenebilir enerji (güneş ve rüzgâr) maliyetleri, elektrolizör verimliliğindeki artışlar ve ölçek ekonomileri sayesinde, küresel

elektrolizör kapasitesinin 2030 yılına kadar 134–240 GW aralığına ulaşacağını öngörmektedir. Günümüzde 5,4–6 ABD doları/kg seviyesinde olan yeşil hidrojen üretim maliyetinin, ortalama teknoloji ve verimlilik iyileşmeleri gerçekleştiği takdirde, 2030 yılında yaklaşık 1,4 ABD doları/kg düzeyine gerileyebileceği tahmin edilmektedir (IEA, 2025).

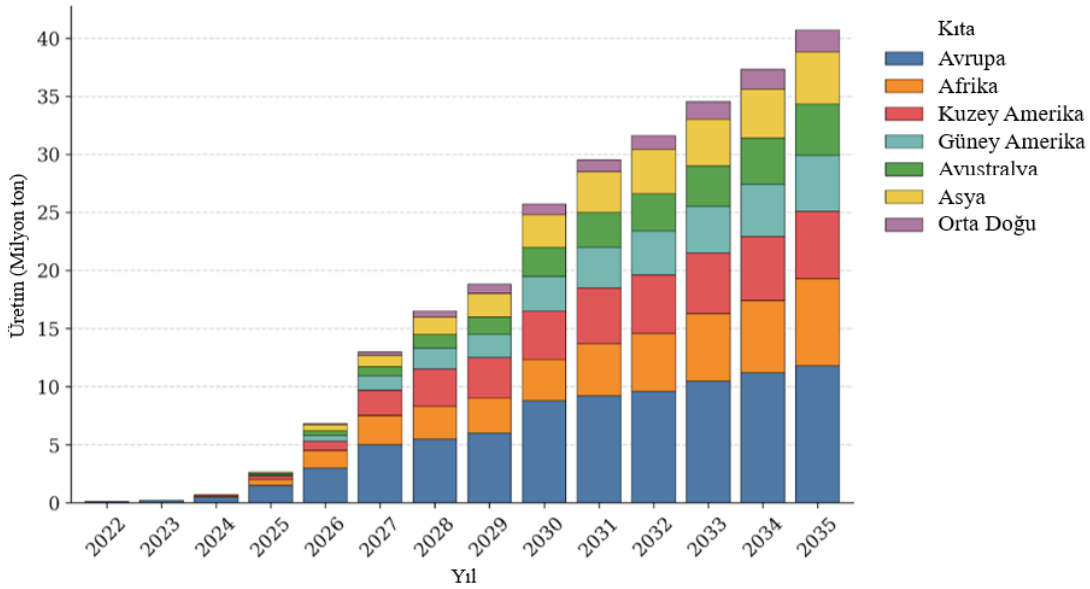
Şekil 9: Yeşil Hidrojen Maliyet Projeksiyonları (2020-2030)



Kaynak: Hydrogen Council 2021. Statista'dan yazar tarafından uyarlanmıştır. Erişim tarihi: 29 Temmuz 2025.

Üretim maliyetlerinin 2030 yılına kadar yaklaşık %50 oranında düşmesi, 2050 yılına gelindiğinde ise elverişli bölgelerde (Orta Doğu, Avustralya ve Sahra Altı Afrika gibi) 1–1,5 €/kg aralığına kadar gerilemesi beklenmektedir. Bu maliyet görünümü, doğal kaynak bakımından zengin gelişmekte olan ülkeleri potansiyel ihracat odaklı yeşil hidrojen üreticileri olarak konumlandırmaktadır (PWC, 2025). Bu kapsamda Kuzey Afrika, Orta Doğu ve Latin Amerika, yenilenebilir kaynak donanımlarını değerlendirerek fosil yakıt ihracatçılarından yeşil teknoloji üreticilerine dönüşebilecekleri "yeni enerji coğrafyaları" olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 10: Küresel Yeşil Hidrojen Üretim Tahminleri

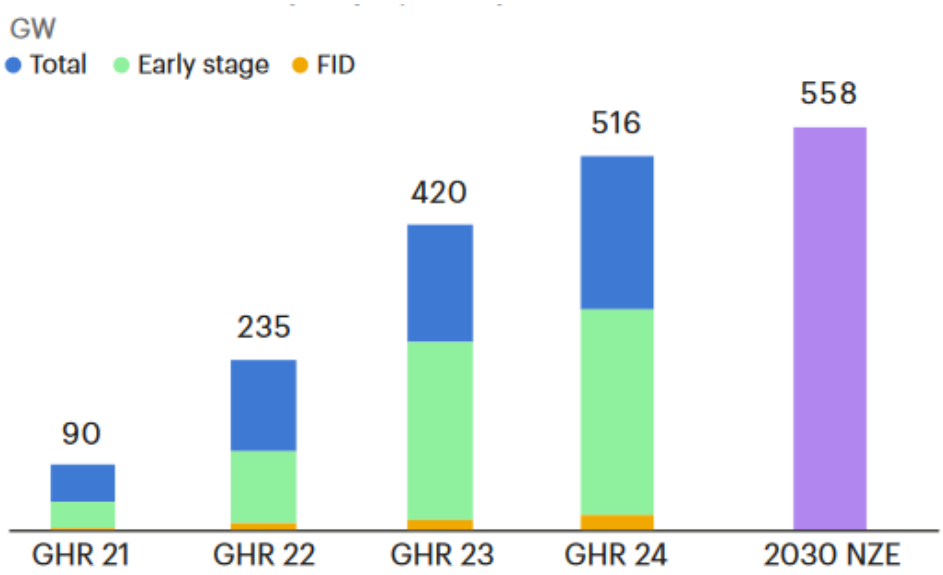


Kaynak: Rystad Energy 2023. Africa and Europe set to be the dynamos for the global green hydrogen economy'den yazar tarafından uyarlanmıştır.

1.3.2. Küresel Proje Gelişmeleri

Küresel ölçekte yeşil hidrojenin yaygınlaşması, politika, finansman ve bölgesel dinamiklerin nasıl etkileştiğini gösteren vitrin projeler aracılığıyla ivme kazanmaktadır. Avrupa'da bu süreç, özel sektör yatırımları ile kurumsal koordinasyonun birlikte ilerlediği bir model üzerinden şekillenmektedir. Buna karşılık Mısır gibi bazı gelişmekte olan ülkeler, yüksek yenilenebilir enerji potansiyellerinden ve doğrudan yabancı yatırımlardan yararlanarak ihracat odaklı hidrojen merkezleri kurmaya dayalı farklı bir yaklaşım sergilemektedir (IEA, 2024; European Commission, 2020). Bu model çeşitliliği, yeşil hidrojen ekonomisinin tek bir kalkınma yoluna yakınsamaktan ziyade, farklı bölgesel yollar boyunca evrildiğini göstermektedir. Yerel kaynak donanımları, kurumsal olgunluk düzeyi ve teknolojik kapasiteler, ülkelerin ve bölgelerin izlediği özgül "evrimsel yolları" belirleyen temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 11: Duyurulan Elektrolizör Projeleri (2030)



Kaynak: IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024 (CC BY 4.0)

1.3.3. Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Fırsatlar

Yeşil hidrojen, gelişmekte olan ülkeler için düşük karbonlu sanayileşmeye sıçrama imkânı sunan önemli bir araçtır. Özellikle Afrika bağlamında enerji dönüşümünün, 2050 yılına kadar güneş ve rüzgâr dâhil yerli yenilenebilir kaynakların hem iç pazarlar hem de ihracat amacıyla kullanılması sayesinde yaklaşık 26 milyon istihdam yaratabileceği öngörülmektedir (Jensen, 2025).

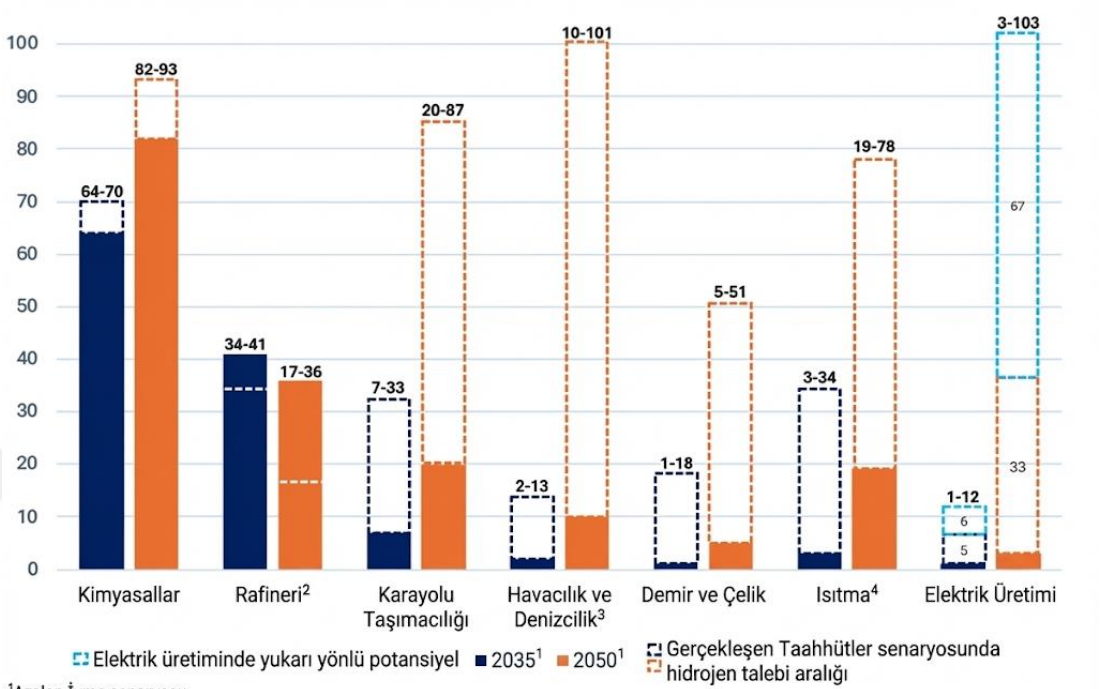
Bunun yanı sıra yeşil hidrojen, ekonomik dönüşüm açısından da önemli fırsatlar barındırmaktadır. Hidrojen bazlı gübre, çelik ve kimyasal üretim yoluyla değer zincirinde yukarı yönlü hareket edilmesi, ülkelerin endüstriyel yükseltme kapasitesini artırmaktadır. Aynı zamanda hidrojen değer zincirlerinin yenilenebilir altyapı ve güçlü eğitim sistemleri ile bütünleştirilmesi, milyonlarca nitelikli iş yaratma potansiyeline sahiptir. Buna ek olarak, merkezi olmayan hidrojen çözümleri, şebekeden bağımsız sistemlerin dayanıklılığını artırarak enerjiye erişimi güçlendirebilmektedir (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023). Bu örüntüler, her seçilmiş ülkenin dönüşüm maliyetleri ile yeşil

hidrojen fırsatlarının kendine özgü bir bileşimiyle karşı karşıya olduğunu göstermekte olup, bu farklılaşmalar Tablo 3'te özetlenmektedir.

1.3.4. Zorluklar ve Beklentiler

Yeşil hidrojen, küresel karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına önemli katkılar sunma potansiyeline sahip olsa da, hidrojen temelli bir endüstriyel sisteme geçiş hâlen erken bir aşamadadır. 2024 itibarıyla küresel hidrojen üretiminin %1'inden daha azı düşük emisyonlu nitelik taşımaktadır. Bu durum yalnızca teknolojilerin yeterince olgunlaşmamış olmasını değil, aynı zamanda bölgeler arası yayılımı sınırlayan kurumsal ve finansal kısıtları da yansıtmaktadır (IEA, 2024). IEA'ya göre, önümüzdeki dönemde yatırım artışı, teknolojik ilerleme ve kamu teşvikleri, yeşil hidrojen piyasasının büyüklüğünü 2030 yılı civarında 300–700 milyar ABD doları eşiğinin üzerine taşıyabilir (IEA, 2024). Ayrıca devlet destekli finansman mekanizmaları, mevcut yenilenebilir varlıklar ve sübvansiyonlarla birlikte değerlendirildiğinde, yeşil hidrojenin maliyet açısından rekabetçi hâle gelmesi mümkündür (Jose Signoret, Milla Cieszkowsky, 2024). Çelik, amonyak, taşımacılık ve elektrik gibi farklı sektörlerin karbonsuzlaştırılması söz konusu olduğunda, yeşil hidrojen temel ve ölçeklenebilir bir çözüm olarak değerlendirilmelidir. Yeşil hidrojenin potansiyel talebinin sektörel dağılımı, Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterilmektedir.

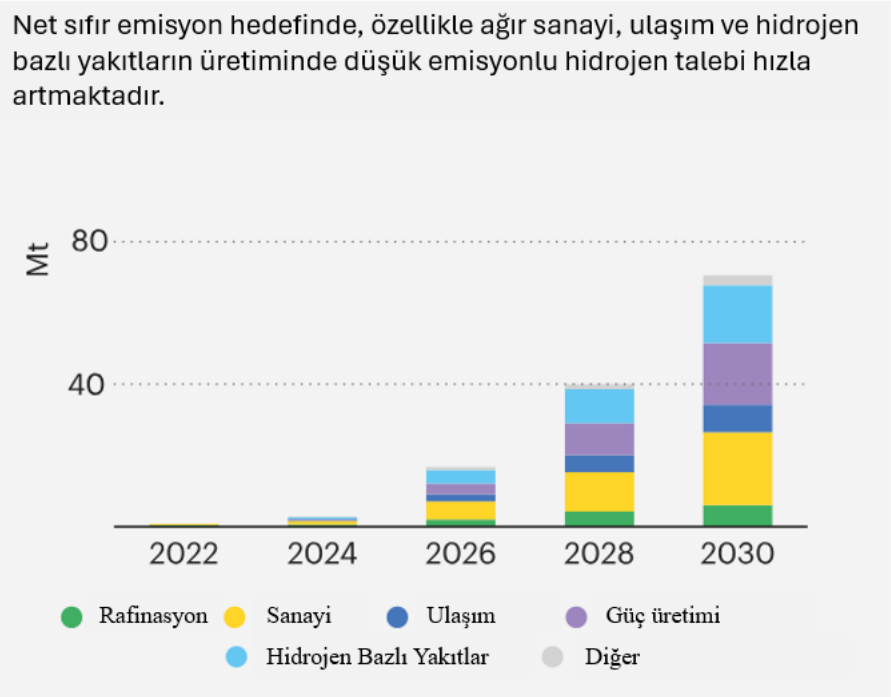
Şekil 12: Sektörel Hidrojen Talebi



[1]Azalan İvme senaryosu
[2]Geleneksel yakıt rafinerisi ve biyoyakıt hidrojenasyonu ve rafinerisini içerir
[3]Havacılık ve denizcilik, hidrojenin ve kerosen, dizel, metanol, benzin ve amonyak dahil hidrojen kaynaklı sentetik yakıtların doğrudan kullanımını içerir. Bu kategori ayrıca karayolu taşımacılığında bazı hidrojen kaynaklı sentetik yakıtları da içerir.
[4]Diğer endüstri ve binalarda ısıtma için hidrojen talebini içerir

Kaynak: McKinsey & Company 2024. Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook'tan Yazar tarafından uyarlanmıştır.

Şekil 13: Düşük Emisyonlu Hidrojen Talep Projeksiyonu



Kaynak: IEA (2023). Hydrogen Net Zero Emissions Guide (CC BY 4.0).

Ancak bu dönüşüm, coğrafyalar arasında eşit biçimde gerçekleşmemektedir. Ülkelerin sahip olduğu mevcut fosil yakıt altyapıları, bu altyapıların yarattığı yol bağımlılığı ve kurumsal kapasite farklılıkları, yeşil hidrojenin yayılım hızını ve yönünü belirlemektedir. Daha olgun ekonomiler, güçlü inovasyon ekosistemleri ve sermaye erişimi avantajlarından yararlanırken, birçok gelişmekte olan bölge yatırım açıkları ve parçalı politika çerçeveleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu eşitsiz yayılım, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) açısından özellikle dikkat çekicidir; zira bir yandan asimetrik kapasite oluşumlarını ortaya koyarken, diğer yandan deneysellik ve politika orkestrasyonu yoluyla yeni yol yaratma olanaklarına da işaret etmektedir.

Bu bağlamda temel engeller ağırlıklı olarak ekonomik ve finansal, teknolojik, kurumsal ve sosyal ile bölgesel eşitlik boyutlarında yoğunlaşmaktadır. Bu engellerin aşılması, teknolojiler, piyasalar ve kurumlar arasında birlikte evrimi destekleyen; aynı zamanda bölgesel uzmanlaşma ve kapasite geliştirme yoluyla kapsayıcı dönüşümleri teşvik eden politika çerçevelerini gerektirmektedir. Dolayısıyla yeşil hidrojen dönüşümü, yalnızca çevresel bir meydan okuma değil; eşitsiz yayılım, kurumsal

öğrenme ve küresel endüstriyel coğrafyaların yeniden yapılandırılması ile karakterize edilen evrimsel bir ekonomik süreç olarak değerlendirilmelidir.

Bu çerçevede yeşil hidrojene yönelik küresel yönelim, enerjinin ekonomik coğrafyasında temel bir kırılmaya işaret etmektedir. Gelişmekte olan ülkeler açısından bu süreç, enerji sistemlerindeki ataleti kırmayı (yol bağımlılığı) ve sahip olunan yenilenebilir varlık tabanlarını, yeni endüstriyel kapasiteler için bir basamak taşı olarak kullanmayı (yol yaratma) zorunlu kılmaktadır. Bu bölüm, söz konusu dönüşümün "ne" ve "neden" boyutlarını ana hatlarıyla ortaya koymuştur. Bölüm 2, bu yapısal değişimlerin teorik olarak "nasıl" gerçekleştiğini açıklamak üzere Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) çerçevesini kullanacak; Bölüm 3 ise seçilmiş ülkelerin bu endüstriyel avantajı elde etme kapasitesini AHS yöntemi ile ampirik olarak ölçecektir.

Seçilmiş gelişmekte olan ülkelerde yol bağımlılığı, ağırlıklı olarak mevcut enerji ve endüstriyel sistemler üzerinden şekillenmektedir. Rusya ve Güney Afrika gibi ülkeler kömür ve hidrokarbon değer zincirlerine güçlü biçimde kilitlenmiş durumdayken; Fas ve Mısır gibi ülkeler ithal teknolojilere ve dış finansmana yüksek ölçüde bağımlıdır. Buna karşılık, bu ülkelerin sahip olduğu bol yenilenebilir enerji kaynakları, yeşil hidrojen temelli potansiyel yeni bir yolun maddi temelini oluşturmaktadır.

Bu ülkelerin fosil yakıt temelli yollardan yeşil hidrojen bazlı endüstriyel yollara geçiş yapıp yapamayacağı; kurumsal kapasitelerine, endüstriyel yetkinliklerine ve politika tercihlerine bağlıdır. Bölüm 2, bu yol bağımlı dinamikleri daha ayrıntılı biçimde incelemek üzere Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımını kullanmaktadır. Bu çalışmada ülkelerin hidrojen üretimindeki "mevcut konumu" şu boyutlar üzerinden değerlendirilmektedir:

(i) yenilenebilir elektrik maliyeti ve kapasite faktörü (arz avantajı),

(ii) elektrolizör ve ilgili ekipmanlarda yerli üretim/ithalat bağımlılığı (teknoloji bağımlılığı),

(iii) hidrojenin tüketileceği sanayi ölçeği (talep tabanı),

(iv) ihracata yönelik liman, boru hattı ve sertifikasyon uyumu gibi ticaret altyapısı.

Bu ölçütler, yol bağımlılığının nerede yoğunlaştığını ve yol kırmanın hangi politika ve yatırım kombinasyonlarıyla mümkün olabileceğini görünür kılmaktadır. Ülkelere

özgü bu kilitlenme düzeyleri ve dönüşüm potansiyelleri, seçilmiş gelişmekte olan ülkelerin mevcut yol bağımlılıklarını, mevcut dönüşüm konumlarını ve olası yeni hidrojen temelli endüstriyel yolları karşılaştırmalı biçimde sunan Tablo 3'te özetlenmektedir..

1.4. Seçilmiş Ülkelerin Mevcut Durumu

Yeşil hidrojene ilişkin uluslararası söylemi, Bölüm 3'te sunulan ampirik bulgularla ilişkilendirebilmek için seçilmiş gelişmekte olan ülkelerin mevcut konumlarının net biçimde ortaya konulması gerekmektedir. 2019–2023 döneminde incelenen ülkelerin tümü, bir ekonominin hâlihazırda inşa edilmiş altyapıları ve kurumsal yapıları aracılığıyla tarihsel yörüngesine bağlı kaldığını ifade eden, farklı derecelerde yol bağımlılığı sergilemektedir (bkz. Bölüm 2).

Seçilmiş gelişmekte olan ülkeler açısından yol bağımlılığı, enerji ve sanayi sistemlerinin geçmişteki yatırım kararlarıyla şekillenmiş yapılar üzerinden devam ettiğini göstermektedir. Bazı ülkeler (örneğin Rusya ve Güney Afrika) kömür ve hidrokarbon değer zincirlerine güçlü biçimde kilitlenmiş durumdayken (karbon kilitlenmesi), diğerleri (örneğin Fas ve Mısır) daha çok teknolojik ithalat bağımlılığı ile karşı karşıyadır. Buna karşın bu ülkelerin tümü, sahip oldukları geniş yenilenebilir enerji potansiyelleri sayesinde yeşil hidrojen üzerinden yeni bir endüstriyel yol izleme olanağına sahiptir.

Bu ülkeye özgü yapısal özelliklerin karşılaştırmalı analizi; mevcut dönüşüm konumlarını, temel zorluklarını ve yeşil hidrojen aracılığıyla ortaya çıkabilecek gelecek endüstriyel fırsatlarını özetleyen Tablo 3'te sunulmaktadır.

Özetle bu bölüm, sürdürülebilir enerji dönüşümünü; emisyon azaltımı, enerji güvenliği, sanayi rekabet gücü ve kurumsal kapasite boyutlarını birlikte ele alan bütüncül bir çerçeve içinde tanımlamış ve yeşil hidrojeni bu dönüşümün yol kırıcı bir unsuru olarak konumlandırmıştır.

Tablo 3: Seçilmiş Ülkelerin Enerji Dönüşüm Profilleri (2019-2023)

Ülke	Mevcut Yol Bağımlılığı (Enerji ve Sanayi)	Mevcut Dönüşüm Konumu ve Yenilenebilir Potansiyel (2019–2023)	Ana Dönüşüm Zorlukları	Yeşil Hidrojen Yoluyla Potansiyel Yeni Yol
Brezilya	Ulaşımda fosil yakıtlara bağımlılık; yerleşik biyoyakıt endüstrisi	Çok yüksek hidroelektrik, güneş ve rüzgâr potansiyeliyle yönlendirilen genişleyen yenilenebilirler; ılımlı endüstriyel karbonsuzlaşma	Fosil yakıta bağımlı sanayi ve ulaşım; uzak bölgelerde altyapı açıkları	Gübreler için hidrojen, biyo-bazlı hidrojen, yeşil yakıt ihracatı
Rusya	Petrol ve gaz ihracatına güçlü bağımlılık; karbon yoğun sanayi	Bazı bölgelerde iyi rüzgâr kaynaklarına rağmen yavaş dönüşüm; batık varlık riski	Petrol ve gaz ihracatına güçlü yol bağımlılığı; jeopolitik riskler	İhracat çeşitlendirmesi ve düşük karbonlu endüstriyel kullanım için hidrojen
Hindistan	Kömüre bağımlı enerji sektörü; hızla büyüyen enerji talebi	Yüksek güneş potansiyeliyle desteklenen hızlı yenilenebilir genişleme; şebeke ve finansman kısıtlamaları	Şebeke kısıtlamaları; finansman ihtiyaçları; yüksek enerji talebi büyümesi	Çelik, kimyasallar, ağır taşımacılık için yeşil hidrojen; yurt içi pazar ölçeği
Çin	Büyük fosil bazlı endüstriyel taban; bölgesel dengesizlikler	Devasa üretim tabanı ve kapasitesiyle desteklenen yenilenebilirlerde en büyük küresel yatırımcı	Yüksek genel emisyonlar; dönüşümde bölgesel dengesizlikler	Elektrolizör üretimi ve hidrojen teknolojileri için küresel merkez
Güney Afrika	Kömüre kilitlenmiş elektrik sistemi; madenciliğe bağımlı ekonomi	İyi güneş ve rüzgâr kaynaklarına rağmen büyük sosyal ve ekonomik dönüşüm zorlukları	Derin kömür bağımlılığı; dönüşümün sosyal maliyetleri	Hidrojen bazlı yeşil çelik ve ihracat koridorları

Mısır	İthal teknolojilere bağımlılık; gaza ağırlıklı enerji karması	Yüksek güneş potansiyelinden yararlanan artan yenilenebilir kapasite; altyapı sınırlamaları	Su kısıtlamaları; kurumsal ve finansman zorlukları	İhracat odaklı yeşil amonyak ve hidrojen projeleri
Fas	Sınırlı endüstriyel taban; ithal yakıtlara yüksek bağımlılık	Kıyılarda çok yüksek güneş ve rüzgâr potansiyelinden yararlanan güçlü yenilenebilir büyüme	Sınırlı endüstriyel taban; ekipman ithalatına bağımlılık	Yeşil hidrojen üretimi ve ihracatı; yeni endüstriyel kümelerin oluşturulması
Türkiye	Enerji ithalatına yüksek bağımlılık; karbon yoğun sanayi sektörleri	Büyüyen yenilenebilir payı ve kapasitesi; stratejik transit konumu	Yüksek enerji ithalat bağımlılığı; şebeke ve depolamada yatırım ihtiyaçları	Sanayide (çelik, kimyasallar) yeşil hidrojen kullanımı ve bölgesel enerji merkezi olarak konum

Kaynak: Clean Hydrogen Joint Undertaking (2024), GIZ/H2-diplo (2024), Green Hydrogen Organisation (2022; 2023; 2025), IEA (2024), IRENA (2022; 2023), MarketsandMarkets (2024), EIN Presswire (2024) ve The Silicon Review (2024) raporları ve verileri kullanılarak yazar tarafından derlenmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

YEŞİL HİDROJEN VE EVRİMSEL EKONOMİK COĞRAFYA

Bölüm 1, yeşil hidrojenin küresel sürdürülebilir enerji dönüşümündeki rolünü ortaya koymuş; özellikle gelişmekte olan ülkelerde çelik, amonyak ve ağır taşımacılık gibi sektörlerin karbonsuzlaştırılması gereksinimi başta olmak üzere, bu ülkelerin karşılaştığı özgün zorlukları vurgulamıştır. Bu arka plan üzerine inşa edilen bu bölüm, gelişmekte olan ülkelerin endüstriyel yapılarını neden ve nasıl dönüştürebileceklerini açıklayan teorik çerçeveyi sunmaktadır.

Bölüm 1 yeşil hidrojenin "ne" olduğu ve "neden" önemli olduğu sorularına odaklanırken, bu bölüm Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımını kullanarak dönüşümün "nasıl" gerçekleştiğini ele almaktadır. EEG, yeşil hidrojen analizine özellikle uygundur; çünkü bu teknoloji bölgeye özgü becerilere, kümülatif öğrenme süreçlerine ve kurumsal uyuma güçlü biçimde bağlıdır. Bu özellikler, ülkeler arasındaki farklılıkların yalnızca doğrusal ya da salt piyasa temelli açıklamalarla kavranmasını yetersiz kılmaktadır. Dolayısıyla EEG, benzer doğal kaynak donanımlarına sahip gelişmekte olan ülkelerin neden farklı hız ve biçimlerde dönüşüm gerçekleştirdiğini açıklamak için güçlü bir kavramsal araç sunmaktadır.

Bu teorik temel, Bölüm 3'teki ampirik analiz açısından belirleyicidir. Yol bağımlılığı, kilitlenme ve yol yaratma kavramları soyut teorik tartışmalar olmaktan ziyade, çalışmada kullanılan Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) göstergelerinin seçiminde doğrudan yol gösterici olmaktadır. Örneğin bir ülkenin tekno-ekonomik kapasiteleri, mevcut yol bağımlılığının bir göstergesi olarak ele alınırken; kurumsal kalite, yeni bir yol yaratma potansiyelini yansıtmaktadır (Kogler vd., 2023).

Bu çalışmada kullanılan AHS kriterleri, EEG boyutlarının işlevselleştirilmiş temsilleri olarak kurgulanmıştır. Teknolojik olgunluk ve altyapı, mevcut bölgesel kapasiteleri; pazar potansiyeli ilişkili çeşitliliği; politik ve düzenleyici istikrar ise kurumsal yol bağımlılığını yansıtmaktadır. Bu yapı, nicel modelin EEG çerçevesine teorik olarak sağlam biçimde dayanmasını sağlamaktadır.

Yeşil hidrojen, gelişmekte olan ülkelere ekonomik coğrafya dinamiklerinden yararlanma ve bu dinamikleri yeniden şekillendirme olanağı sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir gelişmekte olan ülke, coğrafi konumunu avantaja çevirerek yeni endüstriyel faaliyet alanları oluşturabilir. Bu yenilenebilir enerji kapasitesi, yeşil hidrojenin yerel olarak üretilmesini mümkün kılmakta ve ekonomik değer yaratımını desteklemektedir. Aynı zamanda bu ülkelerin petrol fiyatlarındaki dalgalanmalara ve enerji arzı kesintilerine olan kırılganlıklarını azaltmaktadır (Silva, 2023). Bu bağlamda, Latin Amerika ve Karayipler gibi bölgeler geniş yenilenebilir enerji kaynakları sayesinde yeşil hidrojeni stratejik bir kalkınma fırsatı olarak değerlendirebilmektedir (Silva, 2023). Benzer şekilde Şili'de Atacama Çölü veya Fas'ta Sahra bölgesi gibi güneş enerjisi potansiyeli son derece yüksek alanlar, yeşil hidrojen üretim kümelerinin ortaya çıkması için elverişli mekânsal koşullar sunmaktadır.

Bu süreçler aracılığıyla endüstriyel sistemler, Schumpeterci dönüşüm dinamikleri çerçevesinde köklü biçimde yeniden yapılandırılmaktadır. Ülkeler, yenilenebilir enerjiye dayalı yeşil hidrojen üzerinden yeni bir endüstriyel yol oluşturma ve böylece fosil yakıt bağımlılığından çıkma fırsatı elde etmektedir. Yeşil hidrojen, çok sayıda nihai kullanım sektörünün karbonsuzlaştırılmasını mümkün kılmakta; benimsenme düzeyi arttıkça üretim kapasitesi de hızla genişlemektedir. Nitekim OECD (2022), 2050 yılına kadar küresel hidrojen üretiminin en az üçte ikisinin yeşil hidrojen olacağını ve bunun net sıfır emisyonlu küresel enerji sistemine geçişi önemli ölçüde kolaylaştıracağını öngörmektedir (OECD, 2022).

Endüstriyel evrim süreçlerinde ülkeler sıklıkla teknolojik kilitlenme, finansman eksikliği ve kurumsal engeller gibi çok katmanlı zorluklarla karşılaşmaktadır. Küresel pazarda rekabet gücünün korunması ve işgücü becerilerinin dönüşüme uyarlanması gibi yapısal değişimler, ülkelerin değer zincirlerindeki avantajlarını ne ölçüde kullanabildiklerini ve bu dönüşümden nasıl etkilendiklerini açıklamak açısından Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) çerçevesiyle anlamlandırılabilmektedir (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023; Boschma, vd., 2006).

Bölüm 1'de yeşil hidrojenin 'ne' olduğu ve 'neden' önemli olduğu ele alınmıştır. Bu bölüm ise Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımını kullanarak dönüşümün 'nasıl' gerçekleştiğini teorik olarak temellendirmektedir. EEG yaklaşımı; büyüme yörüngelerini çerçevelemek ve yol bağımlılığı, ilişkili çeşitlilik ile yol yaratma kavramlarının AHS kriterleriyle (kurumsal kalite/enerji bağımlılığı, endüstriyel taban/beşeri sermaye, politika–yatırım koordinasyonu) nasıl eşleştirildiğini ortaya koymak amacıyla benimsenmiştir. Bu bağlamda yeşil hidrojen (YH_2), kıyı endüstriyel kümeleri ve kapasite yükseltme süreçleri aracılığıyla fosil tabanlı kilitlenmeleri "açan" bir mekanizma olarak yorumlanmaktadır. Özellikle politika çerçeveleri, yol şekillendirme süreçlerinde bu evrimin kapsayıcı sonuçlara yönlendirilmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir.

Gelişmekte olan bir ülkede rüzgâr çiftlikleri, güneş enerjisi santralleri ve elektroliz tesislerinden oluşan bir YH_2 kümesi; bilgi yayılımlarını hızlandırarak, maliyetleri düşürerek ve yerel tedarik ağlarını güçlendirerek bölgesel kalkınmayı destekleyebilir. Aynı zamanda YH_2 ihracatçısı konumuna gelen gelişmekte olan ülkeler, kendi sanayilerinin yerel ölçekte karbonsuzlaşmasını kolaylaştırabilir ve karbon yoğun yol bağımlılığından uzaklaşabilir. YH_2 ihracatı arttıkça, geleneksel fosil tabanlı projelerin kurulması ve genişlemesi de sınırlanabilir. Bu şekilde karbonsuzlaşma ile sanayileşmenin birlikte ilerlemesi, yeşil hidrojeni hem çevresel hem de ekonomik büyüme açısından güçlü bir teşvik aracına dönüştürmektedir. Bu durum, adaptif bölgesel stratejiler ve destekleyici politikalar yoluyla yönlendirilen mutasyonel fırsatların, yenilenebilir kaynakları sürdürülebilir mekânsal kalkınmanın katalizörlerine nasıl dönüştürebileceğini göstermektedir.

2.1. Evrimsel Ekonomik Coğrafya Yaklaşımı

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG), ekonomik büyümeyi ürün ve firma inovasyonları tarafından yönlendirilen bir dallanma süreci olarak ele almaktadır. Bu yaklaşıma göre her yeni ürün ya da teknoloji, firmalar ve şehirler için genişleme veya çeşitlenme yönünde yeni fırsatlar yaratmaktadır. Bu süreç, örgütsel düzeyde kapsam ekonomileri ve Marshallcı yığılma ekonomileri üretmekte; böylece endüstriyel yoğunlaşma ve kentsel uzmanlaşmada güçlü yol bağımlılıklarını pekiştirmektedir

(Frenken vd., 2007). Bu nedenle mekânsal ekonomi, statik denge koşullarından ziyade firmaların girişi, büyümesi, çıkışı ve yer değiştirmesinin tarihsel dinamikleri üzerinden şekillenmektedir (Frenken vd., 2007).

EEG çerçevesinde yeni sektörler çoğunlukla önceden var olan yerel bilgi ağlarından ve bölgesel kolektif öğrenme süreçlerinden doğmaktadır. Bu bilgi birikimi ve öğrenme dinamikleri, ortaya çıkan endüstrilerin evrimsel gelişimini desteklemektedir (Boschma vd., 1999). Pratikte bölgeler, sahip oldukları yerleşik yetkinliklerle ilişkili endüstrilerde uzmanlaşma eğilimi göstermektedir. Ampirik çalışmalar, ekonomik çeşitlenmede güçlü bir yol bağımlılığı bulunduğunu ortaya koymaktadır: Bir bölgenin mevcut üretim yapısıyla teknolojik olarak ilişkili sektörler ortaya çıkma ve kalıcı olma eğilimindeyken, ilişkisiz sektörler genellikle başarısız olmakta ya da pazardan çekilmektedir (Neffke vd., 2011).

Bu nedenle bölgesel yetkinlikler, uzun vadeli büyüme yörüngelerini belirleyici bir rol oynamaktadır. Bir bölgedeki mevcut ilişkili çeşitlilik, yani bilgi ve beceri setleri, yeni sektörlerin ortaya çıkma olasılığını artırmakta ve yerleşik kapasitelerin yeniden kombinasyonu yoluyla yeni büyüme yollarını mümkün kılmaktadır (Frenken vd., 2007). Gelişmekte olan ülkeler bağlamında bu durum, örneğin güneş paneli üretimi veya rüzgâr türbini bakımı alanlarında güçlü bir tabana sahip bir bölgenin, elektrolizör üretimi gibi ilişkili bir yeşil hidrojen alt sektörüne yönelme olasılığının neden daha yüksek olduğunu açıklamaktadır. Benzer şekilde, Brezilya'nın şeker kamışı üretimindeki yerleşik uzmanlığı ve biyoetanol lojistik altyapısı, biyokütle temelli yeşil hidrojene geçişi kolaylaştırabilecek ilişkili bir bilgi ve kapasite zemini sunmaktadır.

Özetle Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG), kümelerin ve endüstrilerin gelişiminin derinden tarihsel bir süreç olduğunu göstermektedir. Doğmakta olan sektörler, yeni kalkınma yolları oluşturmak için yerel uzmanlıktan yararlanırken; önceki uzmanlaşmalara dayalı yol bağımlılığı, bir ülke ya da bölgenin endüstriyel evrimini yönlendirmektedir (Neffke vd., 2011).

EEG, statik denge yaklaşımları yerine dinamik ve mekâna bağımlı büyüme yollarını modellemektedir. Bu yönüyle, Bölüm 3'te teorinin işlevselleştirilmesine (örneğin kapasite yakınlığı, kilitlenme maruziyeti ve politika yönelimi gibi göstergeler

üzerinden) olanak tanımakta ve yeşil hidrojen (YH_2) bağlamında ülke büyüme yörüngelerinin değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. EEG yaklaşımı, sürdürülebilir dönüşümün ekonomik boyutlarını analiz etmek için gerekli kavramsal araçları sağlamaktadır. Bu çalışmanın temel argümanı, ulusal ekonomik evrimin deterministik değil, yol bağımlı bir süreç olduğudur.

Bu çerçevede çalışma, dönüşüm sürecini açıklamak üzere EEG'nin birbiriyle ilişkili üç temel bileşenine odaklanmaktadır. Birincisi, fosil yakıtlara mevcut bağımlılığı açıklayan yol bağımlılığı ve kilitlenme. İkincisi, bir ülkenin birikmiş endüstriyel uzmanlığını ve çeşitlenme potansiyelini kapsayan kapasiteler ve bilgi. Üçüncüsü ise, yeni ve sürdürülebilir endüstriyel sektörlerin oluşumunda kurumların ve politikaların stratejik rolünü vurgulayan yol yaratma sürecidir. Bu üç bileşen, ülke hazırlığını ve potansiyel büyüme yörüngelerini değerlendirmek üzere Bölüm 3'teki AHS analizinde doğrudan kriterler olarak işlevselleştirilmektedir.

2.1.1. Evrimsel Ekonomik Coğrafyanın Temel Çerçevesi

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG), dinamik süreçleri ve tarihsel bağlamı bir arada ele alarak ekonomik büyümeye alternatif bir perspektif sunmaktadır. Bu yaklaşım, rutinlerin, yani yerleşik davranış kalıplarının, zaman içinde mekânsal ölçekte ekonomik değişimleri nasıl şekillendirdiğini incelemektedir. Bu doğrultuda EEG, rutinlerdeki değişimlerin ekonomik büyüme üzerindeki etkisini hem zamansal hem de mekânsal boyutlarıyla ele almaktadır (Stam, 2009).

EEG, ekonomik büyümeyi statik bir denge durumu olarak değil; ürün ve firma inovasyonları tarafından yönlendirilen evrimsel bir süreç olarak görmektedir. Bu yaklaşım, yol bağımlılığı ve yol yaratma kavramlarını analizinin merkezine yerleştirir (Martin vd., 2006). Böylece ekonomik değişim, geçmişte şekillenmiş rutinlerin ve kurumsal yapıların zaman içinde nasıl dönüştüğü üzerinden açıklanmaktadır.

EEG açısından neoklasik optimizasyon varsayımlarının reddi temel bir ilkedir. Bireylerin ve örgütlerin davranışları, Herbert Simon'ın ortaya koyduğu "sınırlı rasyonellik" kavramına dayanır. Buna göre ekonomik aktörler, tam anlamıyla optimize

eden değil; yerleşik normlar, alışkanlıklar ve bilgi sınırlılıkları tarafından şekillenen karar vericiler olarak değerlendirilir (Boschma vd., 2010).

EEG'nin temel amacı, her ekonomik çevrenin içsel olarak nasıl evrildiğini anlamaktır. Bu bağlamda yaklaşım, ekonomik dönüşümlere aracılık eden mekanizmaları ayrıntılı biçimde incelemeye odaklanır (Boschma vd., 2010). Bu dönüşümler; farklı mekânlarda firma düzeyindeki değişimler tarafından yönlendirilen üretim, dağıtım ve tüketim örüntülerindeki kaymalar üzerinden analiz edilmektedir.

EEG, firmaları sabit varlıklar değil, gelişen kapasitelere sahip dinamik aktörler olarak ele alır. Şirketler, hem içsel öğrenme süreçleriyle hem de dışsal bilgi kaynaklarıyla kapasitelerini geliştirebilen kolektif varlıklar olarak değerlendirilir. Bu bakış açısı, neoklasik paradigmanın ötesine geçerek bölgeleri ve bölgesel kalkınmayı daha gerçekçi ve bütüncül biçimde analiz etmeyi mümkün kılmaktadır (Cooke vd., 2008).

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG), kökenini heterodoks iktisat geleneğinden, özellikle de Neo-Schumpeterci yaklaşımdan almaktadır (Boschma vd., 2006). EEG, heterodoks mekânsal disiplinlerin farklı kollarını bir araya getiren bütünleştirici bir çerçeve sunmaktadır. Bu bütünleşme, Neo-Schumpeterci yaklaşımın yenilik, çeşitlilik, keşif, seçim, rutinler, güven ve gömülülük gibi kavramlara yaptığı vurgudan kaynaklanmaktadır (Cooke vd., 2008).

Bu yaklaşım, analizi tek bir ölçeğe indirgemek yerine farklı düzeyleri kapsayan çok katmanlı bir çerçeve sunmaktadır. Mikro düzeyde firmalar ve tüketiciler temel analiz birimleri olarak ele alınırken; mezo düzeyde firmalar, endüstriler, sektörler ile bölgeler ve şehirler analiz odağını oluşturmaktadır (Lambooy, 2010). Buna göre mikro düzey çalışmalar bireysel aktörlerin davranışlarını incelerken, mezo düzey çalışmalar sektörel yapıları ve bölgesel üretim sistemlerini ele almaktadır. EEG'de makro ölçekte soyut ve genelleyici açıklamalar bilinçli olarak sınırlı tutulmaktadır.

EEG'nin yol bağımlılığı ve artımsal inovasyon vurgusu, geleneksel iktisadi teorilerden önemli bir ayrışma noktasıdır. Yol bağımlılığı yaklaşımına göre ekonomik

aktörler, geçmişte başarılı olmuş üretim biçimlerinden ve teknolojilerden uzaklaşmakta zorlanmakta; bu durum sıklıkla “kilitlenme” olarak adlandırılmaktadır (Lambooy, 2010). Bu kavram, özellikle fosil yakıtlar bakımından zengin gelişmekte olan ülkeler için kritik öneme sahiptir. Fosil yakıt çıkarımına dayalı tarihsel uzmanlık, altyapı yatırımları ve sektörel aşinalık, güçlü bir atalet yaratarak yeni endüstriyel yollara geçişi zorlaştırabilmektedir. Bu bağlamda fosil yakıtlara dayalı tarihsel uzmanlık, aynı sektör içinde dahi farklı ve daha sürdürülebilir bir endüstriyel yola geçişi engelleyen kurumsal ve endüstriyel kilitlenmeler yaratabilmektedir.

Buna karşılık, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin ülkeler, sahip oldukları bu yol bağımlılıklarını bir dezavantaj yerine stratejik bir avantaja dönüştürebilirler. Mevcut uzmanlıklarını sürdürürken yeşil hidrojen gibi yeni ekonomik faaliyet alanlarına yatırım yapılması, bu ülkelerin yeni ve daha sürdürülebilir kalkınma yolları oluşturmasına olanak tanımaktadır.

Evrimci teoriye göre örgütlerin büyük bölümü, daha önce biriktirdikleri bilgiyi temel alarak artımsal inovasyon süreçlerine odaklanmaktadır. Richard Nelson ve Sidney Winter (1982) bu süreci "yerel arama"[3] olarak tanımlamaktadır (Boschma vd., 2010). Yerel aramaya örnek olarak, yeşil hidrojen sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın elektrokimya ya da basınçlı kap üretimi alanındaki mevcut uzmanlığını kullanarak yeni elektrolizör teknolojileri geliştirmesi gösterilebilir.

EEG, ekonomik inovasyondan, yeni teknolojiler, yeni firmalar, yeni endüstriler ve yeni ağlar, ve ekonomik aktörlerin mikro düzeydeki davranışlarından türeyen mekânsal ekonomik yapılara odaklanmaktadır (Boschma vd., 2010). Bu yaklaşım, Şili’deki Atacama Çölü ya da Fas’taki Sahra gibi yenilenebilir kaynaklar bakımından zengin bölgelerde, mevcut uzmanlıkların ve mekânsal avantajların yeşil hidrojen (YH_2) üretim kümelerinin kendiliğinden ortaya çıkışına ve zaman içindeki evrimine nasıl zemin hazırladığını anlamak için güçlü bir analitik temel sunmaktadır. Aynı

[3] Yerel arama süreci, firmaların yenilik faaliyetlerinde tüm olası seçenekleri geniş biçimde araştırmak yerine; sahip oldukları mevcut bilgi birikimi, yerleşik rutinler ve geçmiş deneyimler doğrultusunda, aşina oldukları teknolojik ve örgütsel alanlarda çözüm geliştirmeye yönelmelerini ifade etmektedir (Nelson & Winter, 1982).

zamanda bu çerçeve, politika yapıcıların yenilenebilir kaynak bakımından zengin bölgelerde YH_2 kümelerini desteklemek amacıyla altyapı yatırımlarını ve bilgi yayılımını teşvik eden hedefli stratejiler geliştirmesine imkân tanımaktadır.

Sonuç olarak EEG'nin özünde, tarihsel bağlam, yerleşik rutinler ve mekânsal bağımlılıkların ekonomik evrimi açıklamak üzere bütünleştiği bir analitik çerçeve yer almaktadır. Bu yönüyle EEG, denge merkezli ve statik modellere güçlü bir alternatif sunmakta; ekonomik dönüşümü tarihsel, mekânsal ve kurumsal boyutlarıyla birlikte ele almaktadır.

2.1.2. Endüstriyel Evrim Süreçleri

Ekonomilerin ve buna bağlı olarak endüstrilerin gelişim sürecini anlamak için statik yaklaşımların ötesine geçmek gerekmektedir. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) bu noktada devreye girerek, endüstriyel gelişimin arkasındaki dinamik süreçleri, tarihsel bağlamı ve mekânsal faktörlerin inovasyon ve kurumlarla etkileşimini birlikte ele alan bir perspektif sunmaktadır. Evrimci çalışmalarla uyumlu biçimde EEG, yalnızca kademeli ilerlemeleri değil, aynı zamanda uzun zaman dilimlerine yayılan yapısal dönüşümleri ve bu dönüşümlerin mekânsal örüntülerini de incelemektedir (Lambooy, 2010). Bu çerçeve, endüstrilerin geçirdiği farklı gelişim aşamalarının sistematik biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Yeni bir endüstrinin ortaya çıkışı genellikle mevcut ekonomik çevreyi köklü biçimde dönüştüren yıkıcı bir inovasyon gerektirir. Joseph Schumpeter, bu süreci "yaratıcı yıkım" kavramıyla açıklamaktadır. Temel (radikal) inovasyonların ortaya çıkışı, yeni firmaların yükselişine zemin hazırlarken, bu inovasyonlara uyum sağlayamayan mevcut firmaların ve teknolojilerin gerilemesine yol açmaktadır (Lambooy, 2010).

Bu bağlamda yeşil hidrojen (YH_2), karbon yoğun değer zincirlerinde yaratıcı yıkım sürecini tetikleyerek sermaye, bilgi ve yatırımların yeniden tahsis edilmesine neden olan kritik bir inovasyon olarak değerlendirilebilir. YH_2'nin büyüme yörüngesi, fosil yakıtlara dayalı kilitlenmeleri çözmekte ve öğrenme eğrileri boyunca ilerledikçe üretim verimliliğini artırmaktadır. Bu yönüyle yeşil hidrojen, gelişmekte olan

ülkelerde Schumpeterci bir dönüşüm sürecini başlatabilecek açık bir örnek sunmaktadır. Bu yaklaşım, büyüme yörüngesi analizleriyle de uyumludur. Yeşil hidrojen, geleneksel ve yüksek emisyonlu fosil yakıt şirketlerini ve bunlara bağlı altyapıları ikame ederek, tamamen yeni bir endüstriyel alanın ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Bu yol yaratma mekanizması, ülkelerin sahip oldukları coğrafi avantajları yeni kalkınma yollarına dönüştürebilme kapasitesinin merkezinde yer almaktadır. Kurumlar, bu süreçte yeni ve coğrafi olarak belirlenmiş yolların mevcut ekonomik yapılarla bütünleştirilmesinde temel bir rol üstlenmektedir.

Temel argüman şudur: Yeşil hidrojenin ulusal endüstriyel tabanları "açma" ve derinlemesine yeniden yapılandırma potansiyeli, gelişmekte olan ülkelerin karbon yoğun büyüme modellerinden, sürdürülebilir ve düşük karbonlu büyüme yörüngelerine geçişini mümkün kılmaktadır. Ortaya çıkan bu yeni sektörler çoğu zaman farklı bölgelerde, önceden yerleşik bir uzmanlık olmaksızın doğmaktadır. Ancak zamanla, kendi özgül bilgi birikimlerini ve uzmanlıklarını oluşturmaktadırlar (Martin vd., 2006).

Endüstriler büyüdükçe, bu gelişim daha belirgin mekânsal örüntüler üretmektedir. Bu noktada spin-off dinamikleri, endüstriyel yapılanmanın önemli bir katalizörü olarak öne çıkmaktadır (Boschma vd., 2010). Yeni kurulan firmalar, çoğunlukla mevcut firmalardan biriken bilgi, beceri ve deneyim üzerinden ortaya çıkmaktadır. Bu süreç sıklıkla "başarının başarı yaratması" şeklinde ifade edilmektedir: Başarılı ana firmalardan doğan spin-off'lar, sahip oldukları bilgi avantajı sayesinde kendi alanlarında da başarı gösterme eğilimindedir.

Bir endüstrinin ilk ortaya çıkış aşamasında kümelenme genellikle mevcut değildir; ancak endüstri olgunlaştıkça mekânsal yoğunlaşma, uzmanlaşma ve buna eşlik eden kurumsal yapılanmalar ortaya çıkmaktadır (Martin vd., 2010). Başka bir ifadeyle, endüstriler kümelenme ve uzmanlaşma yoluyla mekânsal olarak büyümekte ve bu süreç, evrimsel bir çerçeve içinde açıklanmaktadır (Boschma vd., 2010). Bu kümelenme, endüstriyel evrimin daha ileri aşamaları için bir katalizör işlevi görmekte ve yığılma ekonomileri üretmektedir. Mekânsal yoğunlaşma, ilgili endüstrinin sonraki gelişimini de doğrudan etkilemektedir. Örneğin mekânsal yoğunlaşma, kurumlar

arasındaki rekabetin yoğunluğunu artırmakta, bu da zamanla uzmanlaşmanın kademeli biçimde derinleşmesine yol açmaktadır (Stam, 2009). Aynı zamanda teknolojik ilerleme, ekonomik coğrafyayı dönüştürerek verimliliği artırmakta, mesafe maliyetlerini düşürmekte ve böylece yığılma avantajlarını güçlendirmektedir (Lambooy, 2010). Bununla birlikte endüstriyel olgunluk aşamasında önemli riskler ve engeller ortaya çıkabilmektedir. Tek bir endüstride aşırı uzmanlaşma, bölgenin durgunluk riskiyle karşı karşıya olduğunu gösterebilir; hatta geçmişte büyümeyi mümkün kılan başarılar zamanla bir dezavantaja dönüşebilir. Pazar doygunluğu, geleneksel teknolojilere bağımlılık ve buna bağlı olarak inovasyon kapasitesinde belirgin bir gerileme gözlemlenebilmektedir (Boschma vd., 1999). Bu koşullar negatif kilitlenmeye yol açabilmektedir. Örneğin petrol bakımından zengin bir gelişmekte olan ülke, fosil yakıt gelirlerine yüksek derecede bağımlı hâle gelmiş olabilir. Ekonomisi fosil yakıtlara dayanan ve bu alandaki yerleşik yetkinliklerini dönüştürmeye açık olmayan bir ülkenin, yeşil hidrojen (YH_2) gibi ortaya çıkan endüstrilere katılım kapasitesi ve isteği sınırlı kalabilmekte; bu durum derin bir negatif kilitlenme ile sonuçlanabilmektedir. Bu çalışmada incelenen ülkeler arasında özellikle Rusya ve Güney Afrika'da yol bağımlılığı, fosil yakıt altyapılarına ve kurumlarına yönelik tarihsel olarak güçlü bir bağlılık, yani karbon kilitlenmesi, şeklinde tezahür etmekte ve bu durum sermayenin yeşil hidrojen teknolojilerine yönelmesine karşı önemli bir atalet yaratmaktadır.

Negatif kilitlenme, bölgelerin geleneksel teknolojilere aşırı bağımlı kalması ve ortaya çıkan yeni inovasyonların gerektirdiği yetkinliklerle uyumsuz hâle gelmesi durumunda ortaya çıkmaktadır (Boschma vd., 1999). Bu bağlamda belirleyici olan, en "uygun" ya da en gelişmiş olan aktörler değil; yeni koşullara en iyi uyum sağlayabilenlerdir (Lambooy, 2010). Dolayısıyla YH_2'ye geçişte başarı, en ileri teknolojiye sahip olmakla değil; küresel düşük karbon teknolojilerinin gerektirdiği koşullara en etkili biçimde adapte olabilmekle belirlenecektir. Bu anlamda adaptasyon, yol bağımlılığını kıran temel mekanizma olarak öne çıkmaktadır.

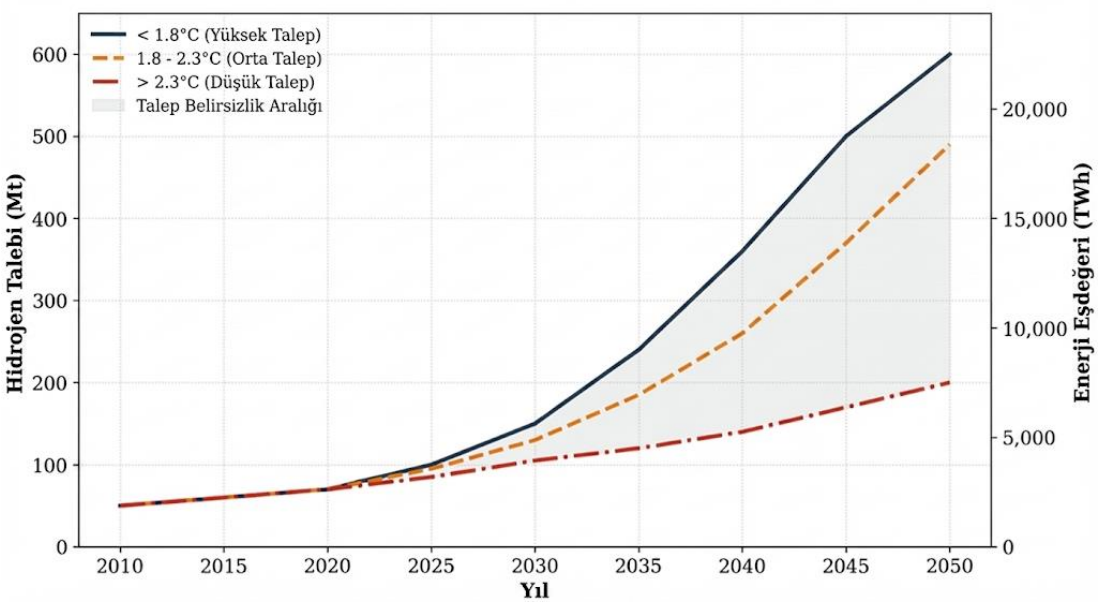
Bölgesel "kilit açma", yeni teknolojilerin devreye alınması ya da ilişkili sektörlerde çeşitlenme yoluyla endüstriyel tabanın güçlendirilmesi sayesinde mümkün

olabilmektedir (Martin vd., 2006). Bu süreçte yerleşik destekleyici kurumlar da kritik öneme sahiptir. Örneğin, San Francisco Körfez Bölgesi'nde önceden var olan risk sermayesi ekosistemi, yerel endüstrilerin büyümesinde belirleyici bir rol oynamıştır (Martin vd., 2006). Bulgular, bölgelerin tarihsel yol bağımlılıklarını dönüştürerek ya da bu yollardan çıkış yaparak refah düzeylerini artırabildiklerini göstermektedir (Cooke vd., 2008).

Sonuç olarak ekonomik evrim süreci; yol bağımlılığı, yeni yol yaratma ve yol yıkımı arasındaki sürekli etkileşim üzerinden ilerlemektedir (Martin vd., 2006). Endüstriyel aşamalar, ortaya çıkış, büyüme, olgunluk, potansiyel gerileme ve adaptasyon, miras alınan yapılar, teknolojik şoklar, yenilikçi aktörler ile yığılma ve bilgi akışlarının mekânsal dinamikleri arasındaki bu karmaşık evrimsel ilişki tarafından şekillendirilmektedir. Bu aşamaların başarıyla aşılabilmesi, bir bölgenin öğrenme, uyum sağlama ve nihayetinde yeni yollar yaratma kapasitesine bağlıdır.

2.1.3. Yeni Endüstriler ve Yol Yaratma

Şekil 14: Küresel Hidrojen Talep Senaryoları (2010-2050)



Kaynak: PwC (2024). Green Hydrogen Economy - Predicted Development of Tomorrow'dan yazar tarafından uyarlanmıştır.

Bölgesel ekonomilerin evrimsel gelişimi, yeni endüstriyel yörüngelerin ortaya çıkışı ile yakından ilişkilidir. Bu süreç, ekonomik coğrafyanın temelini oluşturur ve rastlantısal değildir. Yeni yollar çoğu zaman tarihsel bilgi birikimlerinden evrilerek ortaya çıkar; yerleşik düzenleri dönüştürür ya da onlardan kısmen bağımsızlaşır. Özellikle hızla büyüyen endüstrilerde yeni yörüngelerin nasıl oluştuğunu anlamak, bölgesel dayanıklılığı ve dönüşüm kapasitesini kavramak açısından kritik öneme sahiptir.

Yeni bir endüstriyel yörüngenin kapsamı, hidrojen ekonomisinin geleceğine ilişkin değerlendirmelerle ampirik olarak da görünür hâle gelmektedir. Şekil 14, küresel hidrojen talebinin 2050'ye kadar senaryolara bağlı olarak büyük ölçüde artabileceğini göstermektedir. Küresel ısınmanın 1,8°C ile sınırlandığı ve Paris Anlaşması hedeflerinin gerçekleştirildiği bir senaryoda, karbonsuzlaşma en yüksek düzeye ulaşmakta; buna paralel olarak çok yüksek miktarda yeşil hidrojen ve diğer temiz enerji kaynaklarının devreye girmesi öngörülmektedir (IEA, 2021). Bu senaryoda hidrojen talebi 500 Mt'ı aşabilmektedir. Buna karşılık, iklim politikalarının yetersiz kaldığı ve küresel ısınmanın 2,3°C'nin üzerine çıktığı bir senaryoda, karbonsuzlaşma için gerekli politika ve yatırımlar sınırlı kalmakta; sonuç olarak hidrojen talebi de en düşük seviyelerde gerçekleşmektedir.

Bu karşılaştırma, iklim konusunda kararlı ve erken önlem alındıkça hidrojen sektörünün büyümesinin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu büyüme; politika kararlarına, hidrojene yönelen yatırımlara ve inovasyon süreçlerine, yani yol yaratmanın temel itici güçlerine, doğrudan bağlıdır. Karbonsuzlaşmanın bugünü ve geleceği açısından taşıdığı kritik önem göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bölgeler için en rasyonel senaryolar; yeşil hidrojenin birincil enerji taşıyıcısı hâline geldiği ve Schumpeterci ölçekte bir endüstriyel dönüşümün başladığı bir geleceğe işaret etmektedir.

Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinde yeni endüstriyel yolların ortaya çıkışı, çoğunlukla tesadüfî değil, belirli yerel katalizörler tarafından başlatılmaktadır. Bu katalizörler arasında akademik araştırma merkezleri önemli bir yer tutmaktadır. Daha önce vurgulandığı üzere, yol yaratma süreci sıklıkla yeni

firmaların ve akademik spin-off'ların kurulmasına dayanmaktadır (Trippl vd., 2020). Yeşil odaklı yol geliştirme, çoğu zaman yeşil endüstrilerin zincirleme biçimde ortaya çıkması anlamına gelmektedir.

Örneğin, gelişmekte olan bir ülkede yerel bir üniversiteden doğan bir spin-off, yenilikçi bir elektrolizör tasarımı geliştirerek yeni bir yeşil sektörün oluşumunu tetikleyebilir ve ülke ekonomisine çok yönlü katkılar sağlayabilir. Bu tür girişimlerin ortaya çıkabilmesi için, ilgili bölgede belirli bir birikmiş uzmanlığın bulunması genellikle belirleyicidir. Nitekim spin-off'lar çoğu zaman başarılı ana firmalardan ya da kurum içi araştırmalardan devralınan bilgi ve içgörüler sayesinde başarıya ulaşmaktadır (Boschma vd., 2010). Başka bir ifadeyle, önceki teknolojilere ve uzmanlıklara ait bilgi birikimi, yalnızca yeni teknolojilere uyumu kolaylaştırmakla kalmamakta, aynı zamanda rekabetçi bir avantaj da yaratmaktadır.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, EEG çerçevesinde ortaya çıkan bölgesel yollar, büyük ölçüde önceki endüstriyel gelişim aşamalarından etkilenmektedir. Yeni yörüngeler çoğu zaman, bölgesel yetkinliklere dayalı önceki gelişim evrelerinden türetilmektedir (Trippl vd., 2020). Bu bağlamda temiz teknolojiler, kümelenmeden kaynaklanan yol bağımlılıklarının en çarpıcı örneklerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Martin vd., 2010).

Özellikle yeşil sektörlere geçiş sürecinde, bölgelerin sahip olduğu varlık tabanının dinamik biçimde dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm, literatürde "varlık modifikasyon süreci" olarak adlandırılmaktadır. Söz konusu süreç; mevcut kaynakların yeniden kullanımı, alternatif biçimlerde değerlendirilmesi, yeni yerel varlıkların yaratılması ve işlevini yitirmiş eski varlıkların aşamalı olarak ortadan kaldırılmasını içermektedir. Dolayısıyla temel mesele, mevcut varlıkların yeniden yorumlanmasıyla birlikte yeni varlıkların üretilmesi ve dönüşümle uyumsuz yapıların tasfiye edilmesidir (Trippl vd., 2020).

Örneğin Brezilya, mevcut tarımsal altyapısını ve biyoetanol lojistiğindeki uzmanlığını stratejik bir avantaja dönüştürebilir. Bu uzmanlık, biyokütle temelli yeşil hidrojen üretimi için yeniden yorumlanabilir; elektrolizör üretim tesislerinin kurulması

desteklenebilir ve fosil yakıt sübvansiyonlarının kaldırılması yoluyla tamamen yeni bir yerel değer yaratılabilir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca mevcut yolların devamı yoluyla değil; esas olarak yörünge içi değişimler, yani kurumsal inovasyonlar sayesinde mümkün olmaktadır (Trippl vd., 2020).

Bu süreç dışarıdan bakıldığında kendiliğinden gelişiyor gibi görünse de, gerçekte oldukça karmaşıktır ve negatif yol bağımlılığı gibi ciddi riskler barındırmaktadır. Bölgeler, inovasyona uyum sağlama kapasitelerini sınırlayan çeşitli yapısal faktörler nedeniyle negatif kilitlenmelerle karşı karşıya kalabilmektedir (Boschma vd., 1999). Bu nedenle politika yapıcıların ve diğer paydaşların aldığı stratejik kararlar, adaptasyon sürecinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Nitekim yol geliştirme süreçlerinde bilinçli ve yönlendirici politika tercihleri her zaman temel bir unsur olmuştur (Martin vd., 2006).

Yerel, bölgesel ve ulusal düzeylerdeki kurumsal ve ekonomik koşullar, inovasyon yoluyla yeni endüstriyel yörüngelerin ortaya çıkışını doğrudan etkilemektedir (Martin vd., 2010). Özellikle sosyal ve kurumsal altyapıların dönüştürülmesinin zor olması, adaptasyon süreçlerini yavaşlatabilmektedir. Buna karşılık, kurumlar bir kez pozitif kilitlenme yaratarak yeni endüstriyel yörüngelerini sağlamlaştırdıklarında, büyüme ivmesi kazanmakta ve bu ivme zamanla pekişmektedir (Martin vd., 2010).

Sıfırdan ortaya çıkan sektörlerde yol yaratma, geçmişin geleceği etkilediği ancak onu bütünüyle belirlemediği dinamik bir süreçtir. Akademik spin-off'ların ve yeni girişimlerin ortaya çıkışı, çoğu zaman politika yapıcılar gibi katalizör aktörlere bağlıdır. Bu süreçte mevcut bölgesel varlıklar ve uzmanlıklar kullanılmakta; ancak aynı zamanda yenilikçi bir bakış açısıyla yeniden yorumlanarak dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, destekleyici kurumların eşzamanlı varlığını ve çoğu durumda finansman ile nitelikli insan kaynağı gibi kritik kaynaklara erişimi gerektirmektedir.

2.1.4. Bölgesel Uzmanlık ve Kalkınma

Bir toplumun kalkınma düzeyi, büyük ölçüde bulunduğu bölgenin birikmiş uzmanlığı tarafından şekillendirilmektedir. Zaman içinde bölgeler; tarihsel, kurumsal ve ekonomik süreçler aracılığıyla kendi uzmanlık alanlarını geliştirirken, aynı

zamanda bu uzmanlıkların yarattığı yapısal sınırlamalarla da karşı karşıya kalabilmektedir. Dolayısıyla bölgesel kalkınma nadiren rastlantısal bir süreçtir; aksine, doğal kapasiteler, bilgi birikimi, fırsatlar ve riskler arasındaki karmaşık etkileşimler tarafından belirlenmektedir (Maskell vd., 1999).

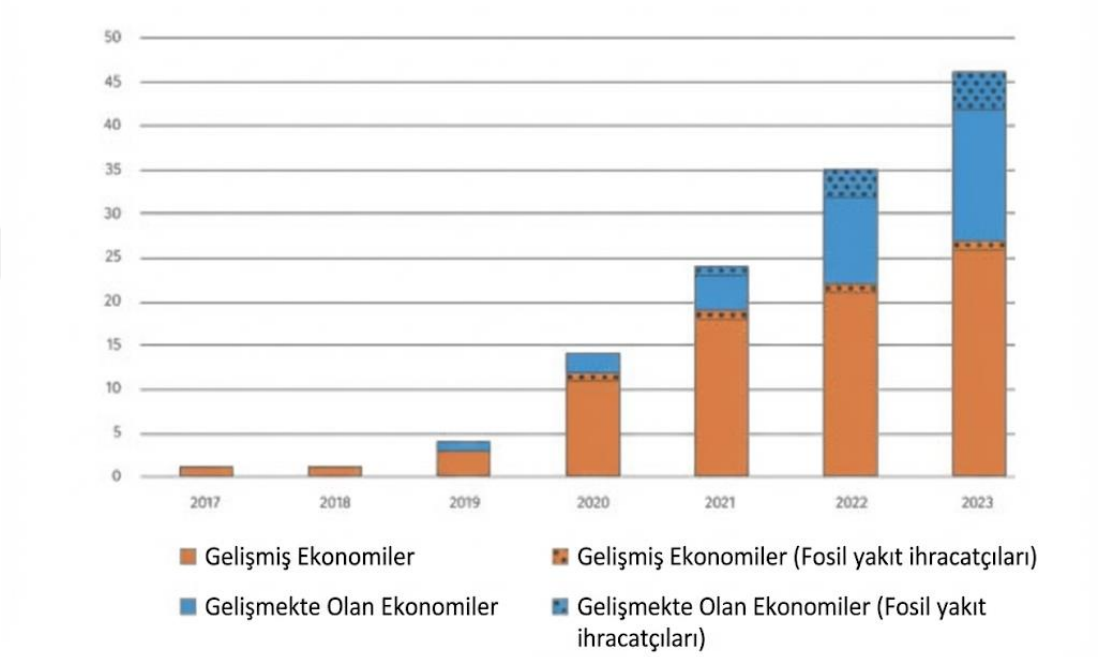
2.1.4.1. İlişkili Çeşitlenme

Önceki bölümlerde vurgulandığı üzere, bölgeler çoğunlukla mevcut uzmanlıklarını, onlarla teknolojik ve kurumsal olarak ilişkili alanlara doğru genişleterek gelişmektedir. Bu eğilim, tamamen yeni alanlara girmenin beraberinde getirdiği yüksek maliyet ve belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Yeni faaliyet alanlarına yatırım yapmak riskli olduğundan, bölgeler genellikle mevcut faaliyetlerine yakın sektörlere yönelmeyi tercih etmektedir (Boschma, 2024). Yeşil hidrojen dönüşümü bağlamında bu ilke, gelişmekte olan ülkelerin mevcut varlık tabanlarıyla ilişkili sektörlere çeşitlenerek yatırım risklerini azaltabileceklerini göstermektedir. Örneğin, halihazırda kimyasal işleme, gaz altyapısı veya boru hattı yönetimi alanlarında uzmanlığa sahip bir ülke için hidrojene geçiş, tamamen bilinmeyen bir alana girişten ziyade bir ilişkili çeşitlendirme sürecini temsil etmektedir. Bu nedenle ülkelerin yeşil hidrojen endüstrisine giriş stratejileri, doğrudan bölgesel yetkinlik profilleri tarafından şekillenmektedir.

Benzer şekilde, su yönetimi ve hidroelektrik enerji alanlarında uzmanlaşmış bölgeler hidrojen üretiminde görece daha başarılı olurken; petrokimya mühendisliği ve endüstriyel kimya alanlarında uzmanlaşmış bölgeler, amonyak veya sentetik yeşil yakıtlar gibi hidrojen türevlerine geçişte daha avantajlı konumda bulunmaktadır. Gerekli bilgi, beceri ve kurumsal kapasitelere sahip olmak, yeni teknolojilere uyum sürecinde önemli bir avantaj yaratmaktadır. Bu yetkinliklerin düzeyi ne kadar yüksekse, adaptasyon maliyetleri de o ölçüde düşmektedir (Boschma, 2024). Özellikle belirli endüstriyel ağların merkezinde yer alan bölgeler, sahip oldukları benzersiz uzmanlık sayesinde yeni endüstrilere çeşitlenme konusunda daha geniş fırsatlara sahiptir (Boschma, 2024).

Şekil 15, yeşil hidrojen adaptasyonu bağlamında bu tür bir ilişkili çeşitlendirme avantajına sahip olan gelişmekte olan ülkelerin, bu avantajı ulusal stratejik kararlar yoluyla nasıl yönlendirdiklerini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Şekil 15: Ulusal Hidrojen Stratejilerinin Gelişimi



Kaynak: UNIDO, IRENA, IDOS (2023). Green Hydrogen for Sustainable Industrial Development A Policy Toolkit for Developing Countries (CC BY 4.0)

Sanayileşmiş ekonomiler Ulusal Hidrojen Stratejilerini (UHS) daha erken benimsemiş olsa da, gelişmekte olan ekonomilerin 2023 yılına kadar hızla bu açığı kapattığı görülmektedir. Bu eğilim, söz konusu ülkelerin yeşil hidrojen dönüşümünde pasif gözlemciler olmadığını; aksine yeni endüstriyel yörüngeyi aktif biçimde inşa ettiklerini ve bu sürece stratejik olarak katıldıklarını göstermektedir.

Ayrıca fosil yakıt ihracatçısı ülkelerin de bu sürece dâhil olması, ülkelerin mevcut uzmanlıklarını izole biçimde değerlendirmediğini; aksine bu uzmanlıkları yeşil hidrojen gibi yenilikçi alanlara taşımak üzere stratejik olarak yeniden konumlandırdığını ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir endüstriyel kalkınma için yeni bir yön ve alternatif bir büyüme yolu yaratma çabasının somut bir göstergesidir.

2.1.4.2. Karmaşıklık ve Kalkınma

Yeni endüstrilere çeşitlenme, her durumda aynı ölçüde etkili sonuçlar üretmemektedir. Bunun temel nedeni, ekonomik faaliyetlerin karmaşıklık düzeyinin, hem bu faaliyetlere erişimi hem de yaratılan katma değeri belirlemesidir. Daha karmaşık faaliyetler, genellikle çok sayıda ve ileri düzey yetkinlik gerektirir; bu yetkinliklerin edinilmesi daha zor ve maliyetlidir. Buna karşılık, öğrenilmesi görece kolay olan yetkinlikler daha düşük katma değerli faaliyetlerle ilişkilidir (Boschma, 2024). Kolay ve zor yetkinlikler arasındaki bu ayrım, bölgelerin izlediği kalkınma yörüngelerini de farklılaştırmaktadır. Yüksek gelirli bölgeler, sahip oldukları geniş ve derin beceri havuzları sayesinde daha karmaşık yetkinliklere uyum sağlayabilmekte ve bu sayede yüksek değerli çeşitlendirme stratejileri izleyebilmektedir. Buna karşılık düşük gelirli bölgeler, genellikle daha kolay öğrenilen yetkinliklere yönelmekte ve bu durum onları daha düşük değerli çeşitlendirme yollarına yönlendirmektedir (Boschma, 2024).

Yeşil hidrojen bağlamında bu ayrım açık biçimde gözlemlenmektedir. Yeşil hidrojen üretim teknolojilerinde gelişmiş becerilere sahip ülkeler, elektrolizör üretimi, yeşil çelik veya diğer ileri hidrojen türevleri gibi yüksek katma değerli faaliyetlere odaklanabilmektedir. Buna karşılık, bu teknolojik yetkinlikleri sınırlı olan ülkeler, yeşil hidrojen değer zincirinin daha düşük katma değerli aşamalarında kalma veya üretimde ölçeklenme konusunda zorlanma riskiyle karşı karşıyadır.

UNIDO–IRENA–IDOS (2023) tarafından geliştirilen politika araç seti, gelişmekte olan ülkelerin yeşil hidrojen değer zincirinde hem yukarı (teknoloji ve ekipman) hem de aşağı (nihai kullanım ve türev ürünler) yönlerde stratejik biçimde konumlanabileceğini vurgulamaktadır. Bu sayede ülkeler, kalıcı istihdam yaratabilir, zaman içinde artan katma değer üretebilir ve küresel rekabet güçlerini kademeli olarak artırabilirler. Bu dinamik, bölgesel uzmanlık düzeyinin, büyüme fırsatlarını ve izlenen kalkınma yörüngelerini nasıl belirleyici biçimde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

2.1.4.3. Kümelerin Rolü ve Sınırları

Başarılı bölgelerde bilgi paylaşımı genellikle yaygındır ve endüstriyel kümeler, bu paylaşımı kolaylaştıran temel mekânsal yapılardır. Ancak bilgi paylaşımının etkin biçimde gerçekleşebilmesi ve üretken sonuçlar doğurabilmesi için, bilgi dışsallıklarının maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir (Antonelli, 2007). Kümelerin yarattığı yığılma türü, bilginin yayılım hızını ve kapsamını doğrudan etkilemekte; bu etki sektörler arasında farklılık gösterebilmektedir (Lambooy, 2010). Yığılmalar güçlü yayılma etkileri ürettiğinde, sektör içi bilgi paylaşımı artmakta ve buna bağlı olarak verimlilik kazanımları ortaya çıkmaktadır (Martin vd., 2006). Bu bağlamda, ilişkili çeşitliliğe dayalı ve aktörler arası etkileşimi güçlü kümeler, "inşa edilmiş avantajlar" yaratarak evrimsel bir dinamizm kazanabilmektedir (Cooke vd., 2008). Yerel kapasiteler doğru biçimde değerlendirildiğinde, Küresel Değer Zincirlerine (GVC) katılımı artıran önemli bir güç unsuruna dönüşmektedir. Buna karşılık, bu kapasitelerin etkin kullanılmaması durumunda, bölgenin çeşitlendirme potansiyeli sınırlanmakta ve düşük karmaşıklıklı faaliyetlerde kilitlenme riski ortaya çıkmaktadır (Boschma, 2024). Yeşil hidrojen bağlamında bu kümeler, çoğunlukla "Hidrojen Vadileri" olarak adlandırılmaktadır. Bu tür kümeler; yenilenebilir enerji üreticileri, sanayi tesisleri ve altyapı sağlayıcıları arasında maliyet ve bilgi paylaşımını mümkün kılarak önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak her ne kadar teknik ve ekonomik açıdan rasyonel görünse de, bu yaklaşımın her ülkede veya bölgede aynı ölçüde başarılı olmadığı gözlemlenmektedir. Bu farklılık, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinden bakıldığında; mevcut enerji sistemlerine özgü yol bağımlılığı ve teknolojik kilitlenmeler ile açıklanabilmektedir. Birçok ülkede fosil yakıtlara dayalı yerleşik altyapılar, kurumsal düzenlemeler ve sanayi çıkar grupları, hidrojen temelli yeni sistemlerin yaygınlaşmasını sınırlandırmakta ve alternatif teknolojilerin ölçek kazanmasını zorlaştırmaktadır.

Dolayısıyla hidrojen vadilerinin başarısı yalnızca teknik fizibiliteye değil; aynı zamanda geçiş sürecinde şekillenen kurumsal, ekonomik ve politik koşullara da bağlıdır. Bu noktada kamu destekleri, yatırım teşvikleri, karbon fiyatlandırması, altyapı sübvansiyonları ve uzun vadeli politika sinyalleri gibi iktisadi araçlar, mevcut kilitlenmeleri aşmada belirleyici bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak hidrojen vadileri, tek başına yeterli bir çözüm olarak değil; daha geniş ve bütüncül bir enerji dönüşüm stratejisinin tamamlayıcı bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir. Başarıları, teknik kapasitenin ötesinde, bu kapasitenin uygun kurumsal çerçevelerle, politik yönlendirmeyle ve bölgesel yetkinliklerle ne ölçüde uyumlu biçimde bir araya getirilebildiğine bağlıdır.

2.1.4.4. Yol Bağımlılığından Çıkış

Yeni bilginin absorbe edilmesi kolay değildir ve ileri düzey beceriler gerektirir. Mevcut bilginin sınırlarının ötesine geçebilmek için, uzmanlaşmış alanlarda birikmiş kapasiteden en etkin biçimde yararlanmak kritik önemdedir (García vd., 2023). Gelişmekte olan bir ülke, ortaya çıkan fırsatları erken aşamada tespit edebilir ve elektroliz ile yenilenebilir enerji entegrasyonu alanlarında küresel bilgiyi uluslararası işbirlikleri ve teknoloji transferi yoluyla kendi yerel yetkinlikleriyle birleştirebilirse, yeşil hidrojen (YH_2) sektöründe anlamlı bir gelişme sağlayabilir. Bununla birlikte, bu bilginin yalnızca aktarılması değil, iş süreçlerinde etkin biçimde kullanılması da gerekmektedir.

Yerel koşulların, yeni iş kollarının ortaya çıkışında belirleyici bir rol oynadığı gösterilmiştir (Martin vd., 2010). Yenilikçi teknolojik paradigmaların benimsenmesi, bölgelerin yerleşik alışkanlıklarını kırmasına ve kilitlenmiş yapıları aşmasına olanak tanımaktadır. Bu tür dönüşümler, özellikle kaynak bakımından zengin bölgelerin ekonomik büyümesini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Çin'in güneş enerjisi alanında küresel liderliğe yükselmesi bu duruma örnek teşkil etmektedir (Wang vd., 2023). Çin'in deneyimi, yapısal bir sıçramayı açık biçimde ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde Fas, yeşil ekonominin uzun vadeli gereksinimlerini erken fark ederek NOOR güneş enerjisi kompleksi ve yeşil hidrojen hedefleri gibi ileriye dönük atılımlar gerçekleştirmiştir. Fosil yakıt ithalatçısı bir ülkenin, akıllı politika tasarımları ve büyük ölçekli yenilenebilir enerji yatırımları yoluyla yeşil enerji üreticisine ve potansiyel bir YH_2 ihracatçısına dönüşme çabası, gelecekteki fırsatların bilinçli biçimde öngörüldüğünü göstermektedir. Bu tür stratejik sıçramalar, bir bölgenin

endüstriyel dönüşüm ve teknolojik inovasyon yoluyla yol bağımlılığını kırmasına imkân tanımaktadır (Martin vd., 2006).

2.1.4.5. Uzmanlığın Kalkınmaya Dönüşümü

Bir ülkenin bölgesel uzmanlığı, kalkınma sürecini iki farklı yöne sürükleyebilir. Birincisi; fırsatları zamanında tanımak, mevcut uzmanlığı stratejik biçimde yönlendirmek, firmalar arası işbirliğini güçlendirmek ve Küresel Değer Zincirlerine (GVC) etkin biçimde katılmaktır. İkincisi ise, düşük katma değerli faaliyetlerde kilitli kalmak ve yüksek büyüme potansiyeline sahip sektörlere geçişte ciddi zorluklarla karşılaşmaktır.

Başarılı ulusal kalkınma politikaları uygulandığında, sürdürülebilir kalkınma mümkün hâle gelmektedir. Bu kapsamda; mevcut bölgesel güçler tanımlanmakta ve pekiştirilmekte, yeni bilgiye uyum kapasiteleri geliştirilmektedir. İnovasyona adaptasyon kolaylaştırılırken, yapısal dönüşümü destekleyecek yeni teknik alanlara yönelik stratejik yatırımlar artırılmaktadır. Bu nedenle yeni teknolojilere uyum sağlayan politikalar, yalnızca bölgesel kaynakların etkin kullanımını değil, aynı zamanda GVC'lere daha derin entegrasyonu da mümkün kılmaktadır (Boschma, 2024). Sonuç olarak bu süreç, mevcut bilgi birikiminden yararlanma ile yeni ve kalıcı kalkınma yolları yaratma arasında bilinçli bir denge kurulmasını gerektirmektedir. Bu denge sağlandığında, bölgesel uzmanlık bir sınırlayıcı unsur olmaktan çıkarak sürdürülebilir ve kapsayıcı kalkınmanın temel itici gücüne dönüşebilmektedir.

2.2. Gelişmekte Olan Ülkelerde Yeşil Hidrojen Üretimi

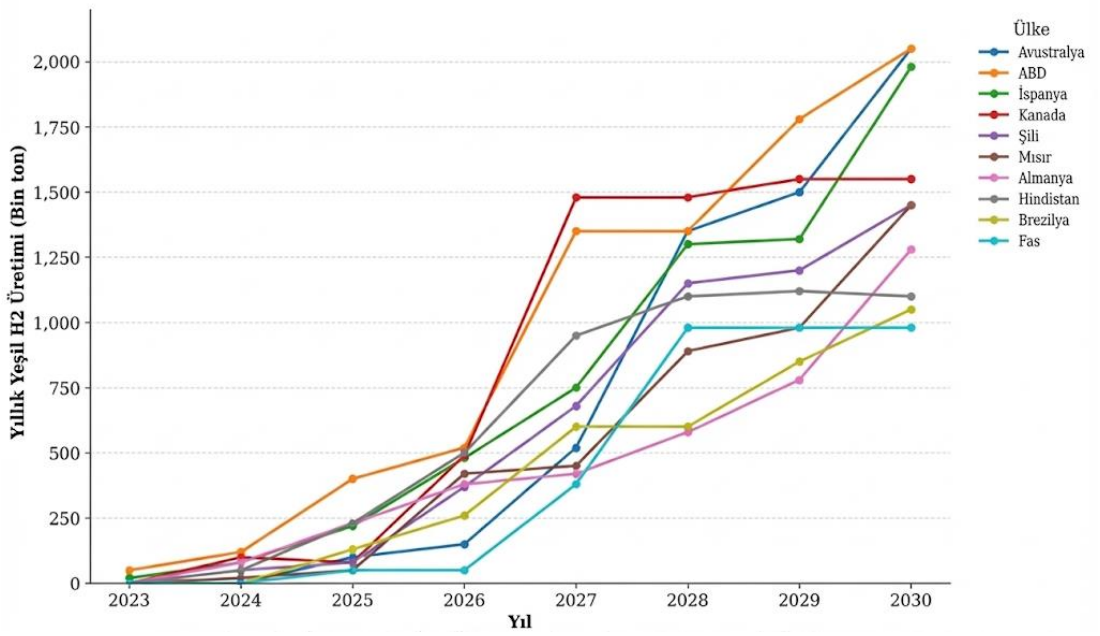
Küresel enerji dönüşümü, yalnızca enerji sistemlerini değil, aynı zamanda ekonomik coğrafyayı da yeniden şekillendirmektedir. Bölüm 1'de tartışıldığı üzere, yeşil hidrojen gelişmekte olan ülkeler için stratejik bir fırsat sunmaktadır. Bu dönüşüm, bölgelerin mevcut doğal kaynaklarını, kurumsal yapılarını ve teknolojik kapasitelerini bir araya getirerek, karbon kilitlenmesinin ötesine geçen yeni endüstriyel yollar yaratmaktadır.

Birçok gelişmekte olan ülke, bol güneş ve rüzgâr potansiyeline sahiptir. Bu durum, söz konusu ülkelerin büyük ölçekli yeşil hidrojen üreticileri ve ihracatçıları olma

potansiyelini artırmaktadır (OECD, 2022). Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinden bakıldığında, bu gelişme ülkelerin bölgesel zenginliklerini kullanarak ekonomik kalkınmalarını ilerletebileceklerini göstermektedir.

Şekil 16, bu dönüşümün somut etkilerinin planlanan yeşil hidrojen üretim kapasitesinin küresel dağılımında görünür hâle geldiğini ortaya koymaktadır. 2023–2030 döneminde dünyadaki ilk 10 yeşil hidrojen üreticisi ülkenin öngörülen kurulu kapasiteleri incelendiğinde, Brezilya, Şili, Mısır, Fas ve Hindistan gibi bazı gelişmekte olan ülkelerin öne çıktığı görülmektedir.

Şekil 16: Ülkelere Göre Yeşil Hidrojen Üretim Projeksiyonu (2023-2030)



Kaynak: Kumar, D., Krishna, R., Colak, H., & Saravanan, J. (2024). Green hydrogen: Paving the way for India's decarbonization revolution'dan yazar tarafından uyarlanmıştır.

Bu ülkelerin ortak özelliği, bol ve düşük maliyetli güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olmalarıdır. Bu durum, enerji zenginliği kavramının artık yalnızca petrol ve doğal gaz rezervleriyle değil, yenilenebilir enerji bolluğuyla da tanımlandığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda birçok gelişmekte olan

ülke, geçmişteki enerji uzmanlıklarını yeniden yorumlayarak yeni nesil enerji-zengini ülkeler hâline gelme potansiyeline sahiptir.

Dikkat çekici biçimde, Şekil 16'da yer alan ülkelerin çoğu geleneksel anlamda fosil yakıt bakımından zengin değildir. Buna karşın, yeni enerji ekonomisinde stratejik bir avantaja sahiptirler. Geniş ve yüksek potansiyelli yenilenebilir kaynak alanları, bu ülkelerin coğrafi zenginliğini ve jeopolitik önemini artırmaktadır. Bu özellikler, söz konusu ülkeleri küresel yeşil hidrojen kümelerinin ilk oluşum aşamalarında kilit aktörler hâline getirmekte ve geleceğin enerji sisteminde önemli roller üstlenmelerini mümkün kılmaktadır.

EEG'nin öngördüğü şekilde, bu ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak yeni endüstriyel yollar yaratmakta ve küresel enerji peyzajı içinde kendilerini stratejik olarak yeniden konumlandırmaktadır.

2.2.1. Kaynak Ekonomisinden İnovasyona Geçiş

Daha önce tartışıldığı üzere, Evrimsel Ekonomik Coğrafya yaklaşımı, bölgelerin kalkınmasını mevcut kaynakların dönüştürülmesi yoluyla oluşan yeni endüstriyel yollar üzerinden açıklamaktadır (Boschma, 2017). Bu çerçevede, bol güneş ve rüzgâr kaynaklarına sahip gelişmekte olan ülkeler için yeşil hidrojen, yalnızca bir enerji seçeneği değil, aynı zamanda yapısal bir kalkınma fırsatı sunmaktadır (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023; IRENA, 2022).

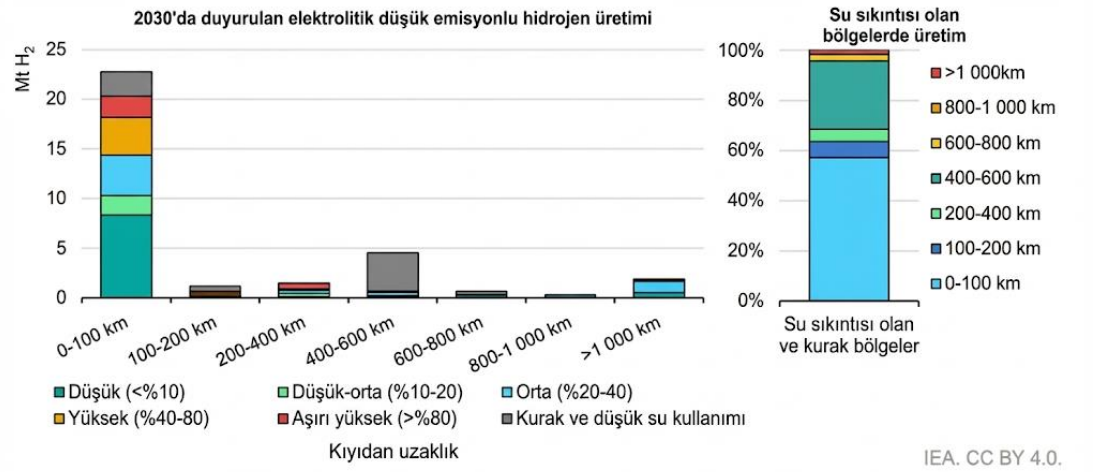
Ancak bu fırsat, yalnızca doğal kaynak bolluğuna dayanarak ortaya çıkmamaktadır. Yeni kurumsal çerçevelerin oluşturulması, teknolojik sıçramalar, politika koordinasyonu ve yatırım yönlendirmesi, yeşil hidrojenin gerçek bir dönüşüm aracı hâline gelmesinde belirleyici rol oynamaktadır (OECD, 2022). Dolayısıyla yeşil hidrojen üretimi, gelişmekte olan ülkeler için çıkarma temelli büyümeden inovasyon temelli kalkınmaya geçişin evrimsel bir zorunluluğu olarak değerlendirilebilir (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023).

2.2.2. Kıyı Bölgelerinin Stratejik Önemi

Bir ülkenin jeopolitik konumu, özellikle kıyılara erişimi, yeşil hidrojenin ölçeklenebilir üretimi açısından belirleyicidir. Kıyı şeridine yakınlık; deniz suyunun arıtılarak elektrolizde kullanılması, deniz taşımacılığı hatlarına erişim, ihracat avantajları ve liman temelli üretim–tüketim kümelerinin oluşması gibi çok sayıda yapısal üstünlük sağlamaktadır. Buna karşılık, iç bölgelerde konumlanan projeler su kıtlığı, yüksek maliyetler ve tedarik zinciri kırılganlıkları nedeniyle daha yüksek sürdürülebilirlik riskleri taşımaktadır (IRENA, 2022; Bridge vd., 2013).

Şekil 17, 2030'a kadar duyurulan elektrolitik düşük emisyonlu hidrojen projelerini kıyıya uzaklıklarına göre sınıflandırmaktadır IEA (2024).

Şekil 17: Kıyıya Uzaklığa Göre Hidrojen Projeleri (2030)



Kaynak: IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024 (CC BY 4.0)

Şekil 17'ye göre projelerin büyük bölümü, su stresi riskini azaltmak amacıyla kıyılara yakın konumlandırılmıştır. Bununla birlikte, bazı projeler yüksek su stresi altındaki bölgelerde de yer almakta ve bu durum sürdürülebilirlik ile tedarik zinciri açısından ek riskler doğurmaktadır. Özellikle kıyıdan yaklaşık 600 km'nin ötesinde konumlanan projeler, kurak ya da yüksek su stresli alanlarda kümelenmekte; bu da tatlı su kıtlığının yönetimini kritik bir sorun hâline getirmektedir. Dolayısıyla hidrojen

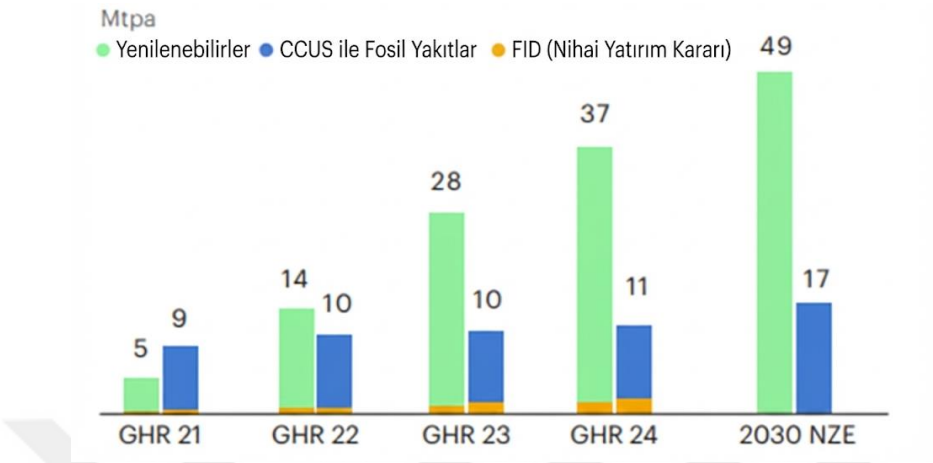
ekonomisinin geliştirilmesinde su güvenliği, temel bir planlama kriteri olarak ele alınmalıdır (IEA, 2024).

Kıyısal gereklilikler, aynı zamanda istemeden de olsa yığılmayı teşvik eden özgün bir coğrafi kısıt yaratmaktadır. Hem desalinasyonun (hidrojen ihracatı için gerekli su girdisi) hem de ihracatın kendisinin limanlar üzerinden gerçekleşmesi, üretim ve lojistiğin birlikte konumlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, Evrimsel Ekonomik Coğrafya literatürünün öngördüğü şekilde endüstriyel kümelerin ortaya çıkmasını kolaylaştırmaktadır (Bridge vd., 2013). Nitekim yeşil hidrojen sektörü, sinerjik faydaların yoğunlaştığı bölgelerde daha hızlı büyümekte; limanlara yakınlık maliyetleri düşürmekte, bilgi paylaşımını hızlandırmakta ve yeni endüstriyel yolların oluştuğu bütüncül bir ekosistemi desteklemektedir (IRENA, 2022).

Örnekleme dahil edilmemiş olmakla birlikte Namibya, kıyı erişimi ve yenilenebilir potansiyeli birleştiren stratejik konumlandırmasıyla benzer bir model sunmaktadır (IRENA, 2022).

Son olarak, büyük ölçekli ve karbon yoğun endüstrilere sahip ülkelerde düşük karbonlu alternatiflere geçiş genellikle daha zorludur. Buna karşılık, nispeten sınırlı endüstriyel mirasa sahip gelişmekte olan ülkeler, yeni yeşil hidrojen tesislerini daha düşük dönüşüm maliyetleriyle kurabilmekte ve bu sayede ilk hamle avantajı elde edebilmektedir (OECD, 2022).

Şekil 18: Duyurulan Projelere Göre Hidrojen Üretimi (2030)



Kaynak: IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024 (CC BY 4.0)

Küresel proje hattı, fosil yakıt çıkarımına dayalı bir yapıdan yenilenebilir temelli inovasyona doğru belirgin bir dönüşüm sergilemektedir. Kaynak bakımından zengin gelişmekte olan ülkeler, bu dönüşümde giderek daha merkezi aktörler hâline gelmektedir. Şekil 18, duyurulan projelerin büyük bölümünün yenilenebilir enerji kaynaklarına dayandığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Aynı zamanda fosil tabanlı girişimlerin yavaşlamasıyla birlikte, yenilenebilir temelli hidrojen yatırımlarına yönelik artan bir bağlılık gözlemlenmektedir. Bu eğilim, ortaya çıkan yeşil hidrojen ekonomisinin, fosil altyapılar yerine yenilenebilir enerjiyle bütünleşmiş endüstriyel yollara dayandığını göstermektedir.

2.2.3. Yerel Talep ve Endüstriyel Ekosistemler

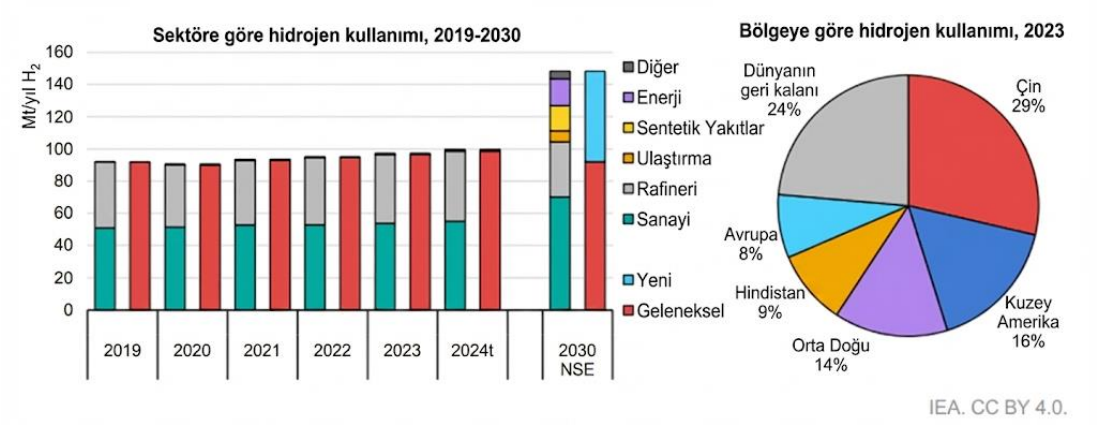
Gelişmekte olan ülkelerde gelecekte kurulacak yeşil hidrojen kapasitesi, öncelikle yerel enerji ve sanayi talebini karşılamak amacıyla kullanılabilir; fazla üretim ise ihracat yoluyla ekonomik değere dönüştürülebilir. Bu yaklaşım literatürde sıklıkla "yonca yaklaşımı"[4] olarak adlandırılmaktadır. Söz konusu yaklaşım, yurt içi kullanımı

[4] Clover (Yonca) Yaklaşımı, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü tarafından, gelişmekte olan ülkelerin yeşil hidrojen dönüşümünü yönlendirmek amacıyla önerilen stratejik bir politika çerçevesidir. Bu yaklaşım, yalnızca ihracata odaklanmanın sakıncalarına dikkat çekmekte; bunun yerine dört temel sütuna dayanan dengeli bir strateji önermektedir: (1) öncelikle yerli sektörlerin karbonsuzlaştırılması yoluyla yerel endüstriyel değer yaratılması, (2) ulusal enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi, (3) çevresel sürdürülebilirliğin korunması ve (4) yalnızca fazla hidrojen üretiminin

önceliklendirmekte, artan kapasitenin ise ihracata yönlendirilmesini öngörerek sağlam ve kapsayıcı bir sanayileşme sürecini teşvik etmektedir. Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü'nun metodolojik çerçevesi, bu tür bir önceliklendirmeyi gerekli görmektedir. Kurumlar arası eşgüdüm eksiklikleri ve yapısal kısıtlar dikkate alındığında, bu yaklaşım geleneksel "önce ihracat" stratejilerinden ayrılmakta; bunun yerine sosyal ve çevresel açıdan uyumlu, yerel ekonomik kalkınmayı güçlendiren bir modeli önermektedir (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023).

Yonca yaklaşımı aynı zamanda küresel talebin daha dengeli ve adil biçimde karşılanmasına da olanak tanımaktadır. Şekil 19, 2019 yılında hidrojen talebinin ağırlıklı olarak geleneksel sektörler tarafından domine edildiğini; ancak taşımacılık, enerji üretimi ve sentetik yakıtlar gibi yeni uygulamaların önümüzdeki dönemde giderek daha önemli hâle geleceğini göstermektedir. Bu yeni kullanım alanlarındaki büyüme, küresel hidrojen talebinde belirgin bir artışa yol açacaktır.

Şekil 19: Sektör ve Bölgeye Göre Hidrojen Talebi (Net Sıfır Senaryosu)



Notlar: NSE = 2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu. 'Diğer', binaları ve biyoyakıt iyileştirmesini içerir. 2024t = 2024 için tahmin. 2024 için tahmin edilen değer, Haziran 2024'e kadar gözlemlenen eğilimlere dayanan bir projeksiyondur.

Kaynak: IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024 (CC BY 4.0)

Şekil 19 ayrıca, birçok gelişmekte olan ülkenin genişleyen endüstriyel altyapısının, yeşil hidrojen yatırımları için elverişli bir talep tabanı sunduğunu ima etmektedir.

ihracata yönlendirilmesi. Bu çerçeve, hidrojenin salt bir hammadde ihracat kalemi hâline gelmesini önlemeyi ve hidrojen ekonomisinin gerçek anlamda yerel ekonomik kalkınmayı desteklemesini amaçlamaktadır (UNIDO, 2023)

Özellikle kaynak bakımından zengin gelişmekte olan ekonomiler için ucuz yeşil hidrojenin mevcudiyeti, yeşil amonyak üretimi açısından önemli bir fırsat yaratmaktadır. Bu dönüşümde yerel çelik endüstrisi, öncü bir rol üstlenebilecek konumdadır.

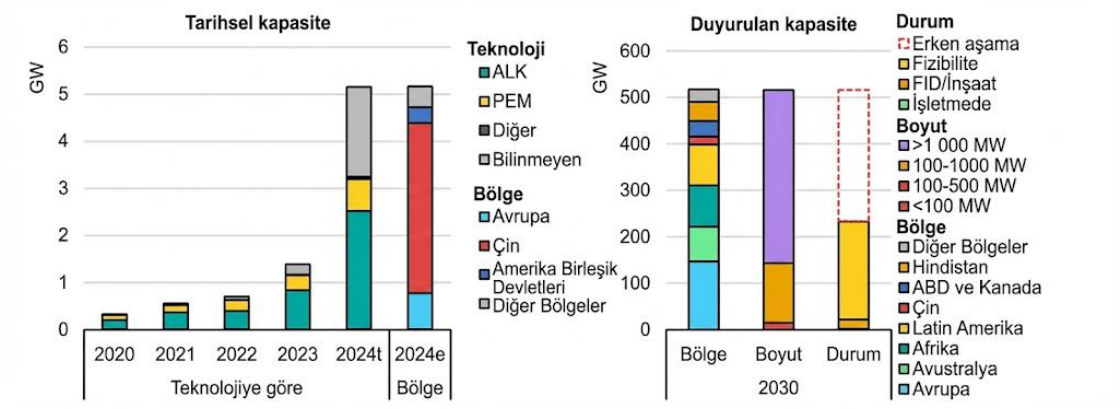
İlk aşamada, kömür bazlı Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) süreçlerinin yeşil hidrojenle ikame edilmesi, CBAM kapsamında koruma sağlayan AB pazarlarına[5] yeşil çelik ihracatını mümkün kılabilir. Zaman içinde bu dönüşüm, fosil tabanlı altyapının yerini yeşil bir endüstriyel kümeye bırakmasına ve yeni endüstriyel yığılmaların ortaya çıkmasına zemin hazırlayacaktır (OECD, 2022).

2.2.4. Teknolojik Bağımlılık Riskleri

Elektrolizör kapasitesinin büyük bölümü bugün Çin ve Avrupa'da yoğunlaşmış durumdadır (IEA, 2023). Duyurulan projeler, 2030'a kadar küresel kapasitenin yaklaşık 230 GW'a ulaşabileceğine işaret etmektedir (IEA, 2023; IRENA, 2022). Bu büyüme yalnızca Çin, Avrupa ve ABD'de değil; aynı zamanda gelişmekte olan ülkelerde de önemli yatırımların devreye gireceğini göstermektedir. Dolayısıyla gelişmekte olan ülkeler, yeşil hidrojen ekonomisinde kilit oyuncular hâline gelmeye adaydır (IEA, 2023; IRENA, 2022).

[5] Karbon Sınırda Düzenleme Mekanizması (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM), Avrupa Birliği tarafından, Birliğe giren karbon yoğun ürünlerin üretimi sırasında salınan karbon için adil bir fiyatlandırma getirmek ve AB üyesi olmayan ülkelerde daha temiz endüstriyel üretimi teşvik etmek amacıyla hayata geçirilen bir politika aracıdır (European Commission, 2021).

Şekil 20: Bölgelere Göre Elektrolizör Kapasitesi (2020-2030)



Kaynak: IEA (2024). Global Hydrogen Review 2024 (CC BY 4.0)

Elektrolizör kapasitesindeki bu hızlı artış, hidrojeni geleceğin ihracat emtialarından biri hâline getirmeyi hedefleyen ülkeler için önemli stratejik fırsatlar sunmaktadır. Örneğin Fas, rüzgâr projelerinde uyguladığı yerli katkı gereksinimleri (YKG) (%35) ile yerli sanayinin gelişimini desteklemektedir. Güney Afrika'nın HySA Programı ve Vietnam'ın PEM elektrolizörleri ve şebekeden bağımsız yeşil hidrojen üretimine odaklanan IOS girişimi, Ar-Ge ekosistemleri aracılığıyla teknolojik bilgi birikimini güçlendirmektedir (IEA, 2024; IRENA, 2022).

Ayrıca Antofagasta (Şili) dâhil 19 ülkede tanımlanan hidrojen vadileri, limanları, sanayiyi ve Ar-Ge faaliyetlerini entegrasyon ve müşteri odaklı inovasyon etrafında birleştirerek güçlü bir fiziksel ve kurumsal altyapı oluşturmayı hedeflemektedir. Bol yenilenebilir enerji (YE) potansiyeline sahip ülkeler, bu sayede düşük maliyetli yeşil hidrojen üretebilir; bunu çelik, kimya ve gübre gibi sektörlerde karbon-nötr endüstrilerin kurulmasında kullanarak ihracat rekabet gücü kazanabilir ve küresel değer zincirlerinde yukarı tırmanabilir.

2.2.5. Politika Tasarımı ve Endüstriyel Coğrafya

Yeşil hidrojenin etkili biçimde ölçeklenmesi, üçlü bir koordinasyonu gerektirmektedir. Bunlardan birincisi kurumlar, finansman ve mekânsal politikalar arasında eşgüdüm kurarak karma finansman mekanizmaları ile yatırım risklerinin azaltılması, ikincisi uluslararası programlar yoluyla yerel nitelikli işgücü havuzlarının

geliştirilmesi, üçüncüsü ise endüstriyel kümeler aracılığıyla kahverengi endüstrilerle sinerjiler yaratılması ve seçici teşviklerle yabancı yatırımların çekilmesidir (Wang vd., 2023).

Yenilenebilir kaynaklar bakımından zengin birçok gelişmekte olan ülke için yeşil hidrojen, doğal kaynak temelli ekonomilerden bilgi güdümlü endüstrilere geçişin anahtarıdır. Doğal varlıkların; yeni yönetişim biçimleri ve uluslararası işbirliği ile birleştirilmesi, ülkelerin yalnızca sanayiyi karbonsuzlaştırıp çeşitlendirmesini değil; aynı zamanda yenilenemeyen kaynaklara bağımlılığı azaltmasını, yeni teknolojik kapasiteler edinmesini ve bölgesel inovasyon ekosistemleri geliştirerek kalkınma yollarını temelden dönüştürmesini mümkün kılmaktadır (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023).

2.3. Yeşil Hidrojenin Pazar Potansiyeli

Önceki bölümlerde tartışılan tekno-ekonomik gelişmeler, yeşil hidrojenin pazar potansiyelini somutlaştırmaktadır. Bu bölüm, bu potansiyelin coğrafi ve sektörel dağılımını incelemektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, sanayileşme ve enerji talebinin eş zamanlı artışı, yeşil hidrojeni sürdürülebilir endüstriyel genişleme açısından stratejik bir araç konumuna taşımaktadır.

Yeşil hidrojenin bölgesel pazar potansiyeli, yalnızca küresel talep projeksiyonlarıyla değil; aynı zamanda maliyet eğrilerinin evrimi, yerel beceriler, doğal kaynak donanımları ve kurumsal yapıların bu teknolojiyi ne ölçüde içselleştirebildiğiyle anlaşılabilir. Bu yönüyle pazar potansiyeli, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinde yol bağımlılığı ve yol yaratma süreçlerinin somut bir çıktısıdır (IRENA 2020, Boschma vd., 2006).

2.3.1. Büyüme Beklentileri ve Maliyet Dinamikleri

Günümüzde dünya genelinde üretilen hidrojenin büyük çoğunluğu, fosil yakıtlara dayalı “gri hidrojen” formundadır. 2022 itibarıyla yaklaşık 95 milyon ton olan küresel hidrojen üretiminin çok küçük bir bölümü düşük emisyonludur (IEA, 2023). Ancak

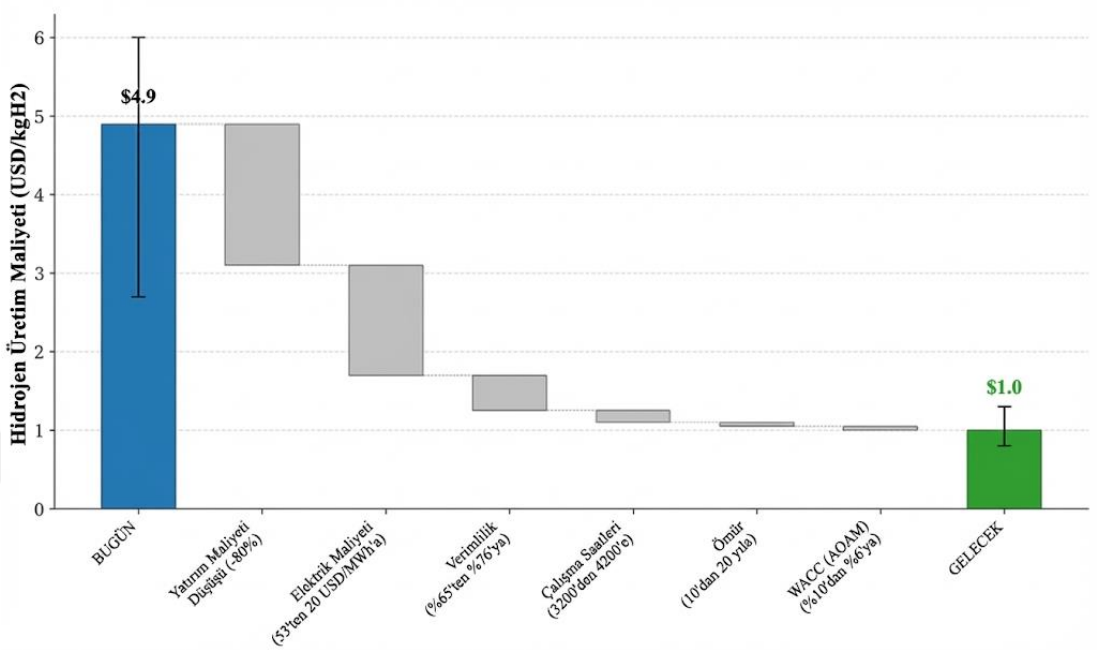
iklim politikalarının sıkılaşması ve sanayide karbonsuzlaşma gereksinimleri, yeşil hidrojen için olağanüstü bir büyüme penceresi açmaktadır (IEA, 2021; IRENA, 2022).

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın 1,5°C senaryosuna göre, küresel yeşil hidrojen üretimi 2050 yılında yaklaşık 492 milyon tona ulaşacak ve bu miktar toplam hidrojen arzının baskın bölümünü oluşturacaktır. Bu projeksiyon, yeşil hidrojenin niş bir teknoloji olmaktan çıkarak küresel enerji sisteminin ana bileşenlerinden biri hâline geleceğini göstermektedir (IRENA, 2022; IEA, 2021).

Bu hızlı büyümenin arkasındaki temel itici güçlerden biri maliyet düşüşleridir. Küresel elektrolizör kapasitesinin 2026 yılına kadar 15 GW seviyesine ulaşması beklenirken, eş zamanlı olarak üretim maliyetlerinde belirgin bir azalma öngörülmektedir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü analizlerine göre, 2028 yılı civarında bazı bölgelerde yeşil hidrojen ile gri hidrojenin maliyetlerinin eşitlenmesi mümkündür. Bu eşik, yeşil hidrojenin piyasa koşullarında desteksiz rekabet edebilmesi açısından kritik bir dönüm noktasıdır (OECD, 2022).

Maliyet düşüşlerinin arkasında birden fazla yapısal dinamik bulunmaktadır. Bunlar elektrolizör üretiminde artan teknik uzmanlık, öğrenme eğrilerinin hızlanması, otomasyon ve üretim ölçeğinin büyümesi, yenilenebilir elektrik maliyetlerindeki düşüş ve tedarik zincirlerinde ölçek ekonomilerinin devreye girmesidir.

Şekil 21: Yeşil Hidrojen Maliyet Düşüş Eğilimi



Kaynak: UNIDO, IRENA, IDOS 2023. Green Hydrogen for Sustainable Industrial Development A Policy Toolkit for Developing Countries'den Yazar tarafından uyarlanmıştır.

EEG perspektifinden bakıldığında bu maliyet düşüşü, rastlantısal bir teknolojik ilerleme değil, belirli bölgelerde yoğunlaşan öğrenme süreçleri, kurumsal destekler ve birikimli kapasite gelişimi sayesinde ortaya çıkan yol içi evrimsel bir süreçtir. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin gelişmekte olan ülkeler, bu düşen maliyet eğrisi üzerinde konumlanarak geç kalmışlık dezavantajını avantaja dönüştürebilmekte ve küresel yeşil hidrojen pazarında rekabetçi üreticiler hâline gelebilmektedir.

2.3.2. Coğrafi Dağılım ve Gelişmekte Olan Ekonomiler

Gelişmiş ekonomiler, yeşil hidrojen alanındaki bağlılıklarını ve uzun vadeli yönelimlerini büyük ölçüde Ulusal Hidrojen Stratejileri (UHS) aracılığıyla tanımlamaktadır. Ancak son yıllarda bu politika aracının yalnızca gelişmiş ekonomilerle sınırlı olmadığı görülmektedir. Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı ve IDOS (2023) verilerine göre,

yayımlanan UHS'lerin yaklaşık %40'ı gelişmekte olan ülkeler tarafından hazırlanmıştır. Bu eğilim, söz konusu ülkelerin yeşil hidrojenin uzun vadeli dönüştürücü potansiyelini stratejik düzeyde benimsediklerini göstermektedir (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023).

Afrika, Orta Doğu, Asya'nın belirli bölümleri ve Latin Amerika gibi güneş ve rüzgâr enerjisi bakımından zengin coğrafyalar, gelecekte düşük maliyetli yeşil hidrojen üretim merkezleri olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu ülkelerin rolü yalnızca ihracatçı kimliğiyle sınırlı değildir. Aksine, yeşil hidrojenin sıfır emisyonlu sanayileşme hedefleriyle bütünleştirilmesi, yerel katma değer yaratımı (istihdam, beceri kazanımı, yatırım mobilizasyonu ve teknolojik öğrenme) açısından belirleyici olacaktır (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023).

Bu çerçevede yeşil hidrojenin pazar potansiyeli, gelişmekte olan ülkelerde kendiliğinden ve otomatik biçimde ortaya çıkan bir olgu değildir. Aksine bu potansiyel; mevcut endüstriyel kapasiteler, kurumsal güç ve yönetişim kalitesi, doğal kaynak donanımı tarafından şekillendirilen farklı evrimsel yollar üzerinden oluşmaktadır. Bu coğrafi çeşitlilik, Bölüm 3'te ampirik analiz için seçilen ülkelerin, Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika, Mısır, Fas ve Türkiye, neden tek tip bir yeşil hidrojen stratejisi izlemeyeceğini açıklamaktadır. Bu ülkeler; başlangıçtaki endüstriyel kapasite düzeyleri, kurumsal kalite, mevcut enerji ve sanayi yolları bakımından önemli farklılıklar göstermektedir.

Analizin ekonomik mantığı, farklı başlangıç koşullarının yeşil hidrojen büyüme yörüngelerini nasıl şekillendirdiğini karşılaştırmalı biçimde değerlendirmektir. Bu bağlamda, örneğin Hindistan ve Güney Afrika gibi ülkelerin ağır sanayideki yerleşik becerilerini yurt içi karbonsuzlaşma amacıyla kullanmaları; Türkiye ve Brezilya gibi ülkelerin ise fazla yenilenebilir potansiyele dayalı ihracat odaklı yeşil hidrojen yolları geliştirmeleri beklenmektedir.

2.3.3. Mevcut Kapasitelerin Değerlendirilmesi

Evrimsel Ekonomik Coğrafya yaklaşımı, bölgelerin ve ülkelerin ekonomik gelişiminin yol bağımlı olduğunu; yani mevcut endüstriyel faaliyetler, kurumsal

kapasiteler ve faktör donanımları tarafından şekillendiğini vurgulamaktadır. Yeşil hidrojenin pazar potansiyeli de bu bağlamda her ülkede farklı biçimlerde açığa çıkmaktadır.

Güneş ve rüzgâr enerjisi bakımından son derece zengin, ancak ağır sanayi ve ileri üretim bilgisinde sınırlı olan ülkeler (örneğin Namibya, Moritanya, Şili veya Suudi Arabistan) yeşil hidrojeni ağırlıklı olarak ihracat odaklı bir enerji vektörü olarak konumlandırmaktadır (OECD, 2022). Bu ülkeler için temel avantaj, düşük maliyetli yenilenebilir elektrik üretimine dayalı rekabetçi hidrojen arzıdır.

Buna karşılık, yerleşik sanayi tabanına sahip ülkeler (gübre, rafineri, çelik ve kimyasallar gibi sektörlerde yoğunlaşmış ekonomiler) yeşil hidrojeni öncelikle yurt içi karbonsuzlaşma aracı olarak kullanabilmektedir. Fas'ın fosfat ve gübre sektöründe, Güney Afrika ve Hindistan'ın çelik ve ağır sanayide yeşil hidrojen kullanımına yönelmesi bu stratejinin somut örnekleridir. Bu ülkelerde yeşil hidrojen, yalnızca emisyonları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji yoğun sektörlerin rekabet gücünü koruyan bir unsur hâline gelmektedir.

Bu bağlamda literatürde "yenilenebilir çekim (renewables pull)" olarak adlandırılan etki ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından avantajlı bölgeler, daha düşük enerji ve emisyon maliyetleri sayesinde yeni endüstriyel yatırımları kendilerine çekebilmektedir (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023). Böylece yeşil hidrojen, yalnızca mevcut sanayinin karbonsuzlaştırılmasını değil, aynı zamanda yeni endüstriyel kümelerin oluşumunu da teşvik etmektedir.

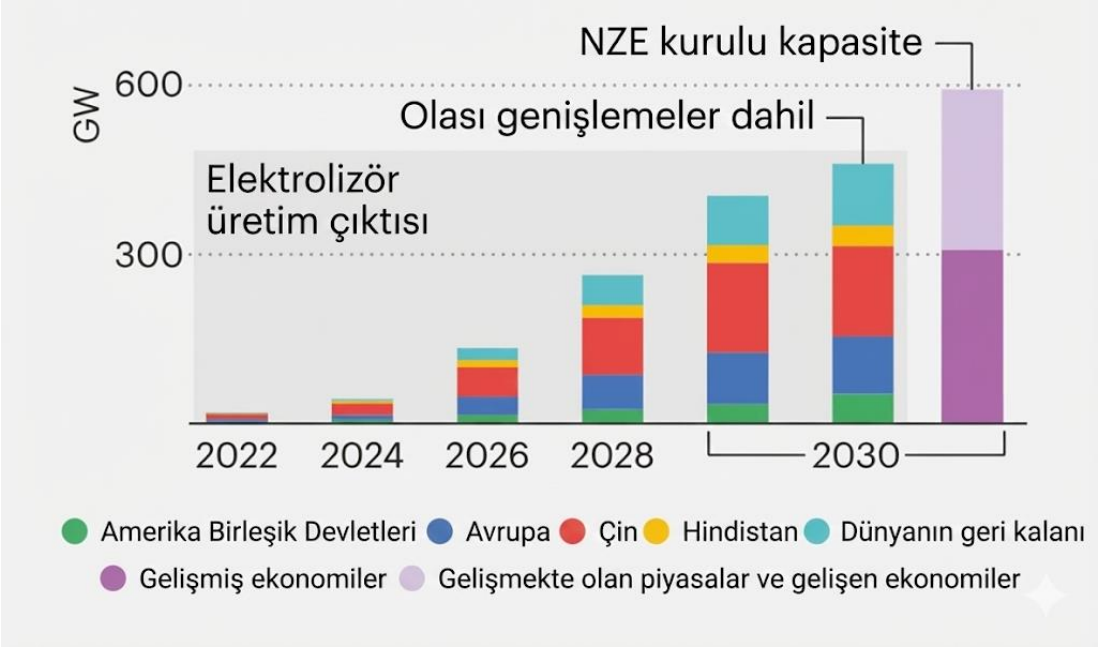
EEG perspektifinden bakıldığında bu süreç, yeşil hidrojenin mevcut yolları kırarak değil, çoğu zaman mevcut kapasitelerle ilişkili yeni yollar yaratarak yaygınlaştığını göstermektedir. Dolayısıyla pazar potansiyeli, ülkelerin ne kadar yenilenebilir kaynağa sahip olduğundan ziyade, bu kaynakları hangi endüstriyel ve kurumsal bağlamda değerlendirebildiklerine bağlı olarak şekillenmektedir.

2.3.4. Maliyet Rekabetçiliğinin Sağlanması

Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin olmak, ülkeler için yeşil hidrojen ekonomisinde yapısal bir maliyet avantajı yaratmaktadır. Bu avantaj, literatürde "yenilenebilir çekim (renewables pull)" etkisi olarak tanımlanan dinamik içinde söz konusu ülkeleri stratejik olarak öne çıkarmaktadır. Güneş ve rüzgâr maliyetlerinin düşük olduğu gelişmekte olan ekonomiler, yeşil hidrojen üretiminde gelişmiş sanayi merkezlerine kıyasla belirgin bir maliyet rekabetçiliği elde etmektedir.

Örneğin Şili, Suudi Arabistan, Fas ve Avustralya gibi bölgelerde yeşil hidrojenin düzleştirilmiş maliyetinin (LCOH), Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki sanayi merkezlerinden kayda değer ölçüde daha düşük olması beklenmektedir (IRENA, 2020). Bu durum, gelişmekte olan ülkelerin evrimsel bir perspektiften yalnızca enerji ihracatçısı değil, aynı zamanda ucuz yenilenebilir enerjiye dayalı olarak yeniden konumlanan enerji-yoğun endüstrilere ev sahipliği yapan ekonomiler hâline gelmesine olanak tanımaktadır. Böylece doğal kaynaklar, düşük karbonlu sanayileşme için stratejik olarak yeniden birleştirilen üretim faktörlerine dönüşmektedir.

Şekil 22: Kümülatif Elektrolizör Üretim Kapasitesi



Kaynak: IEA (2023). Hydrogen – Net Zero Emissions Guide (CC BY 4.0)

Şekil 22'de görüldüğü üzere, elektrolizör üretiminde Çin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri hâlen baskın aktörlerdir; bununla birlikte Hindistan da önemli bir üretim merkezi olarak öne çıkmaktadır. Bu yoğunlaşma, yeni oyuncular açısından yüksek giriş engelleri yaratmaktadır. Ancak duyurulan tüm projelerin hayata geçirilmesi durumunda dahi, küresel elektrolizör üretim kapasitesi net sıfır hedefleri için gerekli düzeyin yaklaşık %80'ine ulaşmaktadır (IEA, 2024). Bu açık, gelişmekte olan ülkeler için stratejik ortaklıklar, Ar-Ge yatırımları ve yerli sanayi politikaları yoluyla değer zincirine daha derin entegrasyon açısından önemli bir fırsat alanı oluşturmaktadır.

2.3.5. Talep Belirsizliği ve Strateji

Yeşil hidrojen ekonomisinin karşılaştığı temel sorunlardan biri, özellikle ihracata dayalı projeler açısından talep belirsizliğidir. Gelecekteki fiyatlar, alıcı ülkelerin karbon politikaları ve sertifikasyon rejimleri netleşmeden büyük ölçekli yatırımlar yüksek risk taşımaktadır. Bu nedenle, yeşil hidrojen pazar potansiyelinin hayata geçmesi kendiliğinden değil, bilinçli bir stratejik sıralama yoluyla mümkün olmaktadır. Bu bağlamda kurumların ve politika yapıcıların rolü belirleyicidir. Risklerin azaltılması için; güçlü ve öngörülebilir yurt içi talep, net ihracat hedefleri, önceliklendirilmiş sektörler arasında tutarlı bir çerçeve oluşturulması gerekmektedir (OECD, 2022). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, hangi nihai kullanım alanlarının (çelik, gübre, rafineri, taşımacılık vb.) ilk aşamada destekleneceğinin açık biçimde tanımlanmasını, yatırımcı güveni açısından kritik görmektedir. Bu tür bir stratejik sıralama, EEG açısından bakıldığında, yol yaratmanın kurumsal boyutunu temsil etmektedir.

2.3.6. Altyapı ve Uluslararası İşbirliği

Yeşil hidrojenin pazar potansiyelinin fiilen gerçekleşmesi, yalnızca maliyet avantajına değil, aynı zamanda fiziksel ve kurumsal altyapının varlığına bağlıdır. Boru hatları, limanlar, depolama tesisleri ve dönüşüm altyapısı (amonyak, metanol vb.) olmaksızın uluslararası hidrojen ticareti mümkün değildir. Bu altyapının etkin kullanımı için ise küresel ölçekte kabul gören standartlar, sertifikasyon rejimleri ve

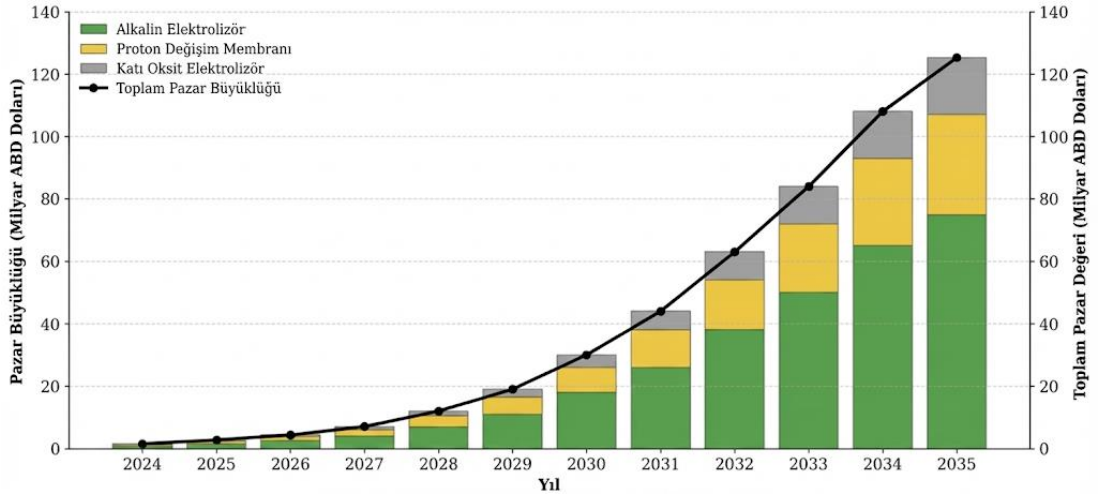
ticaret kurallarına ihtiyaç vardır. Bu tür kurallar, pazar güvenini artırarak uzun vadeli sözleşmelerin önünü açmaktadır.

Finansman boyutu da en az altyapı kadar kritiktir. Özellikle yüksek başlangıç sermaye gereksinimleri, kamu-özel ortaklıklarını ve çok taraflı finansman mekanizmalarını zorunlu kılmaktadır. Dünya Bankası'nın H4D (Hydrogen for Development) Ortaklığı ve Adil Enerji Dönüşüm Ortaklıkları (JETP) bu yönde geliştirilen önemli girişimlerdir. Ayrıca bölgesel hidrojen ticaret işbirlikleri, ölçek ekonomilerini mümkün kılarak hem ana yatırımları hem de tamamlayıcı yatırımları teşvik etmektedir (Medinilla vd., 2024).

EEG perspektifinden bakıldığında bu çok düzeyli işbirlikleri, yalnızca ticareti kolaylaştıran araçlar değil; aynı zamanda bölgesel yol yaratımını mümkün kılan kurumsal eş-evrim mekanizmalarıdır. Altyapı, finansman ve politika uyumu bir araya geldiğinde, yeşil hidrojen pazarı teknik bir potansiyelden ekonomik olarak işleyen bir endüstriyel sisteme dönüşebilmektedir.

2.3.7. Farklılaşan Gelecek Senaryoları

Şekil 23: Yeşil Hidrojen Pazar Projeksiyonu (2024-2035)



Kaynak: Research and Markets 2025. Green Hydrogen Market Industry Report 2025, Global Forecasts to 2035'ten Yazar tarafından uyarlanmıştır.

Yeşil hidrojenin pazar potansiyeli hem nicel olarak büyük hem de mekânsal olarak heterojendir. Önceki bölümlerde gösterildiği üzere, kısa ve orta vadede maliyet düşüşleri ile politika teşvikleri bu pazarın temel itici güçlerini oluşturmaktadır. Ancak uzun vadede, özellikle gelişmekte olan bölgelerde, yeşil hidrojenin ekonomik ve endüstriyel etkisini belirleyecek olan unsur ülkelerin izlediği evrimsel yollar olacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının bolluğu, birçok ülke için güçlü bir "yenilenebilir çekim" etkisi yaratmaktadır (IRENA, 2022; IEA, 2023). Bununla birlikte bu çekim, otomatik olarak homojen sonuçlar üretmemektedir. Aksine ülkeler; mevcut endüstriyel kapasiteleri, kurumsal güçleri, birikmiş uzmanlıkları ve stratejik politika tercihleri doğrultusunda farklı kalkınma ve uzmanlaşma yolları izlemektedir (Boschma vd., 2006). Bu farklılaşma sonucunda bazı ülkeler düşük maliyetli yeşil hidrojen ihracatçısı olarak öne çıkarken, bazıları yurt içi sanayi tabanını karbonsuzlaştırmaya odaklanmakta, bazıları ise yenilenebilir çekim yoluyla tamamen yeni yeşil endüstrileri kendilerine çekerek yeni endüstriyel yollar yaratmaktadır (OECD, 2022; Boschma, 2017).

Bu bağlamda yeşil hidrojen ekonomisi, tek tip bir küresel modele doğru yakınsamaktan ziyade, yol bağımlı ve çeşitlendirilmiş bir gelecek ortaya koymaktadır. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifiyle bakıldığında bu durum, ülkelerin başlangıç koşullarının ve kurumsal kapasitelerinin, yeşil hidrojen pazarındaki konumlarını belirlemede merkezi rol oynadığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, rekabet avantajı yalnızca doğal kaynak bolluğundan değil, bu kaynakların hangi endüstriyel ve kurumsal çerçeve içinde yeniden yapılandırıldığından doğmaktadır.

Şekil 23'te sunulan projeksiyonlara göre, küresel yeşil hidrojen pazarının 2035 yılına kadar 125,3 milyar ABD doları büyüklüğe ulaşması beklenmektedir. Bu büyüme; ağır sanayinin karbonsuzlaştırılması, yeni ihracat değer zincirlerinin oluşturulması ve yenilenebilir kaynakların stratejik biçimde kullanılması gibi çok sayıda uygulama alanına dayanmaktadır. Dolayısıyla yeşil hidrojen, yalnızca enerji dönüşümünün teknik bir bileşeni değil; aynı zamanda yeni ticaret kalıpları, istihdam yapıları ve endüstriyel uzmanlaşmalar yaratan geniş kapsamlı bir ekonomik fırsat alanı sunmaktadır (UNIDO, IRENA, IDOS, 2023).

Sonuç olarak, yeşil hidrojenin geleceği tek bir doğrusal dönüşüm yolu değil; farklı ülkelerin kendi tarihsel, kurumsal ve coğrafi koşullarına bağlı olarak şekillenen çoklu ve eşzamanlı evrimsel yörüngeler üzerinden ilerlemektedir. Bu tespit, Bölüm 3'te gerçekleştirilecek ampirik analiz için kritik bir ön kabuldür: ülkelerin yeşil hidrojen alanındaki potansiyeli, ancak bu yol bağımlı farklılıklar dikkate alındığında sağlıklı biçimde karşılaştırılabilir ve ölçülebilir hâle gelmektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SEÇİLMİŞ ÜLKELERDE YEŞİL HİDROJEN POTANSİYELİ: AMPİRİK ANALİZ

Bu çalışma, seçilmiş bir BRICS+ ülkeleri grubu (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika ve Mısır) ile Fas ve Türkiye'de yeşil hidrojenin endüstriyel potansiyelini incelemektedir. Analizin temel amacı, bu ülkelerde yeşil hidrojenin yol yaratma potansiyelini belirleyen tekno-ekonomik ve kurumsal koşulların göreli önemini karşılaştırmalı olarak ölçmektir.

Bu evrimsel dinamikleri ampirik olarak değerlendirebilmek amacıyla çalışmada, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Ağırlıklı Toplam Modeli (ATM) temelli nicel bir çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu metodolojik çerçeve, tekno-ekonomik ve kurumsal faktörlerin sistematik biçimde ağırlıklandırılmasına olanak tanımakta; ülkeler arasındaki yol yaratma potansiyelindeki farklılıkları yansıtan bileşik bir endeksin (Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi – YHPE) oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

Araştırma, gelişmekte olan ülkelerin endüstriyel büyümeyi çevresel sürdürülebilirlikle birlikte gerçekleştirme arayışında olduklarını vurgulamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojen, bu ülkelere hem karbon kilitlenmesini aşma hem de yeni endüstriyel yollar oluşturma açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte, rekabetçi bir yeşil hidrojen endüstrisi inşa etmenin evrimsel yörüngesi; ülkelerin kaynak donanımları, kurumsal mirasları ve teknolojik kapasiteleri arasındaki farklılıklar nedeniyle ülkeden ülkeye önemli ölçüde değişmektedir.

3.1. Örneklem Seçimi

Bu çalışma, yeşil hidrojen sektöründe gözlenen farklı evrimsel yörüngeleri temsil edebilecek sekiz önemli gelişmekte olan ülkeyi kapsayan amaçlı örnekleme yöntemini benimsemektedir. Örneklem; temel BRICS ekonomileri olan Brezilya, Rusya,

Hindistan, Çin ve Güney Afrika ile birlikte, bölgesel ölçekte stratejik öneme sahip Türkiye, Mısır ve Fas'ı içermektedir.

Bu ülke grubu, yenilenebilir enerji üretiminde halihazırda yüksek kapasiteye sahip aktörler ile gelecekte hızlı büyüme potansiyeli taşıyan ekonomileri birlikte temsil edecek biçimde seçilmiştir. Çin 2023 yılı itibarıyla küresel yenilenebilir elektrik üretiminin yaklaşık %32'sini gerçekleştirerek açık ara baskın bir konumda yer almaktadır. Çin'i, küresel toplamın yaklaşık %7'sine katkıda bulunan Hindistan ve Brezilya izlemektedir (Ember, 2025). Bu dağılım, seçilen ülkeler arasında mevcut yenilenebilir enerji üretim kapasitesi açısından belirgin bir yoğunlaşma bulunduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 25).

Karşılaştırmalı analizin ikinci boyutunu, sanayileşme düzeyi görece yüksek ancak farklı kurumsal ve makroekonomik özellikler sergileyen Rusya, Güney Afrika ve Türkiye oluşturmaktadır. Dünya Bankası sınıflandırmasına göre Güney Afrika ve Türkiye üst-orta gelirli, Rusya ise yüksek gelirli ekonomiler arasında yer almaktadır. Buna rağmen Rusya, yüksek doğal kaynak donanımına karşın belirgin kurumsal ve jeopolitik kısıtlar altında dönüşüm arayışını temsil ederken; Güney Afrika ve Türkiye, yerleşik sanayi tabanlarına sahip olmakla birlikte makroekonomik istikrar ve enerji dönüşümü kapasitesi bakımından farklılaşan iki gelişmekte olan ekonomi olarak analize dâhil edilmiştir. Bu ülkelerin yenilenebilir enerji kapasitelerinin bileşimi ve toplam kurulu güçleri arasındaki farklar, Şekil 25'te sunulan karşılaştırmalı verilerde açık biçimde görülmektedir.

Son olarak, Mısır ve Fas, mevcut yeşil hidrojen ve yenilenebilir enerji kapasiteleri görece sınırlı olmasına rağmen, politika güdümlü stratejiler aracılığıyla yeni endüstriyel yolların nasıl başlatılabileceğini göstermeleri nedeniyle örnekleme dâhil edilmiştir. Bu iki ülke, yenilenebilir elektrik üretiminin toplam enerji karması içindeki payı ve teknolojik bileşimi itibarıyla, daha küçük ve orta ölçekli ekonomilerde yeşil hidrojenin sanayi gelişimi için nasıl bir kaldıraç işlevi görebileceğine dair önemli örnekler sunmaktadır (bkz. Şekil 25).

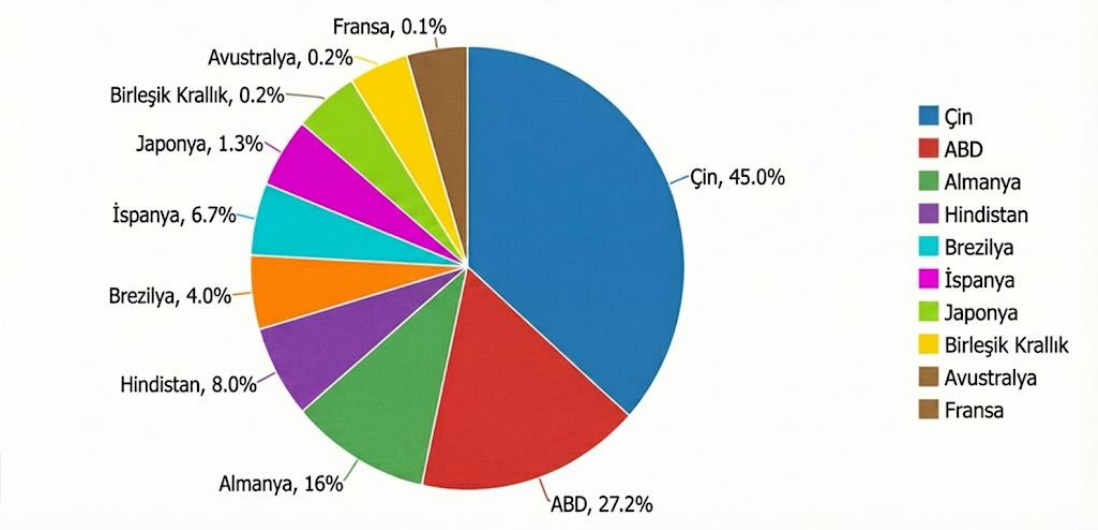
Bu çok katmanlı ülke seçimi, çalışmanın temel amacına uygun olarak, yeşil hidrojenin farklı başlangıç koşulları altında nasıl farklı yol yaratma sonuçları üretebileceğini karşılaştırmalı biçimde analiz etmeye olanak tanımaktadır.

Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji kaynakları 2023 itibarıyla dünya toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %18'ini, elektrik üretimi özelinde ise yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır (IEA, 2024; IRENA, 2023). Buna karşın, bu üretimin ülkeler arasındaki dağılımı son derece asimetriktir. Çin tek başına küresel yenilenebilir elektrik üretiminin yaklaşık %32'sini gerçekleştirirken, Hindistan ve Brezilya yaklaşık %7'lik paylarla onu izlemektedir. Türkiye, Güney Afrika, Mısır ve Fas'ın küresel yenilenebilir elektrik üretimindeki payları ise %1'in altında kalmaktadır. Bu tablo, yenilenebilir enerjinin küresel enerji dönüşümündeki artan rolüne rağmen, ölçek avantajlarının ve başlangıç koşullarının ülkelerin yeşil hidrojen yörüngelerini belirlemede hâlen kritik olduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 24 ve Şekil 25).

Bir bütün olarak ele alındığında bu örneklem, farklı tarihsel kilitlenmelere, kurumsal kapasitelerine ve tekno-ekonomik temellere sahip ülkeleri bir araya getirerek EEG literatüründeki "yol bağımlılığı çeşitleri" kavramını yansıtmaktadır. Bu çeşitlilik, farklı başlangıç koşullarının ayrışan yeşil hidrojen yörüngelerini nasıl şekillendirdiğinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

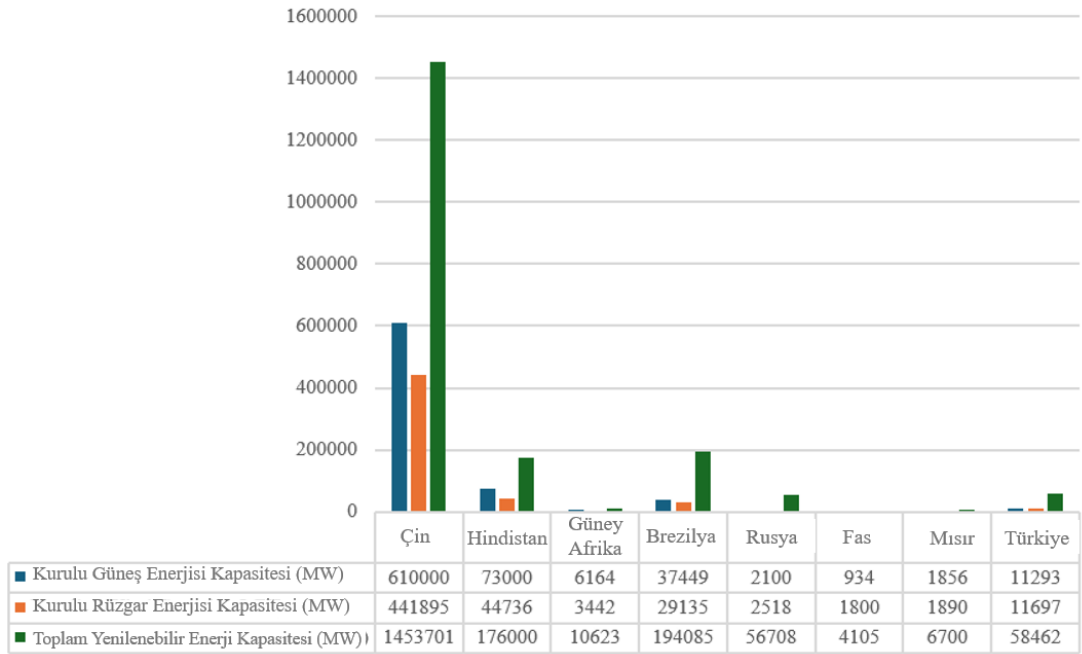
Bununla birlikte, seçilen ülkelerde hidrojenin mevcut enerji karması içindeki payı oldukça sınırlıdır. Hidrojen, çoğu durumda nihai enerji tüketiminden ziyade rafineri, amonyak ve kimya gibi sanayi süreçlerinde ara girdi olarak kullanılmaktadır. 2023 itibarıyla küresel hidrojen üretimi yaklaşık 97 Mt düzeyinde olup, bunun %1'den azı düşük emisyonlu (yeşil veya mavi) hidrojen kategorisine girmektedir. Bu durum, yeşil hidrojenin seçilen ülkelerde hâlihazırda enerji talebinin temel bir bileşeni olmaktan ziyade, geleceğe dönük bir endüstriyel dönüşüm ve yol yaratma aracı olarak ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Şekil 24: Ülkelere Göre Yeşil Hidrojen Üretim Kapasitelerinin Payları



Kaynak: IRENA 2023. Renewable Electricity Generation by Country'den yazar tarafından uyarlanmıştır.

Şekil 25: Seçilmiş Ülkelerin Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (2023)



	Çin	Hindistan	Güney Afrika	Brezilya	Rusya	Fas	Mısır	Türkiye
Kurulu Güneş Enerjisi Kapasitesi (MW)	610000	73000	6164	37449	2100	934	1856	11293
Kurulu Rüzgar Enerjisi Kapasitesi (MW)	441895	44736	3442	29135	2518	1800	1890	11697
Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)	1453701	176000	10623	194085	56708	4105	6700	58462

Kaynak: IRENA

3.2. Yöntem

Yeşil hidrojen potansiyelinin ülkeler arası karşılaştırmalı değerlendirilmesine yönelik olarak literatürde çeşitli bileşik endeksler ve metodolojik çerçeveler geliştirilmiştir. Baumgarten vd. (2024), MENA bölgesi için politik ve ekonomik boyutları bütünleştiren bir Hidrojen Ekonomisi Endeksi önermektedir. Hjeij vd. (2023), ülkelerin hidrojen ihracatçısı olarak rekabet güçlerini ölçmeyi amaçlayan Hidrojen İhracat Rekabetçiliği Endeksini geliştirmiştir. Okonkwo vd. (2021), kurak bölgelerde yeşil hidrojen üretimi ve ihracatına yönelik bütüncül bir karar verme metodolojisi sunarken, Kakoulaki vd. (2021) Avrupa'da yeşil hidrojen potansiyelinin bölgesel düzeyde bir değerlendirmesini gerçekleştirmiştir.

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), karmaşık ve çok kriterli karar problemlerini ele alma kapasitesi nedeniyle bu çalışmanın temel analitik aracı olarak benimsenmiştir. AHS, çok kriterli karar verme problemlerinde yaygın biçimde kullanılan ve karmaşık karar setlerini yapılandırılmış bir biçimde değerlendirmeye imkân tanıyan bir yöntemdir (Saaty, 1980).

Bu metodoloji, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) teorik çerçevesini ampirik olarak işlevselleştirmek üzere tasarlanmıştır. Yol bağımlılığı ve birlikte evrim perspektifinden ülkelerin evrimsel potansiyelini ortaya koyabilmek için çok sayıda veri noktası kullanılmaktadır. Bölgesel endüstriyel avantajları ve politika etkilerini anlamak, tarihsel miraslar ile yeni endüstriyel fırsatlar arasındaki dinamik etkileşimi yakalayabilen yöntemlerin uygulanmasını gerektirmektedir (Martin v.d., 2006).

Bu çalışma, Bölüm 2'de geliştirilen EEG kavramsal çerçevesini, ampirik analizde kullanılabilir bir değerlendirme mimarisine dönüştürmektedir. Bu doğrultuda EEG literatüründeki "yol bağımlılığı" ve "yol yaratma" ayrımı, Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi'nin (YHPE) kriter seçimi ve iki kümeli yapısı üzerinden somutlaştırılmıştır.

Tekno-ekonomik göstergeler, ülkelerin tarihsel birikim yoluyla devraldığı üretim altyapısını, enerji sistemlerini ve mevcut endüstriyel donanımı temsil ederek başlangıç koşullarını yakalamaktadır.

Kurumsal göstergeler ise politika tutarlılığı, yönetişim kapasitesi ve yatırım iklimi gibi unsurlar aracılığıyla, dönüşümü mümkün kılan yol yaratma kapasitesini temsil etmektedir.

Bu çerçevede YHPE, yalnızca ülkelerin mutlak kapasite düzeylerini ölçmeyi değil; aynı zamanda bu kapasitenin sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir endüstriyel yola dönüşebilme olasılığını, EEG'nin birlikte-evrim perspektifi doğrultusunda değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Aşağıdaki Tablo 4, Bölüm 2'de tartışılan temel EEG kavramları ile bu çalışmada kullanılan somut göstergeler (AHS kriterleri) arasındaki eşlemeyi özetlemektedir.

Tablo 4: EEG Kavramları ve Karşılık Gelen Göstergeler

EEG Kavramı	**Çalışmadaki Tanımı**	**Gösterge (AHS Kriterleri)**
Yol Bağımlılığı	Tarihsel altyapıya, mevcut endüstriyel varlıklara ve ölçek avantajlarına bağlılık	Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW), Güneş Kapasitesi (MW), Rüzgâr Kapasitesi (MW), Hidrojen Üretim Projeleri (Sayı), Hidrojen İhracatı (1000 USD), Kişi Başına GSYİH (cari USD)
Yol Yaratma	Kurumların dönüşüm risklerini yönetme, koordinasyon sağlama ve yatırımı mümkün kılma kapasitesi	Hükümet Etkinliği, Düzenleyici Kalite, Politik İstikrar, Yolsuzluğun Kontrolü
Birlikte Evrim	Teknoloji/varlıklar ile kurumların eşzamanlı gelişimiyle ortaya çıkan endüstriyel avantaj	Toplam YHPE Skoru (Tekno-Ekonomik + Kurumsal kümelerin ağırlıklı toplamı)

Bu metodolojik çerçeve, EEG'nin temel kavramlarını ölçülebilir ampirik göstergelere dönüştürme çabasını ortaya koyarak ülkeler arası karşılaştırmaya olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, kullanılan yaklaşım belirli varsayımlar ve sınırlılıklar içermektedir.

İlk olarak, AHS kapsamında kullanılan kriter ağırlıkları teorik olarak tutarlı olmakla birlikte, tek bir uzman yargı setine dayanmaktadır. Bu çalışmada ikili karşılaştırmalar, yazar tarafından EEG teorik çerçevesi, IRENA'nın yeşil hidrojen kapasite değerlendirme metodolojisi (IRENA, 2022) ve Bölüm 1-2'de sunulan kapsamlı literatür taramasının sentezi temel alınarak gerçekleştirilmiştir. İkili karşılaştırmalarda kullanılan yargılar, şu temel varsayımlara dayanmaktadır: (i) yeşil hidrojen sektörünün erken gelişim aşamasında fiziksel üretim kapasitesi ve proje varlığı, endüstriyel yol yaratımının ön koşuludur; (ii) kurumsal faktörler bu kapasitenin sürdürülebilir biçimde ölçeklenmesini mümkün kılan çarpan etkisi yaratmaktadır. Gelecek çalışmalarda, sanayi temsilcileri, akademisyenler ve politika yapıcıları kapsayan daha geniş uzman grupları ile Delphi yöntemi gibi katılımcı yaklaşımlar kullanılarak ağırlıkların sağlamlığı test edilebilir.

İkinci olarak, Min–Maks normalleştirme yöntemi örneklem içi göreli bir sıralama sunmakta olup ülkelerin mutlak performans düzeylerini yansıtmamaktadır. Bu yöntemin önemli bir sınırlılığı, skorların örneklem bileşimine bağlı olmasıdır. Örneğin, 2023 yılında Çin'in 0,952'lik YHPE skoru, bu sekiz ülkelik örneklem içinde 'en yüksek' performansı temsil etmektedir; ancak bu skor, küresel ölçekte mutlak bir 'mükemmellik' anlamına gelmemektedir. Örnekleme farklı ülkeler (örneğin Almanya, Japonya veya Avustralya) eklendiğinde tüm göreli skorlar yeniden hesaplanacak ve değişecektir. Bu nedenle YHPE skorları, ülkelerin mutlak potansiyel eksikliğinden ziyade seçilmiş örneklem içindeki göreli konumlarını yansıtan karşılaştırmalı göstergeler olarak yorumlanmalıdır.

3.2.1. Araştırma Yönteminin Ayrıntılandırılması

Araştırma yöntemi, bir ülkenin yeşil hidrojen sektöründeki endüstriyel avantajının çok boyutlu bir kavram olduğu varsayımına dayanmaktadır. EEG çerçevesinden hareketle model, bu avantajın teknolojik varlıklar ile kurumsal yapıların birlikte evrimi sonucunda ortaya çıktığını savunmaktadır (Wellbrock, 2021). Bu bakış açısına göre endüstriyel avantaj, yalnızca “sert” unsurların (yenilenebilir kapasite, üretim altyapısı, proje ölçeği) ya da yalnızca “yumuşak” unsurların (yönetişim kalitesi, düzenleyici istikrar, politika koordinasyonu) varlığıyla açıklanamaz. Aksine, teknolojik kapasiteler

ile kurumsal çerçevelerin eşzamanlı ve tamamlayıcı biçimde gelişmesi, yeşil hidrojenin sürdürülebilir bir endüstriyel yola dönüşebilmesinin ön koşuludur. Bu nedenle YHPE, ülkelerin yeşil hidrojen alanında yeni endüstriyel yollar yaratma kapasitesini karşılaştırmalı biçimde ölçmeyi amaçlamaktadır. Buradan yola çıkarak çalışmada, Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi (YHPE) adlı bileşik bir endeks oluşturulmaktadır. Bu yaklaşım, evrimsel ekonomik coğrafya, evrimsel iktisat ve teknolojik yetenekler literatüründe yaygın olarak benimsenen temel bir varsayıma dayanmaktadır: Rekabet gücü, kısa vadeli çıktılardan ziyade tarihsel olarak birikmiş üretim kapasiteleri, ilişkili endüstriyel yapılar ve kurumsal uyum süreçleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle YHPE, çıktıları değil; bu çıktıları mümkün kılan yapısal ve evrimsel önkoşulları yakalamayı amaçlamaktadır.

YHPE, teorik literatürden türetilen iki birincil evrimsel kümenin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir.

Birinci küme olan Tekno-Ekonomik Kapasiteler, yeşil hidrojen üretimi için gerekli olan "sert" varlıkları temsil etmektedir. Bu küme; yenilenebilir kaynak donanımı, fiziksel altyapı, mevcut hidrojen proje hatları ve ilişkili endüstriyel çeşitlilik gibi unsurları kapsamaktadır (IRENA, 2022; M. Maka vd., 2024). Bu göstergeler, bir ülkenin yeşil hidrojen üretimine teknik ve endüstriyel olarak ne ölçüde hazır olduğunu yansıtmaktadır.

İkinci küme olan Kurumsal Çevre ise, büyük ölçekli ve uzun vadeli yatırımların önündeki belirsizlikleri azaltan, adaptif kapasiteyi mümkün kılan "yumuşak" unsurları içermektedir. Bu küme; yönetişim kalitesi, düzenleyici çerçeveler, politik istikrar ve politik iklim gibi faktörlerden oluşmaktadır (IRENA, 2022; Do, 2024). Kurumsal çevre, yeşil hidrojen gibi sermaye yoğun ve yol bağımlılığı yüksek sektörlerde yatırım kilitlenmesi riskini azaltan temel belirleyici olarak ele alınmaktadır.

Her iki küme de, IRENA'nın ülke kapasiteleri karakterizasyonuna dayalı olarak yapılandırılmıştır (IRENA, 2022). IRENA, ülkeleri genellikle iki eksen üzerinden sınıflandırmaktadır:

(i) Tekno-ekonomik potansiyel (yenilenebilir kaynak bolluğu, endüstriyel altyapı ve proje olgunluğu gibi) ve

(ii) Kurumsal hazırlık düzeyi (politika desteği, yönetişim kapasitesi ve düzenleyici istikrar gibi).

Bu çerçevede, Tekno-Ekonomik küme yenilenebilir enerji kapasitesi ve hidrojen proje sayıları gibi fiziksel ve endüstriyel temeli yansıtan göstergeleri; Kurumsal küme ise politik istikrar ve düzenleyici kalite gibi politika ve yönetişim ortamını yansıtan göstergeleri içermektedir. IRENA bu iki boyutu, bir ülkenin yenilenebilir avantajlardan yararlanmaya hazır olup olmadığını ve bu avantajları sürdürülebilir bir endüstriyel büyümeye dönüştürebilecek kurumsal çerçeveye sahip olup olmadığını değerlendirmek için birlikte kullanmaktadır.

Bu çalışmada amaç, ülkelerin tekno-ekonomik kapasiteleri ile kurumsal hazırlık düzeylerinin birbirini karşılıklı olarak desteklediği ve eşzamanlı biçimde geliştiği düzeyi değerlendirmektir. Bu bağlamda YHPE, yalnızca kapasite birikimini değil, bu kapasitenin kurumsal çevre tarafından etkin biçimde kullanılabilir ve dönüştürülebilir olmasını ölçmeyi hedeflemektedir.

Son olarak, YHPE analizi; birlikte evrim ve yol bağımlılığına dayalı ayrışma ile ilgili temel hipotezleri test etmek için kullanılmaktadır. Bileşik bir endeks kullanımı, EEG'nin çok boyutlu yapısıyla doğrudan uyumludur. Evrimsel süreçler tek bir değişkenle yakalanamaz; bunun yerine YHPE, teknolojik varlıklar, kurumsal kalite ve endüstriyel kapasite gibi birbirini pekiştiren mekanizmaları tek bir çerçevede birleştirerek, karmaşık evrimsel dinamiklerin nicel olarak test edilmesine olanak tanımaktadır.

3.2.2. Araştırma Tasarımı

Bu çalışma, birleşik bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) modeli kullanan nicel, deneysel olmayan bir araştırma tasarımına dayanmaktadır. Araştırma problemi; ülkelerin yeşil hidrojen bağlamında sahip oldukları tekno-ekonomik ve kurumsal özelliklerin, evrimsel yollarını nasıl şekillendirdiğini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi gerektirdiğinden, birden fazla ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriterin eşzamanlı analizini zorunlu kılmaktadır. Bu tür çok boyutlu karar problemleri için ÇKKV yaklaşımları literatürde yaygın olarak önerilmektedir (Serna vd., 2023; Taherdoost vd., 2023).

Saaty (1980) tarafından geliştirilen AHS, kriterlerin göreli önemlerinin belirlenmesinde standart bir yöntemdir. Ancak literatür, karmaşık enerji planlama problemlerinde yalnızca AHS kullanımının alternatiflerin net sıralamasını üretmekte yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Bu nedenle çalışma, modern enerji ve sürdürülebilirlik literatüründe yaygın biçimde benimsenen hibrit bir ÇKKV yaklaşımını izlemektedir (örneğin Serna vd., 2023).

Bu hibrit yaklaşım, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ile Ağırlıklı Toplam Modeli'nin (ATM) ardışık ve tamamlayıcı biçimde kullanılmasına dayanmaktadır. İki aşamalı bu yapı, karmaşık karar problemlerinde hem teorik tutarlılığı hem de hesaplama şeffaflığını sağlaması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

İlk aşamada, AHS kriter ağırlıklarını belirlemek için kullanılmaktadır (Saaty, 1980). Bu yaklaşım, kriterlere farklı ağırlıklar atanmasını mümkün kılmaktadır (Zaheb vd., 2024). AHS yoluyla farklı kriterlere farklı ağırlıklar atanması, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) perspektifinin temel varsayımıyla da uyumludur: belirli faktörler (örneğin mevcut endüstriyel projeler veya kurumsal istikrar), yeni yol yaratma süreçlerinde diğerlerinden daha güçlü itici güçlerdir.

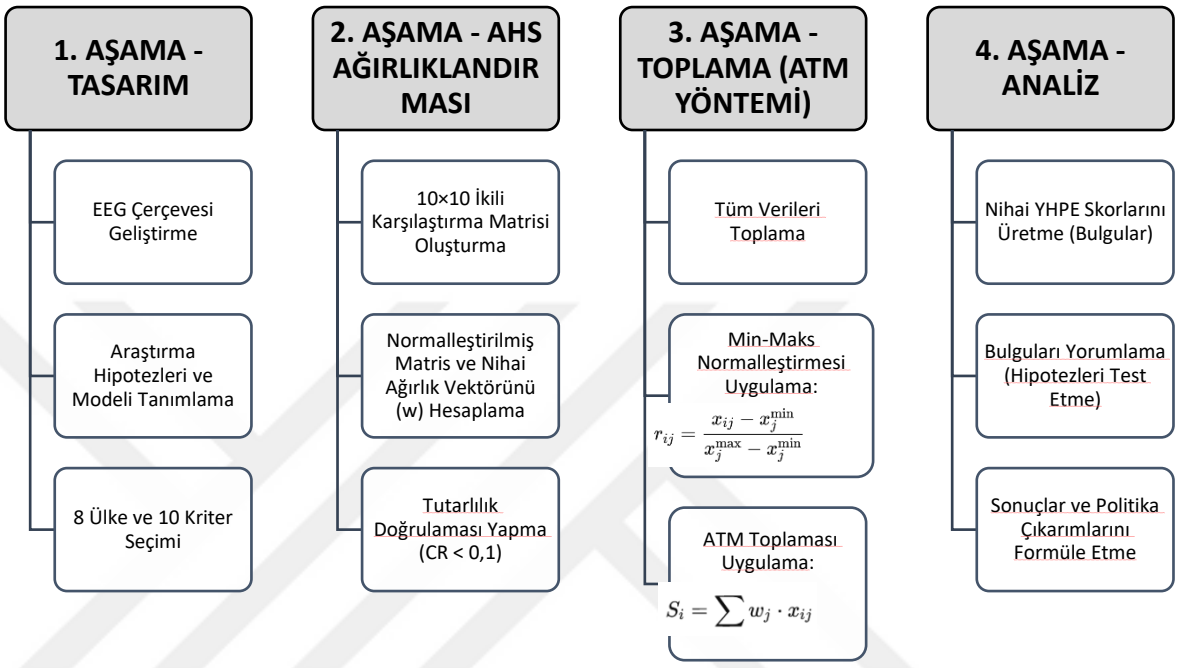
İkinci aşamada ise ATM, ülkelerin nihai sıralamasını elde etmek için kullanılmaktadır. ATM, literatürde en şeffaf ve doğrudan ÇKKV yöntemlerinden biri olarak kabul edilmekte olup (Triantaphyllou vd., 1995; CDEMA, 2014), AHS'den elde edilen kriter ağırlıklarını normalize edilmiş performans verileriyle birleştirerek her ülke için toplam bir YHPE skoru üretmektedir. Bu adım, ağırlıklandırma ile performans değerlendirmesini açık biçimde ayırarak sonuçların izlenebilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırmaktadır (Analysis Function, 2024; Zaheb vd., 2024).

Bu bağlamda hibrit AHS–ATM yaklaşımı, hem normatif (hangi kriter daha önemlidir?) hem de pozitif (hangi ülke bu kriterlerde daha iyi performans göstermektedir?) sorularını sistematik biçimde ele almaktadır. Böylece YHPE, yalnızca teorik önceliklere değil, aynı zamanda ampirik verilere dayalı, matematiksel olarak açık bir sıralama sunmaktadır.

Genel araştırma tasarımı, Şekil 26'da özetlenen dört aşamalı bir süreci izlemektedir. Bu süreç; kriterlerin tanımlanması ve EEG ile eşlenmesi, AHS yoluyla kriter

ağırlıklarının belirlenmesi, verilerin normalizasyonu ve ATM ile nihai YHPE skorlarının hesaplanmasını içermektedir.

Şekil 26: Araştırma Tasarımı Akış Şeması



3.2.3. Veri Seti

Bölüm 3.1'de ayrıntılı olarak açıklanan amaçlı örnekleme stratejisi ile tutarlı biçimde, bu ampirik analiz için nihai veri seti sekiz gelişmekte olan ülkeyi kapsamaktadır: Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin, Güney Afrika, Mısır, Fas ve Türkiye. Bu seçilmiş örneklem, çalışmada tanımlanan iki temel küme (Tekno-Ekonomik Kapasiteler ve Kurumsal Çevre) arasında anlamlı bir varyasyon sağlamaktadır.

Örneklem; yerleşik ve büyük ölçekli yenilenebilir enerji hâkimiyetine sahip ülkeleri (örneğin Çin ve Brezilya), henüz sınırlı mevcut kapasiteye rağmen hızla yükselen potansiyele sahip ülkelerle (örneğin Mısır ve Fas) ve farklı kurumsal yapı ve yönetişim profillerine sahip ekonomilerle birlikte içermektedir. Bu çeşitlilik, AHS–ATM modelinin yeşil hidrojen bağlamında endüstriyel yol yaratma potansiyelindeki ülkeler arası farklılıkları etkin biçimde tespit edebilmesi ve nicelendirebilmesi açısından kritik önemdedir.

Dolayısıyla örneklem yapısı, yeşil hidrojen gelişiminde hem yakınsayan hem de ayrışan evrimsel yörüngeleri aynı analitik çerçeve içinde ele almaya olanak tanımakta ve karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmasını mümkün kılmaktadır.

3.2.4. Değişkenler ve Kriterler

Bu analizde kullanılan veri toplama araçları, araştırma yönteminin iki temel kümesini (Tekno-Ekonomik ve Kurumsal) temsil eden on (10) nicel kriterden oluşmaktadır. Söz konusu kriterler Tablo 5'te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Kriterler, tekno-ekonomik varlıklar ile kurumsal kapasiteler arasındaki ayrımı ampirik olarak işlevselleştirmek amacıyla seçilmiştir. Her bir değişken; bölgelerin tarihsel olarak kapasite biriktirdiği, kilitlenmelerle karşılaştığı veya yeni endüstriyel yollar oluşturabildiği belirli bir kanalı temsil etmekte ve bu yönüyle birlikte evrimin çok boyutlu doğasını yakalamaktadır.

Bu noktada özellikle vurgulanmalıdır ki, seçilen ülkelerin tamamında hidrojenin toplam nihai enerji tüketimi içindeki mevcut payı oldukça sınırlıdır ve ağırlıklı olarak rafineri, amonyak ve kimya gibi sanayi süreçlerinde ara girdi olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, hidrojenin bugünkü enerji karmasındaki payını ölçmeyi değil; yeşil hidrojenin gelecekte ölçeklenebilir bir endüstriyel enerji taşıyıcısına dönüşme potansiyelini ve bu dönüşümü mümkün kılan yapısal koşulları analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, yeşil hidrojenin yol yaratma kapasitesini değerlendirmeye odaklanan Evrimsel Ekonomik Coğrafya çerçevesiyle uyumludur (IEA, 2024).

Kişi başına GSYİH değişkeni, Dünya Bankası'nın cari ABD doları (GDP per capita, current US$) verileri kullanılarak modele dâhil edilmiştir. Herhangi bir logaritmik dönüşüm uygulanmamış olup; bu gösterge, endeks içinde doğrudan bir itici faktör olarak değil, ülkelerin genel ekonomik ve finansal kapasitesini temsil eden tamamlayıcı bir kontrol değişkeni olarak ele alınmıştır. EEG yaklaşımına uygun biçimde, yeni endüstriyel yol yaratımını doğrudan belirleyen unsurların tekno-ekonomik varlıklar ve kurumsal kapasite olduğu varsayımıyla, kişi başına GSYİH değişkenine endeks içinde sınırlı bir ağırlık atanmıştır.

3.2.5. Veri Kaynakları

Veri toplama süreci, 2019–2023 dönemini kapsayacak şekilde, sekiz örneklem ülke için belirlenen on (10) kriter üzerinden boylamsal (panel) bir veri setinin derlenmesini içermektedir. Bu dönem, yeşil hidrojenin politika belgelerinde görünürlük kazandığı, ilk büyük ölçekli projelerin duyurulduğu ve kurumsal çerçevelerin şekillenmeye başladığı kritik bir geçiş evresini temsil etmektedir.

Veriler; Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) ve Dünya Bankası gibi güvenilir ve yaygın biçimde kullanılan uluslararası veri tabanlarından temin edilmiştir. Bu kaynaklar, hem tekno-ekonomik kapasitelere hem de kurumsal yönetişim göstergelerine ilişkin karşılaştırılabilir, standartlaştırılmış ve güncel veri sağlamaları nedeniyle tercih edilmiştir.

Veri setinde yalnızca Rusya'nın 2022 yılı hidrojen ihracatı verileri için atama (imputation) yöntemi uygulanmıştır. 2022 yılında uygulanan uluslararası yaptırımlar ve ticaret kısıtlamaları nedeniyle UN Comtrade veri tabanında bu döneme ait güvenilir ihracat verisi bulunmamaktadır. Bu boşluk, 2021 ve 2023 yıllarına ait değerlerin aritmetik ortalaması alınarak doldurulmuştur. Bu atama yöntemi, Rusya'nın 2022 sonrasında yaşadığı kurumsal çöküş yörüngesini tam olarak yansıtmayabilir; dolayısıyla bu dönem için hesaplanan YHPE skorları yorumlanırken bu sınırlılık göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer tüm değişkenler için ülkeler ve yıllar bazında doğrudan gözlemlenen veriler kullanılmıştır.

Aşağıda sunulan Tablo 5, YHPE'nin hesaplanmasında kullanılan AHS kriterlerini, bunların ait olduğu kümeleri ve veri kaynaklarını özetlemektedir.

Tablo 5: Endeks Kriterleri ve Veri Kaynakları

Küme	Kriter	Veri Kaynağı
A: Tekno-Ekonomik	Hidrojen Üretim Projeleri (Sayı)	IEA - Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database
A: Tekno-Ekonomik	Hidrojen ihracatı (1000 USD)	UN Comtrade (Dünya Bankası WITS aracılığıyla)
A: Tekno-Ekonomik	Kişi başına GSYİH (cari USD)	World Bank Open Data
A: Tekno-Ekonomik	Kurulu Güneş Enerjisi Kapasitesi (MW)	IRENA - Renewable Capacity Statistics
A: Tekno-Ekonomik	Kurulu Rüzgâr Enerjisi Kapasitesi (MW)	IRENA - Renewable Capacity Statistics
A: Tekno-Ekonomik	Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)	IRENA - Renewable Capacity Statistics
B: Kurumsal	Politik İstikrar (Yüzdelik Sıralama)	World Bank - Worldwide Governance Indicators (WGI)
B: Kurumsal	Hükümet Etkinliği (Yüzdelik Sıralama)	World Bank - Worldwide Governance Indicators (WGI)
B: Kurumsal	Düzenleyici Kalite (Yüzdelik Sıralama)	World Bank - Worldwide Governance Indicators (WGI)
B: Kurumsal	Yolsuzluğun Kontrolü (Yüzdelik Sıralama)	World Bank - Worldwide Governance Indicators (WGI)

3.2.6. Analiz Yöntemi

Veri analizi, ardışık ve bütünleşik üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar birlikte, Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi'nin (YHPE) oluşturulmasında kullanılan analitik hattı meydana getirmektedir.

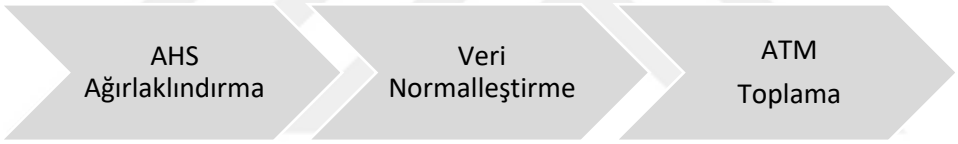
İlk aşamada, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılarak seçilen kriterlerin göreli ağırlıkları belirlenmiştir. Bu aşama, tekno-ekonomik ve kurumsal göstergelerin yeşil hidrojen bağlamında yol yaratma potansiyeline katkılarının öznel fakat tutarlı bir biçimde nicelleştirilmesini sağlamaktadır. İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş,

normalleştirilmiş ağırlık vektörleri hesaplanmış ve tutarlılık oranı (CR < 0,1) koşulu sağlanarak sonuçların içsel tutarlılığı doğrulanmıştır.

İkinci aşamada, ülkelerin kriter bazındaki ham performans değerleri Min–Maks normalleştirme yöntemi kullanılarak karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Bu adım, farklı ölçü birimlerine sahip değişkenlerin (MW, USD, yüzdelik sıralamalar vb.) tek bir endeks altında birleştirilebilmesini mümkün kılmaktadır.

Üçüncü ve son aşamada ise Ağırlıklı Toplam Modeli (ATM) uygulanarak, normalleştirilmiş kriter değerleri AHS ile elde edilen ağırlıklarla çarpılmış ve her ülke için nihai YHPE skoru hesaplanmıştır. Elde edilen skorlar, ülkelerin yeşil hidrojen bağlamında mevcut rekabet gücünü değil, evrimsel bir perspektifle endüstriyel yol yaratma kapasitesini temsil etmektedir.

Şekil 27: Analiz Süreci



Seçilen kriterler ile ülke örneklemi birlikte ele alındığında, farklı tarihsel varlık tabanları, kurumsal koşullar ve teknolojik fırsat kombinasyonlarının nasıl ayrışan endüstriyel yörüngeler ürettiğini ortaya koymakta; bu sayede Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) önermelerinin ampirik olarak sınanmasını mümkün kılmaktadır.

3.2.6.1. Kriter Ağırlıklandırması

İlk aşamada, çalışmada kullanılan on (10) kriterin göreli önemi Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemiyle belirlenmiştir. Bu kapsamda, Saaty'nin (1980) geliştirdiği 1–9 ölçeği kullanılarak kriterler arasında 10×10'luk bir ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur (Saaty, 1980). Bu ölçek, bir kriterin diğerine kıyasla endüstriyel yol yaratma açısından ne ölçüde daha önemli olduğuna dair yargıların sistematik biçimde ifade edilmesini sağlamaktadır.

Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi, her bir hücrenin ilgili sütun toplamına bölünmesiyle normalleştirilmiş; ardından her satırın aritmetik ortalaması alınarak kriterlere ait nihai ağırlık vektörü (w) hesaplanmıştır. Elde edilen nihai ağırlıklar

(Tablo 6), tekno-ekonomik faktörlere toplamda %67,3'lük daha yüksek bir ağırlık atandığını göstermektedir. Buna karşılık, kurumsal kümede yer alan Hükümet Etkinliği ve Düzenleyici Kalite göstergeleri birlikte %18,8'lik bir paya sahiptir.

Ağırlıklandırma yapısındaki bu asimetri (%67 tekno-ekonomik, %33 kurumsal), yeşil hidrojen sektörünün mevcut gelişim aşamasına ilişkin teorik ve ampirik bulgularla uyumludur. IRENA (2022), ülkelerin yeşil hidrojen kapasitesini değerlendirirken yenilenebilir kaynak donanımı ve endüstriyel altyapıyı birincil kriterler olarak tanımlamaktadır. EEG literatüründe ise yol yaratımının ilk aşamalarında fiziksel ve teknolojik varlıkların (yenilenebilir kapasite, üretim altyapısı, proje ölçeği) belirleyici, kurumsal faktörlerin ise tamamlayıcı ve derinleştirici rol oynadığı vurgulanmaktadır (Boschma v.d, 2006; Martin v.d., 2006). Bu çerçevede, AHS ikili karşılaştırmalarında hidrojen üretim projeleri ve yenilenebilir enerji kapasitesi gibi tekno-ekonomik göstergelere, hükümet etkinliği ve düzenleyici kalite gibi kurumsal göstergelere kıyasla sistematik olarak daha yüksek göreli önem atanmıştır. Ortaya çıkan %67-%33 dağılımı, bu teorik önceliklerin ikili karşılaştırma matrisindeki matematiksel yansımasıdır ve önceden belirlenmiş bir oran değildir.

Bu çalışmada ikili karşılaştırmalar, yazar tarafından EEG teorik çerçevesi ve yeşil hidrojen literatürünün sentezi temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlıklandırma sürecinde üç temel kaynaktan yararlanılmıştır. Birincisi, IRENA'nın (2022) ülke kapasitelerini tekno-ekonomik potansiyel ve kurumsal hazırlık eksenleri üzerinden değerlendiren çerçevesi, kriterlerin iki kümeye ayrılmasında ve göreli önemlerinin belirlenmesinde temel referans olarak kullanılmıştır. İkincisi, EEG yazınında yol yaratımının ilk aşamalarında fiziksel ve teknolojik varlıkların belirleyici, kurumsal faktörlerin ise tamamlayıcı rol oynadığına dair bulgular (Boschma ve Frenken, 2006; Martin ve Sunley, 2006), tekno-ekonomik kümeye daha yüksek toplam ağırlık atanmasının teorik gerekçesini oluşturmuştur. Üçüncüsü, UNIDO, IRENA ve IDOS'un (2023) gelişmekte olan ülkeler için yeşil hidrojen politika araç seti, özellikle mevcut yenilenebilir kapasite ve aktif hidrojen projelerinin endüstriyel yol yaratımındaki öncelikli rolünü vurgulamış ve bu göstergelere yüksek ağırlık verilmesini desteklemiştir.

Örneğin, mevcut yenilenebilir enerji kapasitesi veya aktif hidrojen üretim projeleri gibi göstergelerin, yeni bir endüstriyel yolun başlatılması açısından bazı kurumsal göstergelere kıyasla neden daha yüksek ağırlık aldığı bu sentez çerçevesinde belirlenmiştir. AHS yöntemi, bu nitel değerlendirmeleri tutarlı bir matematiksel yapıya dönüştürerek, şeffaf, izlenebilir ve tekrar edilebilir bir ağırlık seti elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Tablo 6: Kriter Ağırlıkları

Kriter	**AHS Ağırlığı (w)**
Hidrojen Üretim Projeleri	0,197
Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi	0,188
Güneş Enerjisi Kurulu Kapasitesi	0,177
Kurulu Rüzgâr Kapasitesi	0,112
Hükümet Etkinliği	0,094
Düzenleyici Kalite	0,094
Politik İstikrar	0,051
Hidrojen ihracatı	0,029
Kişi başına GSYİH	0,029
Yolsuzluğun Kontrolü	0,029
Toplam	**1**

Ortaya çıkan ağırlık dağılımı, Tekno-Ekonomik faktörler için yaklaşık %67 ve Kurumsal faktörler için yaklaşık %33, yeşil hidrojen sektörünün mevcut gelişim aşamasındaki yapısal gereksinimlerini yansıtmaktadır. Bu asimetri, iki kümenin 'eşit önemde' değil 'birlikte zorunlu' olduğunu yansıtmaktadır. Nitekim Rusya örneği, yüksek tekno-ekonomik varlıkların kurumsal çöküş karşısında tek başına yeterli olmadığını açıkça göstermektedir. Endüstriyel bir perspektiften bakıldığında, yenilenebilir enerji kapasitesi ve aktif hidrojen üretim projeleri gibi fiziksel varlıklar,

yeşil hidrojen üretiminin zorunlu ön koşullarıdır. Bu "sert" faktörler mevcut olmadığında, kurumsal çerçevenin gücünden bağımsız olarak üretimin teknik olarak mümkün olması söz konusu değildir.

Buna karşılık, kurumsal göstergeler, hükümet etkinliği, düzenleyici kalite, politik istikrar ve yolsuzluğun kontrolü, üretimi doğrudan başlatan unsurlar olmaktan ziyade, kolaylaştırıcı ve çarpan etkisi yaratan faktörler olarak işlev görmektedir. Güçlü yönetişim yapıları, yatırım risklerini azaltmak, uzun vadeli sermaye kilitlenmesini mümkün kılmak ve kapasite birikiminin sürdürülebilirliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Ancak erken aşama yeşil hidrojen endüstriyel gelişiminde karşılaştırmalı avantaj, öncelikle somut kaynak donanımı ve altyapı varlığına dayanmaktadır.

Bu nedenle tekno-ekonomik kümenin daha yüksek ağırlık alması, çalışmanın "anlık endüstriyel hazırlık" ve "yol başlatma kapasitesi" ölçmeyi amaçlayan analitik çerçevesiyle tutarlıdır. Ağırlıklandırma yapısı, Evrimsel Ekonomik Coğrafya literatüründe vurgulanan; yol yaratımının ilk aşamalarında fiziksel ve teknolojik varlıkların belirleyici, kurumsal faktörlerin ise tamamlayıcı ve derinleştirici rol oynadığı yönündeki bulgularla uyumludur.

Alternatif ağırlık senaryosunda (%50-%50) temel sıralama korunmakta, bu durum bulguların sağlamlığını desteklemektedir.

3.2.6.2. Veri Normalleştirme

Kullanılan veri seti, farklı ölçü birimlerine sahip heterojen göstergelerden oluşmaktadır (örneğin MW, ABD doları, yüzdelik sıralamalar). Bu göstergelerin AHS–ATM çerçevesinde birlikte değerlendirilebilmesi için tüm değişkenler, "fayda kriteri" varsayımı altında Min–Maks normalleştirme yöntemiyle 0–1 aralığına dönüştürülmüştür (daha yüksek değer = daha iyi performans):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \qquad (1)$$

Örnek hesaplama (Çin, 2023 – Kişi başına GSYİH):

Maksimum değer (Rusya): 14.159 USD

Minimum değer (Hindistan): 2.530 USD

Çin'in değeri: 12.951 USD

$$x'Çin, GSYİH = \frac{12951-2530}{14159-2530} = \frac{10421}{11629} = 0{,}896 \quad (2)$$

3.2.6.3. Skor Hesaplama

Son aşamada, AHS ile elde edilen kriter ağırlıkları (w) ile Min–Maks normalleştirilmiş performans değerleri birleştirilerek her ülke ve yıl için nihai Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi (YHPE) skorları hesaplanmıştır. Bu amaçla Ağırlıklı Toplam Modeli (ATM) kullanılmıştır:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot x'_{ij} \quad (3)$$

Burada S_i, ülke i'nin toplam YHPE skorunu; w_j, kriter j'nin AHS ağırlığını; x'_{ij} ise ülke i'nin kriter j'deki normalleştirilmiş performansını göstermektedir.

Çin için 2023 yılına ait örnek bir hesaplama Tablo 7'de sunulmaktadır. AHS–ATM çerçevesinde YHPE skorlarının 1'e yakınsaması, ilgili ülkenin tanımlanan kriterlerin büyük bölümünde yüksek göreli performans sergilediğini ve bu çalışmanın analitik çerçevesi içinde yeşil hidrojen için güçlü bir endüstriyel hazırlık ve yol yaratma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 7: Çin YHPE Hesaplama Örneği (2023)

Kriter	**AHS Ağırlığı**	**Çin 2023 Norm. Skor**	**Ağırlıklı Skor**
H_2 Projeleri	0,197	1,000	0,197
Toplam Yenilenebilir Enerji	0,188	1,000	0,188
Güneş Enerjisi	0,177	1,000	0,177
Rüzgâr Kapasitesi	0,112	1,000	0,111
Hükümet Etkinliği	0,094	1,000	0,094
Düzenleyici Kalite	0,094	0,679	0,064
Politik İstikrar	0,051	0,714	0,037
Hidrojen ihracatı	0,029	1,000	0,029
Kişi başına GSYİH	0,029	0,896	0,026
Yolsuzluğun Kontrolü	0,029	1,000	0,029
TOPLAM YHPE SKORU	1,000		0,952

Tablo 7, Çin'in 2023 yılı için Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi (YHPE) skorunun AHS–ATM çerçevesinde nasıl hesaplandığını göstermektedir. Elde edilen 0,952'lik yüksek skor, Çin'in analizde yer alan kriterlerin büyük çoğunğunda örneklem içi en yüksek veya en yüksek değerlere çok yakın bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Seçilen kriterler, Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) teorisi ve çalışmanın temel hipotezleriyle doğrudan uyumludur. Tekno-ekonomik kriterler (yenilenebilir enerji kapasitesi, güneş ve rüzgâr kurulu gücü, aktif hidrojen üretim projeleri gibi), ülkelerin tarihsel olarak birikmiş mevcut yol güçlerini ve endüstriyel ölçek avantajlarını yakalamaktadır. Buna karşılık, kurumsal kriterler (hükümet etkinliği, düzenleyici kalite, politik istikrar ve yolsuzluğun kontrolü), bu mevcut yolların dönüştürülebilme veya yeni yollar yaratılabilme kapasitesini temsil etmektedir.

Bu bağlamda, yüksek kriter skorları teknoloji ve kurumların birlikte evrim potansiyelinin güçlü olduğunu; çok düşük skorlar ise belirli alanlarda kilitlenme veya dönüşüm kapasitesinin sınırlı olabileceğini ima etmektedir. Analizde her bir kriterin açık biçimde EEG çerçevesindeki bir boyuta (örneğin yenilenebilir kapasite → endüstriyel çeşitlilik ve ölçek; yönetişim göstergeleri → kurumsal destek ve adaptasyon kapasitesi) bağlanması, endeksin yalnızca betimleyici değil, aynı zamanda teorik olarak test edici bir araç olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Böylece YHPE, endüstriyel üstünlüğün tek bir faktörden değil, teknolojik varlıklar ile kurumsal yapıların eşzamanlı gelişiminden doğduğu varsayımını doğrudan sınamaktadır.

3.2.6.4. Tutarlılık Kontrolü

Endeksin geçerliliği, öncelikle teorik temellendirmesi yoluyla sağlanmaktadır. Kullanılan tüm kriterler, Evrimsel Ekonomik Coğrafya literatüründen (Boschma vd., 2006; Martin vd., 2006) ve yerleşik enerji politikası çerçevelerinden (IRENA, 2022; IEA, 2024; UNIDO, IRENA, IDOS, 2023) türetilmiştir. Bu durum, ölçülen göstergelerin kavramsal olarak "yol bağımlılığı", "yol yaratma" ve "birlikte evrim" gibi temel EEG kavramlarını temsil ettiğini güvence altına almaktadır.

AHS ağırlıklandırma sürecinin güvenilirliği, Saaty (1980) tarafından önerilen zorunlu Tutarlılık Doğrulama Testi ile sınanmıştır. Bu test, ikili karşılaştırma matrisindeki yargıların mantıksal olarak tutarlı ve çelişkisiz olup olmadığını değerlendirmektedir. Süreç aşağıdaki adımlarla yürütülmüştür:

İlk olarak, temel özdeğer (λ_max), tutarlılık vektörünün ortalaması alınarak hesaplanmış ve 10,05094 olarak bulunmuştur. On kriterli (n = 10) yapı için Tutarlılık Endeksi (TE) şu şekilde hesaplanmıştır:

$$CI = \frac{\lambda\, max - n}{n-1} = \frac{10{,}051-10}{10-1} = 0{,}006 \qquad (4)$$

Ardından, modelin geçerliliğini değerlendirmek amacıyla Tutarlılık Oranı (TO), TE'nin n = 10 için belirlenen Rastgele Endeks (RI = 1,49) değerine bölünmesiyle elde edilmiştir:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}006}{1{,}49} = 0{,}004 \qquad (5)$$

AHS literatüründe 0,10 eşiği, kabul edilebilir insan tutarsızlığını rastgele yargılardan ayırt etmek için kritik bir sınır olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen 0,004'lük Tutarlılık Oranı, söz konusu eşikten oldukça düşüktür. Bu sonuç, ikili karşılaştırmaların keyfi tercihlere değil, tutarlı ve mantıksal yargılara dayandığını; dolayısıyla türetilen kriter ağırlıklarının matematiksel olarak sağlam, güvenilir ve analiz için uygun olduğunu göstermektedir.

3.2.7. Ülke Profilleri

Seçilen ülkeleri izole vakalar olarak ele almak yerine, bu çalışma ülkeleri önceden var olan tekno-ekonomik varlıkları ile kurumsal hazırlık düzeylerinin göreli dağılımına göre sınıflandırmaktadır. Bu yaklaşım, Evrimsel Ekonomik Coğrafya'nın (EEG) temel varsayımıyla uyumludur: ülkelerin izlediği yeşil hidrojen yörüngeleri, tek tek politika tercihleriyle değil, tarihsel olarak birikmiş kapasite bileşimleriyle şekillenmektedir.

Bu amaçla ülkeler, tekno-ekonomik kapasiteleri ile kurumsal çevrelerinin göreli güçlülüğüne göre değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, IRENA'nın (2022) ülke kapasitelerini tekno-ekonomik potansiyel ve kurumsal hazırlık eksenleri üzerinden sınıflandıran çerçevesiyle uyumludur.

Bu profiller, Tablo 5'te sunulan kriterlerin göreli dağılımlarından türetilmiş başlangıç koşullarını temsil etmektedir ve analizde gözlemlenen yeşil hidrojen yörüngeleri için açıklayıcı bir zemin oluşturmaktadır. Kriterlerin yalnızca mutlak seviyeleri değil, tekno-ekonomik ve kurumsal alt kümeler arasındaki yapısal uyum veya uyumsuzluk birlikte değerlendirilmiştir. Böylece ülkelerin sadece "ne kadar hazır" oldukları değil, hangi türden bir hazırlık yapısına sahip oldukları da görünür kılınmaktadır.

Bu çalışmada, ülkelerin yeşil hidrojen konumlarını değerlendirmek için birbiriyle ilişkili ancak analitik olarak farklı iki sınıflandırma kullanılmaktadır:

(i) YHPE Kademesi (1-4), AHS-ATM modeli tarafından hesaplanan nihai skorlara dayalı ampirik performans sıralamasını göstermektedir. Kademe sınırları, örneklem içi skor dağılımındaki doğal

kırılmalar esas alınarak belirlenmiştir: Kademe 1 (YHPE > 0,90), Kademe 2 (0,20 ≤ YHPE < 0,30), Kademe 3 (0,15 ≤ YHPE < 0,20), Kademe 4 (YHPE < 0,15).

(ii) Evrimsel Yörünge, 2019-2023 dönemi boyunca YHPE skorlarındaki zaman içi değişim dinamiklerini tanımlamaktadır. Üç temel yörünge tipi gözlemlenmiştir: Pozitif Kilitlenme (skorların yüksek düzeyde istikrarlı kalması), Yukarı Dallanma (skorlarda artış eğilimi) ve Kurumsal Çöküş (skorlarda belirgin düşüş).

Ayrıca ülkeler, tekno-ekonomik kapasiteleri ile kurumsal çevrelerinin göreli güçlülüğüne göre değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme, IRENA'nın (2022) ülke kapasitelerini tekno-ekonomik potansiyel ve kurumsal hazırlık eksenleri üzerinden sınıflandıran çerçevesiyle tutarlıdır. Bu iki sınıflandırma birbirini tamamlamaktadır. Kademeler 'ne' sorusuna (mevcut konum), yörüngeler ise 'nasıl' sorusuna (dinamik değişim) yanıt vermektedir.

Çin, güçlü başlangıç koşulları nedeniyle güçlü tekno-ekonomik ve kurumsal yapı altında sınıflandırılmaktadır. Ülke, hidrojen üretim projeleri açısından dünyanın en büyük üretim tabanına sahip olup yaklaşık 2.894 TWh düzeyinde yenilenebilir elektrik üretmektedir. Bu güçlü tekno-ekonomik taban, merkezi planlama kapasitesi yüksek devlet kurumları ve uzun vadeli endüstriyel stratejilerle desteklenmektedir. Sonuç olarak Çin, hem mevcut yolların güçlendirilmesi hem de yeni yeşil hidrojen yollarının hızla oluşturulması açısından elverişli bir birlikte evrim ortamı sunmaktadır.

Hindistan ve Brezilya, güçlü yenilenebilir enerji temellerine sahip olmaları nedeniyle güçlü tekno-ekonomik, sınırlı kurumsal yapıya daha yakındır. Hindistan hızla büyüyen güneş enerjisi kapasitesiyle; Brezilya ise olgun ve ölçekli hidroelektrik altyapısıyla öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, her iki ülkede de idari engeller, düzenleyici belirsizlikler ve koordinasyon sorunları gibi kurumsal sürtüşmeler, bu tekno-ekonomik avantajların endüstriyel yol yaratımına tam olarak yansımasını yavaşlatabilmektedir. Bu durum, güçlü fiziksel varlıkların tek başına yeterli olmadığını; kurumsal kapasitenin bu varlıkları harekete geçirme rolünü vurgulamaktadır.

Fas, sınırlı tekno-ekonomik, güçlü kurumsal yapıya en uygun örneklerden biridir. Ülke, büyük üreticilerle karşılaştırıldığında sınırlı bir yenilenebilir tabana (yaklaşık 9 TWh) sahip olmasına rağmen, görece istikrarlı bir politik ortam ve yüksek düzenleyici kaliteyle bu dezavantajı kısmen telafi etmektedir. Bu yapı, güçlü yönetişimin yatırım belirsizliğini azaltarak yeni endüstriyel yörüngeleri tetiklediği "yukarıdan aşağıya" bir yol yaratma modelini yansıtmaktadır. Fas'ın Kademe 2 düzeyindeki performansı, güvenilir kurumların erken aşama yabancı yatırımı çektiğini ve kapasite oluşumunu hızlandırarak tekno-ekonomik eksiklikleri kısmen dengeleyebildiğini göstermektedir.

Kalan ülkeler, her iki boyutta kısıtlı yapısal sınırlamalara sahiptir. Türkiye ve Güney Afrika, ılımlı yenilenebilir kapasitelere sahip olmalarına rağmen kurumsal belirsizlikler ve makroekonomik oynaklıkla karşı karşıyadır. Bu durum, mevcut tekno-ekonomik varlıkların yeni endüstriyel yollara dönüşmesini zorlaştıran çift yönlü bir kısıt yapısı yaratmaktadır.

Rusya, güçlü tekno-ekonomik varlıklarına rağmen zayıflayan kurumsal çevresi nedeniyle başlangıçta güçlü tekno-ekonomik, sınırlı kurumsal yapıya daha yakındır. Ancak zaman içinde bu yapı, kurumsal bozulmanın tetiklediği bir Kurumsal Çöküş (Negatif Kilitlenme) yörüngesine evrilmiştir.

Mısır ise görece düşük bir başlangıç kapasitesine sahip olmakla birlikte, aktif devlet teşvikleri ve stratejik projeler aracılığıyla erken aşama yol yaratma sinyalleri vermektedir. Bu nedenle Mısır, her iki boyutta kısıtlı yapıda olmakla birlikte, zaman içi dinamikte "Yukarı Dallanma" eğilimi gösteren bir alt vaka olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 8: Ülkelerin Evrimsel Koşulları

Ülke	**Birincil Tekno-Ekonomik Varlıklar (Sert Faktörler)**	**Kurumsal Çevre (Yumuşak Faktörler)**
Çin	Çok yüksek yenilenebilir kapasite, ölçek avantajı	Güçlü devlet desteği ve sanayi koordinasyonu
Hindistan	Yüksek güneş ve rüzgâr potansiyeli	Ilımlı ve yükselen kurumsal kapasite
Brezilya	Yerleşik hidroelektrik ve biyoyakıt altyapısı	Karmaşık ve yavaş bürokratik yapı
Fas	Düşük mevcut kapasite, yüksek uzun vadeli potansiyel	Yüksek politik istikrar ve düzenleyici kalite
Güney Afrika	Ilımlı yenilenebilir potansiyel	Yönetişim zayıflıkları ve kurumsal kısıtlar
Türkiye	Çeşitlendirilmiş yenilenebilir enerji karması	Kurumsal oynaklık ve politika belirsizliği
Mısır	Yükselen yenilenebilir kapasite	Aktif devlet teşvikleri ve politika yönelimi
Rusya	Yüksek teknik uzmanlık ve enerji altyapısı (fosil ağırlıklı)	Kurumsal gerileme ve yaptırımlar

Tablo 8, her seçilmiş ülke için başlangıç evrimsel koşullarını özetleyen karşılaştırmalı bir matris sunmaktadır. Ülkeler, somut tekno-ekonomik varlıkları (yenilenebilir kapasite, enerji altyapısı, teknik uzmanlık) ile soyut kurumsal çevreleri (yönetişim kalitesi, politika istikrarı, düzenleyici kapasite) arasındaki göreli ilişkiye göre sınıflandırılmaktadır.

Bu sınıflandırma, Evrimsel Ekonomik Coğrafya'nın temel önermesiyle tutarlıdır. Yeşil hidrojen gibi yeni endüstriyel alanlarda ülkelerin izlediği yollar, yalnızca kaynak

bolluğuna değil, bu kaynakların kurumsal olarak harekete geçirilme kapasitesine bağlıdır.

Dolayısıyla Tablo 8, yalnızca betimleyici bir özet sunmakla kalmamakta; Bölüm 3'te elde edilen YHPE sonuçlarının neden ülkeler arasında ayrıştığını açıklayan yapısal bir bağlam da sağlamaktadır. Bu bağlam, izleyen bölümde ülke skorlarının yorumlanması ve yörünge analizinin teorik olarak temellendirilmesi açısından kritik bir referans noktası oluşturmaktadır.

3.3. Bulgular

AHS–ATM toplamasına dayalı analizden elde edilen temel ampirik bulgu, ülkeler arasındaki YHPE skorlarındaki belirgin farklılıkların, endüstriyel dönüşümün mevcut tekno-ekonomik kapasiteler ve kurumsal koşullar tarafından şekillendiğini göstermesidir. AHS sonuçlarında gözlemlenen bu varyasyon, Evrimsel Ekonomik Coğrafya'nın (EEG) temel hipoteziyle uyumludur: daha yüksek teknolojik hazırlık ve altyapı düzeyine sahip ülkeler evrimsel yollar boyunca daha ileri konumlara ilerlerken, kurumsal uyumu sınırlı veya zayıflayan ülkelerde yol bağımlılığı daha güçlü biçimde sürmektedir. Dolayısıyla ampirik bulgular, çalışmanın teorik argümanını açık biçimde desteklemektedir.

2019–2023 dönemini kapsayan nihai YHPE skorları, bu çalışmanın ana nicel çıktısını oluşturmaktadır. Bu skorlar Tablo 9'da sunulmaktadır. Başlangıç profilleri ülkelerin önsel tekno-ekonomik ve kurumsal koşullarını sınıflandırırken; YHPE kademeleri, AHS–ATM modeli tarafından üretilen ampirik performans sonuçlarını yansıtmaktadır. Bu iki yaklaşım birbirini dışlamamakta, aksine tamamlayıcı nitelik taşımaktadır.

YHPE skorları, yeşil hidrojen endüstriyel üstünlüğünde hem ülkeler arası yapısal farkları hem de zaman içindeki dinamik değişimleri gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır.

Tablo 9: YHPE Sonuçları (2019-2023)

Yıllar	Çin	Hindistan	Güney Afrika	Brezilya	Rusya	Fas	Mısır	Türkiye
2019	0,95	0,247	0,247	0,184	0,147	0,133	0,015	0,178
2020	0,94	0,245	0,238	0,182	0,119	0,171	0,014	0,173
2021	0,94	0,318	0,197	0,251	0,095	0,175	0,030	0,173
2022	0,95	0,348	0,205	0,263	0,071	0,212	0,089	0,163
2023	0,95	0,293	0,174	0,226	0,036	0,209	0,092	0,169

En güncel yıl olan 2023 için skorların görsel sıralaması Şekil 28'de sunulmaktadır. Bulgular, ülkelerin yeşil hidrojen endüstriyel hazırlık düzeylerinde net bir tabakalaşma olduğunu göstermektedir. Bu tabakalaşma, bileşik endeks dağılımındaki doğal kırılmalar esas alınarak oluşturulan dört kademeli bir yapı ile ifade edilmiştir. Kademe sınırları, keyfi eşik değerler yerine ülkeler arasındaki göreli skor mesafelerine dayanarak belirlenmiştir.

Bu çerçevede kademe 1, baskın lider olarak Çin öne çıkmaktadır. Bu kademe, 2023 yılında açık ara en yüksek YHPE skoruna sahip olan Çin (0,952) tarafından tek başına doldurulmaktadır. Çin'in konumu, güçlü tekno-ekonomik varlıklar ile kurumsal kapasitenin dengeli birlikte evriminin ampirik bir yansımasıdır.

Kademe 2, rekabetçi adaylar olarak Hindistan (0,293), Brezilya (0,226) ve Fas (0,209) bu grupta yer almaktadır. Bu ülkeler, Çin'e kıyasla daha düşük mutlak kapasitelere sahip olmakla birlikte, belirli boyutlarda (yenilenebilir kapasite veya kurumsal kalite) yukarı yönlü dallanma potansiyeli sergilemektedir.

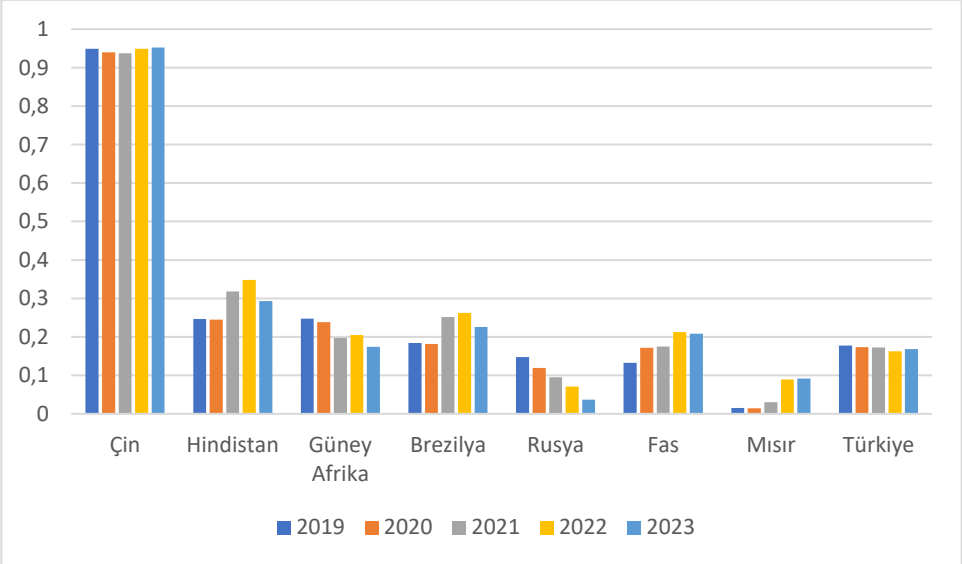
Kademe 3, gelişen takipçiler olarak ise Güney Afrika (0,174) ve Türkiye (0,169) konumlanmaktadır. Her iki ülke de orta düzey tekno-ekonomik varlıklara sahip olmakla birlikte, kurumsal ve makroekonomik kısıtlar nedeniyle endüstriyel yol yaratımında sınırlı ilerleme göstermektedir.

Kademe 4, Dezavantajlılar Mısır (0,092) ve Rusya (0,036)'dır. Mısır düşük bir tabandan başlamakla birlikte erken aşama yukarı dallanma sinyalleri gösterirken;

Rusya'nın keskin gerilemesi, güçlü tekno-ekonomik varlıklara rağmen kurumsal bozulmanın endüstriyel yol üzerinde ne denli belirleyici olabildiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak bu bulgular, EEG'nin öngördüğü şekilde endüstriyel üstünlüğün tek bir faktörden değil, tekno-ekonomik kapasiteler ile kurumsal çevrenin birlikte evriminden doğduğunu ampirik olarak teyit etmektedir. YHPE sonuçları, yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkelerde neden ayrışan büyüme yörüngeleri ürettiğini nicel olarak açıklamaktadır.

Şekil 28: YHPE Zamansal Yörüngeleri (2019-2023)



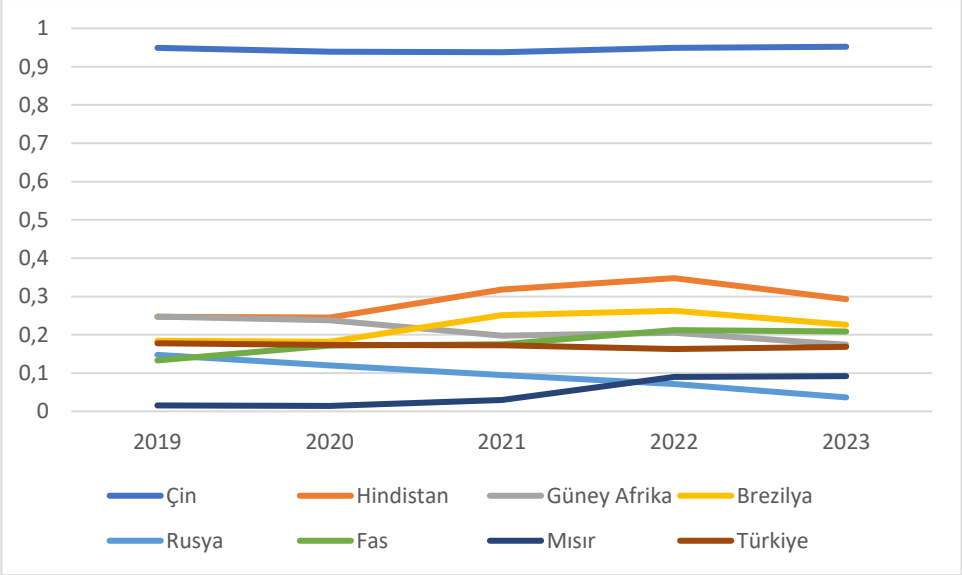
Şekil 28, 2019–2023 döneminde YHPE skorlarının zaman içindeki seyrini sunarak, yeşil hidrojen bağlamında endüstriyel üstünlüğün dinamik niteliğini ortaya koymaktadır. Beş yıllık dönem boyunca gözlemlenen eğilimler, ülkelerin yalnızca statik kapasitelerini değil, aynı zamanda bu kapasiteleri koruma, derinleştirme veya dönüştürme yeteneklerini de yansıtmaktadır.

Zamansal eğilimler, özellikle Kademe 1'de yer alan Çin'in yüksek ve istikrarlı skorlarıyla dikkat çekmektedir. Çin'in YHPE skorunun dönem boyunca neredeyse sabit kalması, güçlü tekno-ekonomik varlıkların ve kurumsal kapasitenin karşılıklı olarak pekiştirildiği bir pozitif kilitlenme durumuna işaret etmektedir. Bu durum, EEG

literatüründe tanımlanan “başarının başarıyı beslemesi” mekanizmasının ampirik bir karşılığıdır.

Bu çalışmada kapsamlı bir duyarlılık analizi uygulanmamış olmakla birlikte, Kademe 1 (Çin) ile diğer kademeler arasındaki büyük skor farkı, sıralamanın kriter ağırlıklarındaki küçük varyasyonlara karşı yüksek derecede dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca AHS–ATM çerçevesinin istikrarı, ülkelerin zaman içindeki konumlarının büyük ölçüde korunmasıyla da teyit edilmektedir. Bu tutarlılık, ağırlıklandırma sürecinin keyfi olmadığını ve modelin yapısal olarak sağlam olduğunu desteklemektedir.

Şekil 29: Ülkelerin YHPE Yörüngeleri (2019-2023)



Şekil 29, sekiz örneklem ülkenin 2019–2023 döneminde izlediği ayrışan evrimsel yolları açık biçimde ortaya koymaktadır. Grafik, EEG’nin öngördüğü şekilde, ülkelerin yeşil hidrojen endüstriyel üstünlüğünde tek tip bir yakınsama yerine çoklu yörüngeler izlediğini göstermektedir. Yörünge analizleri ülkelerin farklılaşan dinamiklerini ortaya koymaktadır. 2019, 2023 arasında Çin (0,949 → 0,952), güneş kapasitesini 205.000'den 610.000 MW'a çıkararak pozitif kilitlenmeyi sürdürmüştür. Hindistan (0,247 → 0,348 → 0,293) ve Brezilya (0,184 → 0,263 → 0,226) dalgalı seyirleriyle güçlü tekno-ekonomik, sınırlı kurumsal yapının kurumsal kırılganlığını yansıtmaktadır; her iki ülkede de 2023'teki düşüş kurumsal göstergelerdeki

gerilemeyle ilişkilidir. Fas (0,133 → 0,212), sınırlı tekno-ekonomik tabana rağmen istikrarlı yönetişimle yükselirken; Güney Afrika (0,247 → 0,174) ve Türkiye (0,178 → 0,169) kurumsal kısıtlar nedeniyle yatay veya düşüş eğilimi göstermektedir. Mısır (0,015 → 0,092) en belirgin yükselişi sergilerken, Rusya (0,147 → 0,036) kurumsal çöküşün tekno-ekonomik varlıkları nasıl etkisizleştirdiğinin somut kanıtını sunmaktadır.

Pozitif Kilitlenme örneği olarak Çin, yüksek başlangıç düzeyini zaman içinde koruyarak ve pekiştirerek güçlü bir pozitif kilitlenme sergilemektedir. Bu yörünge, mevcut endüstriyel kapasite ile kurumsal koordinasyonun birlikte evrildiği ve yeni yol yaratımının süreklilik kazandığı bir durumu temsil etmektedir.

Yukarı Dallanma kapsamında Hindistan ve Brezilya, dönem boyunca artan veya dalgalı ancak genel olarak yükselen YHPE skorlarıyla güçlü yenilenebilir enerji temellerinin yeni endüstriyel fırsatlara dönüştürülmeye çalışıldığını göstermektedir. Benzer biçimde Fas, düşük başlangıç kapasitesine rağmen istikrarlı kurumsal çevresi sayesinde yukarı yönlü bir eğilim sergileyerek kurumsal kaldıraç yoluyla yol yaratımına işaret etmektedir.

Kurumsal Çöküş (Negatif Kilitlenme) örneği olarak Rusya'nın belirgin aşağı yönlü seyri, güçlü tekno-ekonomik varlıklara rağmen kurumsal bozulmanın endüstriyel yol üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Buna karşılık Güney Afrika ve Türkiye, orta düzey tekno-ekonomik kapasitelere rağmen kurumsal ve yapısal kısıtlar nedeniyle sınırlı veya yatay seyreden skorlarıyla kırılgan ve çift kısıtlı geçiş yollarını temsil etmektedir.

Erken Aşama Yükseliş örneği olarak Mısır, düşük bir başlangıç seviyesine rağmen dönem sonunda yukarı yönlü bir eğilim sergileyerek erken aşama yol yaratımına işaret etmektedir. Bu durum, sınırlı mevcut kapasitelere sahip ülkelerin dahi uygun politika sinyalleri ve kamu öncülüğüyle yeni endüstriyel yörüngelere girebileceğini göstermektedir.

Genel olarak Şekil 28 ve Şekil 29 birlikte değerlendirildiğinde, yeşil hidrojen bağlamında endüstriyel üstünlüğün zamansal olarak durağan değil, aksine tarihsel varlıklar, kurumsal koşullar ve stratejik tercihler arasındaki etkileşimle şekillenen yol

bağımlı ve ayrışan bir süreç olduğu açıkça görülmektedir. Bu bulgular, EEG'nin temel varsayımını ampirik olarak desteklemekte ve yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkelerde neden farklı hız ve yönlerde evrildiğini açıklamaktadır.

3.4. Tartışma

Bu bölüm, ampirik bulguların yorumunu sunmakta, sonuçları teorik çerçeveyle ilişkilendirmekte ve politika çıkarımlarıyla birlikte genel sonuçları ortaya koymaktadır.

3.4.1. Birlikte Evrim Hipotezinin Değerlendirilmesi

Endüstriyel üstünlüğün tekno-ekonomik ve kurumsal kapasitelerin ikili bir fonksiyonu olduğunu ileri süren Hipotez 1 doğrulanmıştır. Bulgular, endüstriyel üstünlüğün tek bir boyut tarafından değil, teknolojik ve kurumsal kapasitelerin birlikte evrimi yoluyla ortaya çıktığını göstermektedir. 2023 yılı sonuçları, hiçbir ülkenin performansının yalnızca tekno-ekonomik ya da yalnızca kurumsal faktörlerle açıklanamayacağını; bunun yerine yapısal olarak tutarlı farklı evrimsel tipolojilerin oluştuğunu ortaya koymaktadır.

3.4.1.1. Güçlü Tekno-Ekonomik ve Kurumsal Yapı – Çin

Güçlü tekno-ekonomik ve kurumsal yapı, 2023 yılında olağanüstü yüksek bir YHPE skoru (0,952) elde eden Çin tarafından temsil edilmektedir. Çin, temel tekno-ekonomik kriterlerde (hidrojen projeleri, güneş, rüzgâr ve toplam yenilenebilir enerji kapasitesi) neredeyse mükemmel normalleştirilmiş değerlere ulaşırken, kilit kurumsal göstergelerde (özellikle hükümet etkinliği) de yüksek performans sergilemektedir. Bu durum, güçlü devlet kapasitesinin (kurumsal itme) büyük ölçekli endüstriyel yatırımlarla (teknolojik çekme) eşzamanlı olarak ilerlediği tipik bir birlikte evrim örneği sunmaktadır.

3.4.1.2. Güçlü Tekno-Ekonomik, Sınırlı Kurumsal Yapı – Hindistan, Brezilya ve Rusya

Hindistan (0,293) ve Brezilya (0,226), güçlü tekno-ekonomik, sınırlı kurumsal yapıya karşılık gelmektedir. Bu ülkelerde skorların büyük bölümü, geniş yenilenebilir enerji tabanı ve mevcut endüstrilerdeki ilişkili çeşitlilik sayesinde tekno-ekonomik

kümeden kaynaklanmaktadır. Ancak kurumsal göstergelerdeki görece zayıflık, bu potansiyelin sürdürülebilir bir endüstriyel yola dönüşmesini sınırlamaktadır. Mevcut teknolojik varlıklar yeni yol oluşumunu tetikleyebilse de, kurumsal sürtüşmeler bu sürecin hızını ve derinliğini kısıtlamaktadır.

Rusya ise başlangıçta güçlü tekno-ekonomik varlıklara sahip olmasına rağmen, kurumsal çevredeki belirgin bozulma nedeniyle güçlü tekno-ekonomik, sınırlı kurumsal yapıda kalmaktadır. 2019–2023 döneminde bu potansiyel sürdürülebilir bir yol yaratımına dönüşememiş; aksine Rusya zaman içinde Kurumsal Çöküş (Negatif Kilitlenme) yörüngesine evrilmiştir. Bu durum, güçlü teknolojik varlıkların tek başına uzun vadeli endüstriyel üstünlük için yeterli olmadığını açık biçimde göstermektedir. Nitekim duyarlılık analizinde kurumsal faktörlere daha yüksek ağırlık verildiğinde (%50-%50) Rusya'nın skoru daha da düşmekte (0,036 → 0,028), bu durum kurumsal çöküşün belirleyiciliğini pekiştirmektedir.

3.4.1.3. Sınırlı Tekno-Ekonomik, Güçlü Kurumsal Yapı – Fas

Fas (0,209), önceki örneklerin tersine işleyen bir mekanizmayı temsil etmektedir. Görece düşük tekno-ekonomik tabana rağmen politik istikrar ve düzenleyici kalite göstergelerinde yüksek performans sergilemektedir. Bu durum, önemli fiziksel kapasite oluşmadan önce dahi istikrarlı ve öngörülebilir yönetişimin erken aşama yatırımları çekebildiği, kurumsal olarak sabitlenmiş ve yukarıdan aşağıya işleyen bir yol yaratma stratejisine işaret etmektedir.

Bu bulgu, hipotezin "tek boyutlu güçlerin sınırlı ilerleme sağlayabileceği" koşulunu doğrulamakta; ancak Fas'ın Çin'in çok gerisinde kalması (0,209 vs. 0,952), tam ölçekli üstünlük için birlikte evrimin zorunluluğunu teyit etmektedir.

3.4.1.4. Her İki Boyutta Kısıtlı Yapı – Güney Afrika, Türkiye ve Mısır

Güney Afrika (0,174) ve Türkiye (0,169), orta düzey tekno-ekonomik potansiyelin kurumsal oynaklıkla birleştiği her iki boyutta kısıtlı yapıya karşılık gelmektedir. Bu yapı, ilerlemenin yavaşlamasına ve ülkelerin bazı kolaylaştırıcı varlıklara sahip olmalarına rağmen yeni endüstriyel yollarını kalıcı biçimde ölçeklendirememelerine yol açmaktadır. Sonuç, kısmi kilitlenme riski taşıyan kırılgan bir geçiş sürecidir.

Mısır (0,092)'da ise sınırlı tekno-ekonomik kapasite ve yatırım güvenini tam olarak tesis edemeyen kurumsal göstergeler, kısa vadede güçlü bir endüstriyel yol oluşumunu zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte 2019–2023 döneminde gözlenen artış, Mısır'ın bu profil içinde "yukarı dallanma" potansiyeline sahip olduğunu ve uygun politika yönlendirmesiyle daha üst yörüngelere geçebileceğini göstermektedir.

3.4.2. Yol Ayrışması Hipotezinin Değerlendirilmesi

Yol bağımlı ayrışmayı öngören Hipotez 2 doğrulanmıştır. YHPE sonuçları, EEG'nin öngördüğü üzere ülkelerin yeşil hidrojen endüstriyel üstünlüğünde tek tip bir yakınsama yerine farklı evrimsel yörüngeler izlediğini göstermektedir. Bu yörüngeler yalnızca nihai skor düzeylerine göre değil, hangi kriter kümelerinin yolu sürüklediği dikkate alınarak okunmalıdır. YHPE'de tekno-ekonomik kriterlerin toplam ağırlığın yaklaşık %67'sini oluşturması, üst kademelere çıkışın öncelikle ölçeklenebilir fiziksel ve endüstriyel tabanın varlığına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Kurumsal göstergeler ise (%33) bu tabanın sürdürülebilir bir yatırım yoluna dönüşmesinde çarpan rolü üstlenmektedir.

Yol 1, ağırlıklı olarak Çin'de görülen "Pozitif Kilitlenme"yi (Kendini Pekiştiren Büyüme) tasvir etmektedir. Çin'in 2019–2023 boyunca neredeyse yatay seyreden yüksek YHPE skoru (0,94–0,95), yoğunlaşmış ve kendini yeniden üreten bir üstünlüğü temsil etmektedir. Bu pozitif kilitlenmenin temel nedeni, endeksin en yüksek ağırlıklı bileşenlerinde eşzamanlı "tavan" performanstır: hidrojen projeleri, toplam yenilenebilir kapasite ile güneş ve rüzgâr kurulu gücündeki ölçek avantajı, endeksin ana itici unsurlarını sürekli yukarıda tutmaktadır. Buna eşlik eden hükümet etkinliği ve düzenleyici kapasite, koordinasyon maliyetlerini düşürerek bu ölçeğin sürekliliğini sağlamaktadır. Dolayısıyla Çin'in üstünlüğü, salt kaynak bolluğundan ziyade ölçek ile kurumsal koordinasyonun birlikte evrimi ile açıklanmaktadır.

Yol 2 Hindistan, Brezilya, Fas ve Mısır'da "Yukarı Dallanma" göstermektedir. Bu ülkeler, artan ancak Çin'e yakınsamayan YHPE skorlarıyla yukarı dallanma eğilimi sergilemektedir. Hindistan'ın 0,247'den 0,348'e yükselmesi, genişleyen yenilenebilir altyapının hidrojen endüstrisini desteklediğini göstermektedir. Ancak bu grubun Çin'e yaklaşamamasının iki temel nedeni bulunmaktadır: (i) proje sayısı ve toplam

yenilenebilir kapasitenin ölçek olarak hâlen sınırlı olması, endeksin en ağır bileşenlerinde boşluk yaratmakta; (ii) hükümet etkinliği, düzenleyici kalite ve politik istikrar gibi kurumsal göstergelerdeki sürtüşmeler yatırım hızını düşürmektedir. Mısır'ın 0,015'ten 0,092'ye yükselmesi, düşük bir başlangıç seviyesinden erken aşama yol ortaya çıkışını göstermektedir; ancak mevcut kapasite ve proje stoğu sınırlı olduğu için bu yukarı dallanma henüz kırılgandır.

Son olarak Yol 3, Rusya tarafından örneklenen "Kurumsal Çöküş (Negatif Kilitlenme)" dinamiğini temsil etmektedir. Rusya'nın YHPE skorunun 0,147'den 0,036'ya düşmesi, EEG'nin kurumsal boyutuna güçlü bir ampirik doğrulama sunmaktadır. Özellikle 2022 sonrası dönemde politik istikrar, hükümet etkinliği ve düzenleyici kalite göstergelerindeki bozulma, yatırım risk primini artırmış ve koordinasyon kapasitesini zayıflatmıştır. Sonuç olarak, güçlü teknik ve endüstriyel varlıklara rağmen bu varlıklar yeni bir yeşil hidrojen yoluna evrilememiş ve negatif kilitlenme üretmiştir. Rusya örneği, kurumsal çöküşün zengin kaynak ve teknik donanımı dahi işlevsizleştirebildiği bir yol kapanması mekanizmasını açık biçimde ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, yeşil hidrojenin yalnızca temiz bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda gelişmekte olan ülkelerde yapısal endüstriyel dönüşüm için stratejik bir platform teknolojisi olduğunu ileri sürmektedir. Evrimsel Ekonomik Coğrafya (EEG) yaklaşımını kullanarak çalışma, yeşil hidrojenin gelişmekte olan ülkelere kaynak temelli ekonomilerden bilgi güdümlü sanayileşmeye geçiş için özgün bir yol sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, seçilmiş gelişmekte olan ülkelerin yenilenebilir varlıklarının basit bir stok haritalandırmasının ötesine geçmeyi ve bu potansiyelin hangi koşullar altında yeni endüstriyel yollara dönüşebileceğini veya dönüşümün hangi evrimsel kısıtlar altında sınırlanabileceğini incelemeyi amaçlamıştır.

Çalışmanın temel argümanı, yeşil hidrojen dönüşümünün doğrusal bir teknolojik ikame süreci değil, yol bağımlı ve evrimsel bir dönüşüm süreci olduğudur. Bu argüman, EEG teorik çerçevesi aracılığıyla ele alınmıştır. EEG yaklaşımı, dönüşümü tarihsel kilitlenmeler, ilişkili çeşitlilik ve yeni endüstriyel yolların stratejik aktörler tarafından inşa edilmesi bağlamında, daha geniş bir sosyo-ekonomik evrim süreci olarak analiz etmeyi mümkün kılmıştır.

Ampirik analiz, çalışmanın iki temel hipotezini doğrulamıştır.

Birinci hipotez (Birlikte Evrim Hipotezi) kapsamında bulgular, endüstriyel üstünlüğün tekno-ekonomik kapasiteler ile kurumsal çevrenin birlikte evriminin bir fonksiyonu olduğunu teyit etmektedir. Yenilenebilir kaynak donanımının tek başına yetersiz olduğu; sürdürülebilir bir endüstriyel yol yaratmak için kurumsal kaliteyle birleştirilmesi gerektiği doğrulanmıştır. Çin'in Güçlü tekno-ekonomik ve kurumsal yapısı profili bu hipotezi mükemmel biçimde örneklemektedir: güneş ve rüzgârdaki devasa tekno-ekonomik ölçek (toplam yenilenebilir kapasite, hidrojen projeleri), yüksek performanslı hükümet etkinliğiyle eşleşerek 2023 yılındaki 0,952'lik YHPE skoruyla baskın ve kendini pekiştiren bir üstünlük yaratmıştır. Bu bulgu, ne kaynakların ne de politikanın tek başına yeterli olmadığını; sinerjik bir etkileşimin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

İkinci hipotez (Yol Ayrışması Hipotezi) kapsamında analiz, ülkelerin yeşil hidrojen endüstriyel üstünlüğünde tek tip bir yakınsama yerine, başlangıç koşullarına bağlı olarak farklı evrimsel yörüngeler izlediğini göstermiştir. 2019–2023 dönemi boyunca üç farklı yörünge tipi gözlemlenmiştir:

Bunlardan birincisi pozitif kilitlenme; Çin'in yüksek YHPE skorlarını istikrarlı biçimde koruması (0,94–0,95 aralığında), başarının başarıyı beslediği kendini pekiştiren bir büyüme döngüsünü temsil etmektedir.

İkincisi yukarı dallanma, Hindistan (0,247'den 0,348'e), Brezilya, Fas ve Mısır'ın artan skorları, bu ülkelerin yenilenebilir tabanlarını ve/veya kurumsal kapasitelerini yeni endüstriyel fırsatlara dönüştürme çabasını yansıtmaktadır.

Üçüncüsü ise kurumsal çöküş (Negatif kilitlenme), Rusya'nın 0,147'den 0,036'ya düşen skoru, çalışmanın en çarpıcı bulgusudur. Bu sonuç, güçlü tekno-ekonomik varlıkların dahi kurumsal bozulma karşısında sürdürülebilir bir endüstriyel yola dönüşemeyeceğini açık biçimde göstermektedir.

Bulgular, Bölüm 1 ve Bölüm 2'de geliştirilen teorik çerçeveyi ampirik olarak desteklemektedir.

Dekarbonizasyonu zor sektörler ve yenilenebilir çekim etkisi: Bölüm 1, demir-çelik üretimi, amonyak sentezi ve ağır taşımacılık gibi geleneksel elektrifikasyonun yetersiz kaldığı sektörlerin karbonsuzlaştırılmasında yeşil hidrojenin kritik rolünü ortaya koymuştur. Hindistan gibi güçlü tekno-ekonomik, sınırlı kurumsal yapıya sahip ülkelerin ampirik performansı bu önermeyle doğrudan uyumludur; zira bu ülkelerin endüstriyel rekabet avantajları, yeşil hidrojenin mevcut ağır sanayi tabanlarını karbonsuzlaştırma potansiyelinden kaynaklanmaktadır (OECD, 2022; UNIDO,IRENA,IDOS, 2023). Bu bulgu, Bölüm 2'de tartışılan "yenilenebilir çekim etkisi" mekanizmasıyla tutarlıdır: bol ve düşük maliyetli yenilenebilir enerji, yeni yeşil endüstriyel sermayeyi çekebilmekte ve mevcut endüstriyel kapasitelerin dönüşümünü kolaylaştırmaktadır (IRENA, 2022; Boschma, 2017).

Yol bağımlılığı ve yol yaratma: Bölüm 2'de geliştirilen EEG modeli, bölgesel ekonomilerin mevcut kapasiteler temelinde evrildiğini; bu durumun eski teknolojileri kilitleyebildiği gibi ilişkili çeşitlendirme için de kullanılabildiğini savunmuştur. YHPE yörüngeleri bu argümanın açık kanıtını sunmaktadır. Rusya örneği, kurumsal istikrarsızlığın zengin kaynak donanımını ve teknik uzmanlığı etkisizleştirdiği negatif kilitlenmenin güçlü bir gösterimidir. Buna karşılık Fas'ın sınırlı tekno-ekonomik, güçlü kurumsal yapısı, stratejik Ulusal Hidrojen Stratejisi tarafından desteklenen ve sıfırdan yeni bir endüstriyel yörünge inşa etmek için güçlü yönetişimi kullanan kasıtlı yol yaratmayı örneklemektedir.

Stratejik coğrafyanın rolü: Teorik tartışma, desalinasyon için kıyı erişimi ve ihracat odaklı endüstriyel kümelerin kritik önemini vurgulamıştır. Ampirik model bu faktörleri doğrudan ölçmese de, Fas, Brezilya ve Güney Afrika gibi ülkelerin yüksek potansiyeli, Bölüm 2'de öngörülen büyük ölçekli projeleri mümkün kılan kıyı coğrafyalarıyla özünde bağlantılıdır.

Analiz, ülkelerin tekno-ekonomik ve kurumsal kapasitelerinin göreli güçlülüğüne göre farklı konumlarda bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu farklılık, politika yapıcılara yeşil hidrojen dönüşümünde "herkese uyan tek beden" yaklaşımlarının neden işe yaramayacağını değerlendirmeleri için ayrıntılı bir çerçeve sunmaktadır.

Güçlü tekno-ekonomik ve kurumsal yapıya sahip Çin, güçlü tekno-ekonomik varlıkları ile koordineli kurumsal kapasitesinin eşzamanlı geliştiği ideal tipi temsil etmektedir. Bu profil, yeşil hidrojen endüstriyel üstünlüğünün nasıl pekiştirilip sürdürülebileceğinin referans modelini oluşturmaktadır.

Güçlü tekno-ekonomik ve sınırlı kurumsal yapıya sahip Hindistan ve Brezilya. Bu ülkeler için temel engel kurumsaldır. Geniş yenilenebilir enerji tabanlarına ve mevcut endüstriyel kapasitelere sahip olmalarına rağmen, kurumsal sürtüşmeler dönüşümü yavaşlatmaktadır. Bu ülkelerin önceliği, hükümet etkinliğini artıran ve uzun vadeli, sermaye yoğun projelerin gerektirdiği istikrarlı düzenleyici kaliteyi sağlayan reformlara odaklanan kurumsal birlikte evrim olmalıdır (Do, 2024; UNIDO, IRENA & IDOS, 2023). Politika çerçeveleri, doğrudan yabancı yatırım için düzenleyici ortamı

istikrara kavuşturmayı ve uluslararası enerji ticareti için izin prosedürlerini basitleştirmeyi vurgulamalıdır.

Sınırlı tekno-ekonomik ve güçlü kurumsal yapıya sahip Fas için strateji, mevcut kurumsal gücün (düşük risk, istikrarlı politika ortamı) tekno-ekonomik kapasite inşası için kaldıraç olarak kullanılmasıdır (IRENA, 2022). Bu kurumsal güç, hidrojen projeleri, güneş ve rüzgâr kapasitesini hızla inşa etmek ve Bölüm 2'de tartışılan entegre "hidrojen vadileri" ile endüstriyel kümeler oluşturmak için gereken doğrudan yabancı yatırımı ve teknoloji transferini çekmek amacıyla kullanılmalıdır.

Her iki boyutta kısıtlı yapıya sahip Güney Afrika, Türkiye ve Mısır. Bu ülkeler için çift yönlü bir yaklaşım zorunludur. Bir yandan yönetişim kapasitesinin güçlendirilmesi ve istikrarlı bir düzenleyici yapının oluşturulması; diğer yandan teknik bilgi biriktiren pilot ve gösterim projelerinin paralel olarak yürütülmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, UNIDO'nun "yonca yaklaşımı" ile de tutarlıdır: yerli talep ve kapasite geliştirildikten sonra ihracatın ölçeklendirilmesi önerilmektedir (UNIDO, IRENA & IDOS, 2023).

Bu çalışma, yüksek bir tutarlılık düzeyiyle (Tutarlılık Oranı = 0,004) doğrulanan özgün bir bileşik endeks olan Yeşil Hidrojen Potansiyel Endeksi'ni (YHPE) başarıyla geliştirmiş ve uygulamıştır. Endeksin iki kümeli yapısı, altı tekno-ekonomik ve dört kurumsal gösterge, EEG kavramlarının ampirik olarak işlevselleştirilmesini mümkün kılmıştır. Tekno-ekonomik kriterler yol bağımlılığını, kurumsal kriterler yol yaratma kapasitesini, toplam YHPE skoru ise birlikte evrim düzeyini yansıtmaktadır. Bu metodolojik çerçeve, gelecek çalışmalarda farklı ülke gruplarına ve sektörlere uygulanabilir niteliktedir.

Bu çalışma, yeşil hidrojenin bir iklim çözümünden çok daha fazlası olduğunu; gelişmekte olan ülkeler için endüstriyel dönüşüm, enerji güvenliği ve küresel değer zincirlerinde yeniden konumlanma açısından stratejik bir araç niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır. 2050 yılına kadar küresel hidrojen talebinin yaklaşık üçte ikisinin yeşil hidrojen olacağı öngörüldüğünde, bu dönüşüm sera gazı emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra jeopolitik güç kazanımı, enerji bağımsızlığı ve milyonlarca yeni istihdam yaratma potansiyeli taşımaktadır.

Bulgular, yeşil hidrojen ekonomisine giden yolun tek tip olmadığını; doğal kaynak donanımı, teknolojik kapasite ve kurumsal bağlılığın birlikte var olduğu durumlarda başarılı dönüşüm yollarının ortaya çıktığını göstermektedir. İncelenen gelişmekte olan ülkeler açısından yeşil hidrojen, tarihsel yol bağımlılıklarını kırmak, yeni yüksek katma değerli endüstriyel ekosistemler yaratmak ve küresel değer zincirlerindeki konumlarını yeniden tanımlamak için nadir bir fırsat sunmaktadır.

Nihayetinde bu çalışma, yeşil hidrojen dönüşümünün yalnızca enerji kapasitesi artırımıyla sınırlı olmadığını; aynı zamanda kurumsal adaptasyon ve politika koordinasyonu açısından da zamana karşı bir yarış niteliği taşıdığını vurgulamaktadır. Bu nedenle politika yapıcıların, doğal potansiyeli uzun vadeli ekonomik refaha dönüştürebilmek için endüstriyel stratejilerini ülkelerin özgül evrimsel yörüngeleriyle uyumlu biçimde tasarlamaları gerekmektedir. Gelişmekte olan ülkeler için temel öneriler şunlardır: yenilenebilir enerji altyapı yatırımlarının ölçeklendirilmesi, tutarlı ve öngörülebilir düzenleyici çerçevelerin oluşturulması ve teknoloji transferi ile yerel kapasite geliştirmeyi bütünleştiren kapsayıcı sanayi politikalarının tasarlanması.

Sonuç olarak, devletin rejim tipinden bağımsız olarak kamu teşvik mekanizmalarının belirleyici rolü vurgulanmalıdır. Çin'in merkezi planlaması, Fas'ın stratejik yönlendirmesi ve Brezilya'nın federal yapısı gibi farklı yönetişim modelleri, tutarlı teşvikler ve öngörülebilir düzenleyici çerçeveler sağlandığında yeşil hidrojen potansiyeli alanında ilerleme kaydetmiştir. Örneklemdeki sekiz ülkenin tamamı Paris Anlaşması'na taraf olmakla birlikte, anlaşma kapsamındaki NDC taahhütleri ve uygulama performansları önemli farklılıklar sergilemektedir; bu durum, uluslararası iklim hedefleriyle uyumun ulusal politika tercihlerine bağlı olduğunu göstermektedir. Piyasa-devlet ilişkisi açısından bulgular, yeşil hidrojen gibi sermaye yoğun sektörlerde salt piyasa mekanizmalarının yetersiz kaldığını; devletin risk azaltıcı, koordinasyon sağlayıcı ve piyasa başarısızlıklarını giderici rolünün piyasa dinamikleriyle tamamlayıcı biçimde işlemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

Acemoğlu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. ve Hemous, D.: "The Environment and Directed Technical Change," **American Economic Review**, 102(1), 2012, s. 131-166.

UK Government Analysis Function.: "An Introductory Guide to Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)," UK Government Analysis Function, 2024.

Antonelli, C.: "Localized Technological Knowledge: Pecuniary Knowledge Externalities and Appropriability," **Papers on Economics and Evolution**, 0707, Max Planck Institute of Economics, 2007.

Balland, P.-A., Boschma, R., Crespo, J. ve Rigby, D. L.: "Smart Specialization Policy in the European Union: Relatedness, Knowledge Complexity and Regional Diversification," **Regional Studies**, 53(9), 2019, s. 1252-1268.

Baumgarten, J., Schneider, C. P. ve Möst, D.: "Hydrogen Economy Index – A Comparative Assessment of the Political and Economic Perspective in the MENA Region for a Clean Hydrogen Economy," **International Journal of Hydrogen Energy**, 2024.

Bhaskar, A., Assadi, M. ve Somehsaraei, H. N.: "Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen," **Energies**, 13(3), 2020, s. 758.

Boschma, R.: "Towards an Evolutionary Perspective on Regional Resilience," **Regional Studies**, 49(5), 2015, s. 733-751.

Boschma, R.: "Relatedness as Driver of Regional Diversification: A Research Agenda," **Regional Studies**, 51(3), 2017, s. 351-364.

Boschma, R.: "An Evolutionary Approach to Regional Studies on Global Value Chains," **Regional Studies**, 58(1), 2024, s. 1-15.

Boschma, R. ve Frenken, K.:	"Why is Economic Geography not an Evolutionary Science? Towards an Evolutionary Economic Geography," **Journal of Economic Geography**, 6(3), 2006, s. 273-302.
Boschma, R. ve Kloosterman, R. C.:	**Clustering, Learning and Regional Development**, Springer, 2005.
Boschma, R. ve Lambooy, J. G.:	"Evolutionary Economics and Economic Geography," **Journal of Evolutionary Economics**, 9(4), 1999, s. 411-429.
Boschma, R. ve Martin, R.:	"The Aims and Scope of Evolutionary Economic Geography," **Papers in Evolutionary Economic Geography**, 10(01), Utrecht University, 2010.
Bridge, G., Bouzarovski, S., Bradshaw, M. ve Eyre, N.:	"Geographies of Energy Transition: Space, Place and the Low-Carbon Economy," **Energy Policy**, 53, 2013, s. 331-340.
Callari, M.:	"The Future of Shipping: Hydrogen Powers a Zero-Emission Maritime Industry," **Marine Technology News**, Ocak 2025.
Caribbean Disaster Emergency Management Agency [CDEMA].:	"Multi Criteria Evaluation: User Manual," CDEMA, 2014.
ChemKlub.:	"Hydrogen Economy and Decarbonization Pathways," **ChemKlub Publications**, 2024.
Clean Hydrogen Joint Undertaking.:	"Hydrogen Deployment and Industrial Transformation in Europe," European Commission, 2024.
Cooke, P. ve De Laurentis, C.:	"Evolutionary Economic Geography, Regional Systems of Innovation and High-Tech Clusters," **Regional Knowledge Economies: Markets, Clusters and Innovation** (ss. 1-25), P. Cooke, C. De Laurentis, F. Tödtling ve M. Trippl (Ed.), Edward Elgar, 2008.
Do, A. T.:	"Renewable Energy Policy, Governance Quality and Economic Growth: A Cross-Country Analysis,"

Journal of Organizational Behavior Research, 9(1), 2024, s. 45-62.

EIN Presswire.: "Global Green Hydrogen Investment Announcements," EIN Presswire, 2024.

Ember.: **Global Electricity Review 2025**, Ember Climate, 2025. https://ember-climate.org/

European Commission.: "A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe (COM/2020/301)," European Commission, 2020.

European Commission.: "Fit for 55: Introducing the Carbon Border Adjustment Mechanism," European Commission, 2021.

European Commission.: "Reducing Emissions from Aviation," European Commission, 2025. https://climate.ec.europa.eu/

European Commission.: "Renewable Hydrogen," European Commission, 2025. https://energy.ec.europa.eu/

European Court of Auditors.: "EU Support for Renewable Hydrogen: Policy Coherence and Investment Challenges (Special Report No. 11/2024)," European Court of Auditors, 2024.

Franco, A.: "Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities," **Recent Advances in Hydrogen Technologies: Production, Storage and Utilization** (ss. 1-28), A. Franco (Ed.), Springer, 2025.

Frenken, K. ve Boschma, R.: "A Theoretical Framework for Evolutionary Economic Geography: Industrial Dynamics and Urban Growth as a Branching Process," **Journal of Economic Geography**, 7(5), 2007, s. 635-649.

Frenken, K., Van Oort, F. ve Verburg, T.: "Related Variety, Unrelated Variety and Regional Economic Growth," **Regional Studies**, 41(5), 2007, s. 685-697.

Fromhold-Eisebith, M.: "Path Development and Regional Innovation Systems: Concepts and Debates," **Geography Compass**, 12(6), 2018, e12380.

García, E. S., Falcó, J. M., Lajara, B. M. ve Fernández, L. R.: "Regional Specialization as a Driver of Potential and Realized Absorptive Capacity and Business Innovation," **Journal of the Knowledge Economy**, 14(3), 2023, s. 2845-2871.

Garud, R. ve Karnøe, P.: "Path Dependence and Creation," **Path Dependence and Creation** (ss. 1-38), R. Garud ve P. Karnøe (Ed.), Lawrence Erlbaum Associates, 2001.

Geels, F. W.: "The Multi-Level Perspective on Sustainability Transitions: Responses to Seven Criticisms," **Environmental Innovation and Societal Transitions**, 1(1), 2011, s. 24-40.

GIZ H2-diplo.: "International Hydrogen Diplomacy and Cooperation Strategies," Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2024.

Glaeser, E. L., Kallal, H. D., Scheinkman, J. A. ve Shleifer, A.: "Growth in Cities," **Journal of Political Economy**, 100(6), 1992, s. 1126-1152.

Global Renewables Congress.: "Green Hydrogen: Opportunities and Challenges in the Energy Transition," Global Renewables Congress, 2025.

Green Hydrogen Organisation.: "The GH2 Green Hydrogen Standard," Green Hydrogen Organisation, 2022. https://gh2.org/

Green Hydrogen Organisation.: **Global Green Hydrogen Market Status Report**, Green Hydrogen Organisation, 2023.

Green Hydrogen Organisation.: "Spring 2025 Stocktake: Difficult Times but the Green Hydrogen Economy is Coming," Green Hydrogen Organisation, 2025.

Hausmann, R.: "Green Growth Opportunities," **IMF Finance & Development**, 59(4), 2022, s. 18-21.

Heid, B., Sator, A., Waardenburg, M. ve Wilthaner, M.: "Five Charts on Hydrogen's Role in a Net-Zero Future," McKinsey & Company, 2022. https://www.mckinsey.com/

Hjeij, D., Bicer, Y., Al-Sada, M. B. S. ve Koç, M.: "Hydrogen Export Competitiveness Index for a Sustainable Hydrogen Economy," **Energy Policy**, 173, 2023, s. 113397.

Hydrogen Council.: **Hydrogen Decarbonization Pathways: A Life-Cycle Assessment**, Hydrogen Council, 2021. https://hydrogencouncil.com/

Iberdrola.: "Green Hydrogen: An Alternative that Reduces Emissions and Cares for Our Planet," Iberdrola, 2025. https://www.iberdrola.com/

Ike Institute.: "Scaling Innovation for a Transformative Tomorrow," **Brite Innovation Review**, 12(1), 2025, s. 1-15.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC].: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC (O. Edenhofer vd., Ed.), Cambridge University Press, 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC].: **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC (P. R. Shukla vd., Ed.), Cambridge University Press, 2022.

International Energy Agency [IEA].: **The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities**, IEA, 2019. https://www.iea.org/

International Energy Agency [IEA].: **Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking**, IEA, 2020. https://www.iea.org/

International Energy Agency [IEA].: **Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertiliser Production**, IEA, 2021. https://www.iea.org/

International Energy Agency [IEA].: **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector**, IEA, 2021. https://www.iea.org/

International Energy Agency [IEA].:	"How Much Will Renewable Hydrogen Production Drive Demand for New Renewable Energy Capacity by 2027?," IEA, 2022. https://www.iea.org/
International Energy Agency [IEA].:	**Breakthrough Agenda Report 2023**, IEA, 2023. https://www.iea.org/
International Energy Agency [IEA].:	"Hydrogen Net Zero Emissions Guide," IEA, 2023. https://www.iea.org/
International Energy Agency [IEA].:	**Global Hydrogen Review 2024**, IEA, 2024. https://www.iea.org/
International Energy Agency [IEA].:	"Hydrogen," IEA, 2024. https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen
International Energy Agency [IEA].:	**World Energy Outlook 2024**, IEA, 2024. https://www.iea.org/
International Energy Agency [IEA].:	"Electrolysers," IEA, 2025. https://www.iea.org/
International Energy Agency [IEA].:	**Global Energy Review 2025**, IEA, 2025. https://www.iea.org/
International Renewable Energy Agency [IRENA].:	**Hydrogen: A Renewable Energy Perspective**, IRENA, 2019. https://www.irena.org/
International Renewable Energy Agency [IRENA].:	**Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**, IRENA, 2020. https://www.irena.org/
International Renewable Energy Agency [IRENA].:	**Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal**, IRENA, 2020. https://www.irena.org/
International Renewable Energy Agency [IRENA].:	**Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor**, IRENA, 2022. https://www.irena.org/
International Renewable Energy Agency [IRENA].:	**Renewable Capacity Statistics 2023**, IRENA, 2023. https://www.irena.org/

International Renewable Energy Agency [IRENA].: **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway**, IRENA, 2023. https://www.irena.org/

Jensen, K.: "Green Hydrogen: The Future of the Global Energy Transition?," **Energy Policy Review**, 15(2), 2025, s. 112-128.

Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolber, F., Moya, J. ve Jäger-Waldau, A.: "Green Hydrogen in Europe – A Regional Assessment: Substituting Existing Production with Electrolysis Powered by Renewables," **Energy Conversion and Management**, 228, 2021, s. 113649.

Kogler, D. F., Evenhuis, E., Giuliani, E., Martin, R., Uyarra, E. ve Boschma, R.: "Re-Imagining Evolutionary Economic Geography," **Cambridge Journal of Regions, Economy and Society**, 16(3), 2023, s. 413-429.

Kumar, D., Krishna, R., Colak, H. ve Saravanan, J.: "Green Hydrogen: Paving the Way for India's Decarbonization Revolution," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 189, 2024, s. 113892.

Lambooy, J. G.: "The Evolution of Spatial Patterns over Long Time-Horizon: The Relation with Technology and Economic Development," **The Handbook of Evolutionary Economic Geography** (ss. 471-496), R. Boschma ve R. Martin (Ed.), Edward Elgar, 2010.

Lhyfe.: "Green Hydrogen's Role in Accelerating the Energy Transition," Lhyfe, 2024. https://www.lhyfe.com/

Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D. ve Mathiesen, B. V.: "Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating," **Energy**, 110, 2016, s. 1-4.

Maka, A. O. M. ve Mehmood, M.: "Green Hydrogen Energy Production: Current Status and Potential," **Clean Energy**, 8(1), 2024, s. 1-14.

MarketsandMarkets.: **Green Hydrogen Market by Technology and Application**, MarketsandMarkets, 2024.

Martin, R.: "Roepke Lecture in Economic Geography – Rethinking Regional Path Dependence: Beyond

Lock-In to Evolution," **Economic Geography**, 86(1), 2009, s. 1-27.

Martin, R. ve Sunley, P.: "Path Dependence and Regional Economic Evolution," **Journal of Economic Geography**, 6(4), 2006, s. 395-437.

Martin, R. ve Sunley, P.: "The Place of Path Dependence in an Evolutionary Perspective on the Economic Landscape," **The Handbook of Evolutionary Economic Geography** (ss. 62-92), R. Boschma ve R. Martin (Ed.), Edward Elgar, 2010.

Martin, R. ve Sunley, P.: "Making History Matter More in Evolutionary Economic Geography," **Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie**, 66(2), 2022, s. 65-80.

Maskell, P. ve Malmberg, A.: "Localised Learning and Industrial Competitiveness," **Cambridge Journal of Economics**, 23(2), 1999, s. 167-185.

McKinsey & Company.: **Global Energy Perspective 2024: Hydrogen Outlook**, McKinsey & Company, 2024. https://www.mckinsey.com/

Medinilla, A. ve Dekeyser, K.: "Green Hydrogen: The Future of African Industrialisation?," **ECDPM Discussion Paper**, 330, European Centre for Development Policy Management, 2024.

Mittal, A.: "Green Hydrogen: A Sustainable Path to Clean Energy Generation and Storage," **IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology**, 17(5), 2023, s. 1-8.

Moreno-Brieva, F., Guimon, J. ve Salazar-Elena, J. C.: "From Grey to Green and from West to East: The Geography and Innovation Trajectories of Hydrogen Fuel Technologies," **Energy Policy**, 174, 2023, s. 113447.

Navarro, M., Boschma, R. ve Minondo, A.: "The Emergence of New Industries at the Regional Level in Spain: A Proximity Approach Based on

Product Relatedness," **Economic Geography**, 89(1), 2013, s. 29-51.

Neffke, F., Henning, M. ve Boschma, R.: "How Do Regions Diversify over Time? Industry Relatedness and the Development of New Growth Paths in Regions," **Economic Geography**, 87(3), 2011, s. 237-265.

Nelson, R. R. ve Winter, S. G.: **An Evolutionary Theory of Economic Change**, Harvard University Press, 1982.

Okonkwo, E. C., Al-Breiki, M., Bicer, Y. ve Al-Ansari, T.: "Sustainable Hydrogen Roadmap: A Holistic Review and Decision-Making Methodology for Production, Utilisation and Exportation Using Green Hydrogen in Arid Region," **International Journal of Hydrogen Energy**, 46(35), 2021, s. 18512-18528.

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD].: **Aligning Policies for a Low-Carbon Economy**, OECD Publishing, 2015.

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD].: **Green Hydrogen Opportunities for Emerging and Developing Economies: A Policy Handbook**, OECD Publishing, 2022.

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD].: **Green Hydrogen Policies and Investment Outlook for Emerging Economies**, OECD Publishing, 2024.

Pathak, S.: "Understanding Green Hydrogen: Production Methods and Benefits," Hero Future Energies, 2024. https://www.herofutureenergies.com/

Peres, M., Ameer, W. ve Xu, H.: "The Impact of Institutional Quality on Foreign Direct Investment Inflows: Evidence for Developed and Developing Countries," **Economic Research-Ekonomska Istraživanja**, 31(1), 2018, s. 626-644.

Pigou, A. C.: **The Economics of Welfare**, Macmillan, 1920.

Pollock, J.: "Path Creation and Institutional Change in Regional Development," **Regional Studies**, 53(5), 2019, s. 742-754.

PwC.: **The Green Hydrogen Economy: Predicting the Decarbonisation Agenda of Tomorrow**, PwC, 2024. https://www.pwc.com/

Ramboll.: **Green Hydrogen Market Outlook and Infrastructure Challenges**, Ramboll, 2024.

Reda, B., Elzamar, A. A., AlFazzani, S. ve Ezzat, S. M.: "Green Hydrogen as a Source of Renewable Energy: A Step towards Sustainability, an Overview," **Environment, Development and Sustainability**, 26, 2024, s. 1-25.

Renewables Advice.: "Green Hydrogen: How it Works and Applications," Renewables Advice, 2024. https://renewablesadvice.com/

Research and Markets.: **Green Hydrogen Market Industry Report 2025: Global Forecasts to 2035**, Research and Markets, 2025.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F. vd.: "Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity," **Ecology and Society**, 14(2), 2009, s. 32.

Rodríguez, P.: "Betting on Green Hydrogen to Fulfil Employment Growth," CIC energiGUNE, 2023. https://cicenergigune.com/

Rystad Energy.: "Africa and Europe Set to be the Dynamos for the Global Green Hydrogen Economy," Rystad Energy, 2023. https://www.rystadenergy.com/

Saaty, T. L.: **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**, McGraw-Hill, 1980.

Saaty, T. L.: "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process," **International Journal of Services Sciences**, 1(1), 2008, s. 83-98.

Saaty, T. L. ve Vargas, L. G.: **Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process** (2. baskı), Springer, 2012.

Schumpeter, J. A.: **Capitalism, Socialism and Democracy**, Harper & Brothers, 1942.

Serna, S., Gerres, T. ve Cossent, R.: "Multi-Criteria Decision-Making for Renewable Hydrogen Production Site Selection: A Systematic Literature Review," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 184, 2023, s. 113545.

Signoret, J. ve Cieszkowsky, M.: "To Tackle Climate Change, Governments Increasingly Turn to Green Subsidies," World Bank Blogs, 2024. https://blogs.worldbank.org/

Silva, M.: "Scaling Up Green Hydrogen for Inclusive Growth, Better Jobs, and Lower Emissions," Sustainable Energy for All, 2023.

Simon, H. A.: **Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organization** (2. baskı), Macmillan, 1957.

6sigma.us.: "Make Effective Decisions: Comprehensive Guide to Analytic Hierarchy Process (AHP)," 6sigma.us, 2024.

Stam, E.: "Entrepreneurship, Evolution and Geography," **Papers on Economics and Evolution**, 0907, Max Planck Institute of Economics, 2009.

Taherdoost, H. ve Madanchian, M.: "Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts," **Encyclopedia**, 3(1), 2023, s. 77-87.

The Royal Society.: **Ammonia: Zero-Carbon Fertiliser, Fuel and Energy Store**, The Royal Society, 2020.

The Silicon Review.: "Emerging Green Hydrogen Hubs and Industrial Innovation," The Silicon Review, 2024.

Triantaphyllou, E. ve Mann, S. H.: "Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges," **International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice**, 2(1), 1995, s. 35-44.

Trippl, M., Baumgartinger-Seiringer, S., Frangenheim, A., Isaksen, A. ve Rypestøl, J. O.: "Unravelling Green Regional Industrial Path Development: Regional Preconditions, Asset Modification and Agency," **Geoforum**, 111, 2020, s. 190-197.

Truby, J., Philip, P. ve Lorentz, B.: "Green Hydrogen: Energising the Path to Net Zero," Deloitte, 2023. https://www.deloitte.com/

UN Comtrade.: **International Trade Statistics Database**, United Nations, t.y. https://comtrade.un.org/

United Nations.: "Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1)," United Nations, 2015.

United Nations Development Programme [UNDP].: "What is the Sustainable Energy Transition and Why is it Key to Tackling Climate Change?," UNDP, 2025. https://www.undp.org/

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC].: **Paris Agreement**, United Nations, 2015.

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO].: **Industrial Development Report 2016: The Role of Technology and Innovation in Inclusive and Sustainable Industrial Development**, UNIDO, 2016.

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO].: **Industrial Development Report 2020: Industrializing in the Digital Age**, UNIDO, 2020.

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO].: "IRENA and UNIDO Support a Global Energy Transition through Green Hydrogen," UNIDO, 2022. https://www.unido.org/

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO].: **Global Programme for Hydrogen in Industry**, UNIDO, 2023.

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO].: **Industrial Development Pathways for Green Hydrogen in Developing Countries**, UNIDO, 2024.

United Nations Industrial Development Organization [UNIDO], International Renewable Energy Agency [IRENA] ve German Institute of Development and Sustainability [IDOS].: **Green Hydrogen for Sustainable Industrial Development: A Policy Toolkit for Developing Countries**, UNIDO, 2023.

Unruh, G. C.: "Understanding Carbon Lock-In," **Energy Policy**, 28(12), 2000, s. 817-830.

Wang, F., Wong, W.-K., Wang, Z., Albasher, G., Alsultan, N. ve Fatemah, A.: "Emerging Pathways to Sustainable Economic Development: An Interdisciplinary Exploration of Resource Efficiency, Technological Innovation, and Ecosystem Resilience in Resource-Rich Regions," **Resources Policy**, 85, 2023, s. 103914.

Wellbrock, J.: "Actors, Institutions and Innovation Processes in New Path Creation: The Regional Emergence and Evolution of Wind Energy Technology in Germany," [Doktora tezi, Leibniz Universität Hannover], 2021.

World Bank.: "GDP per Capita (Current US$)," **World Bank Open Data**, t.y. https://data.worldbank.org/

World Bank.: "Worldwide Governance Indicators (WGI)," World Bank, t.y. https://info.worldbank.org/governance/wgi/

Younus, A., Khan, M. A. ve Ahmad, S.: "Green Hydrogen Development Pathways and Sustainability Challenges," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 191, 2025, s. 114125.

Zaheb, H., Obaidi, O., Mukhtar, S., Shirani, H., Ahmadi, M. ve Yona, A.: "Comprehensive Analysis and Prioritization of Sustainable Energy Resources Using Analytical Hierarchy Process," **Sustainability**, 16(3), 2024, s. 1123.

EKLER

Ek A: Kriter Tanımı ve Seçimi

Bu çalışma, yeşil hidrojenin endüstriyel üstünlüklerini analiz etmek için Analitik Hiyerarşi Süreci'ni (AHS) kullanmıştır. Gelişmekte olan ülkelerin potansiyelini değerlendirmek için aşağıdaki on kriter seçilmiştir.

Ek A.1: Kriter Listesi

Hidrojen Üretim Projeleri (Adet)
Hidrojen ihracatı (1000 usd)
Kişi başına GSYİH (cari USD)
Kurulu Güneş Enerjisi Kapasitesi (MW)
Kurulu Rüzgâr Kapasitesi (MW)
Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)
Politik İstikrar (Yüzdelik Sıralama: 0-100)
Hükümet Etkinliği yüzdelik
Düzenleyici Kalite yüzdelik
Yolsuzluğun Kontrolü (Yüzdelik Sıralama: 0-100)

Ek B: AHS Analizi ve Ağırlık Belirleme

Bu bölüm, her kriter için ağırlıkların belirlenmesini detaylandırmaktadır. Her faktörün göreli önemini belirlemek için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.

Ek B.1: İkili Karşılaştırma Matrisi 1

	hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	hidrojen ihracatı (1000 usd)	kişi başına gsyih (2023) (usd)
Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	1,00	7,00	7,00
Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,14	1,00	1,00
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,14	1,00	1,00
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	1,00	5,99	5,99

Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	0,50	4,00	4,00
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	1,00	5,99	5,99
Politik istikrar (2022)	0,25	2,00	2,00
Hükümet etkinliği (2022)	0,50	3,00	3,00
Düzenleyici kalite	0,50	3,00	3,00
Yolsuzluğun kontrolü	0,14	1,00	1,00
TOPLAM	5,18	33,98	33,98

Ek B.2: İkili Karşılaştırma Matrisi 2

	Güneş enerjisi KAP (MW)	Rüzgâr potansiyeli kap (mw)	Yenilenebilir enerji kap (mw)	Politik istikrar (2022)
Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	1,00	2,00	1,00	4,00
Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,17	0,25	0,17	0,50
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,17	0,25	0,17	0,50
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	1,00	1,00	1,00	4,00
Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	1,00	1,00	0,50	2,00
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	1,00	2,00	1,00	4,00
Politik istikrar (2022)	0,25	0,50	0,25	1,00

Hükümet etkinliği (2022)	0,50	1,00	0,50	2,00
Düzenleyici kalite	0,50	1,00	0,50	2,00
Yolsuzluğun kontrolü	0,17	0,25	0,17	0,50
TOPLAM	5,75	9,25	5,25	20,50

Ek B.3: İkili Karşılaştırma Matrisi 3

	hükümet etkinliği (2022)	Düzenleyici kalite	Yolsuzluğun kontrolü
Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	2,00	2,00	7,00
Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,33	0,33	1,00
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,33	0,33	1,00
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	2,00	2,00	6,00
Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	1,00	1,00	4,00
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	2,00	2,00	6,00
Politik istikrar (2022)	0,50	0,50	2,00
Hükümet etkinliği (2022)	1,00	1,00	3,00
Düzenleyici kalite	1,00	1,00	3,00
Yolsuzluğun kontrolü	0,33	0,33	1,00
TOPLAM	10,50	10,50	34,00

Kriter Ağırlıklarını (w) elde etmek amacıyla, öncelikle ikili karşılaştırma matrisi sütun bazında normalize edilmiştir. Bu işlemde her bir matris elemanı, ait olduğu sütunun toplamına bölünmüştür:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} a_{kj}}$$

Normalleştirilmiş matris elde edildikten sonra, her bir kriterin nihai ağırlığı, ilgili satırdaki normalize edilmiş değerlerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \bar{a}_{ij}}{n}$$

Ek B.4: Normalleştirilmiş Matris 1 ve Nihai Ağırlıklar

	Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	Hidrojen ihracatı (1000 usd)	Kişi başına gsyih (2023) (usd)
Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	0,193	0,206	0,206
Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,028	0,029	0,029
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,028	0,029	0,029
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	0,193	0,176	0,176
Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	0,097	0,118	0,118
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	0,193	0,176	0,176
Politik istikrar (2022)	0,048	0,059	0,059
Hükümet etkinliği (2022)	0,097	0,088	0,088
Düzenleyici kalite	0,097	0,088	0,088
Yolsuzluğun kontrolü	0,028	0,029	0,029

Ek B.5: Normalleştirilmiş Matris 2

	Güneş enerjisi KAP (MW)	Rüzgâr potansiyeli KAP (mw)	Yenilenebilir enerji KAP (mw)	Politik istikrar (2022)
Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	0,174	0,216	0,190	0,195
Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,029	0,027	0,032	0,024
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,029	0,027	0,032	0,024
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	0,174	0,108	0,190	0,195
Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	0,174	0,108	0,095	0,098
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	0,174	0,216	0,190	0,195
Politik istikrar (2022)	0,044	0,054	0,048	0,049
Hükümet etkinliği (2022)	0,087	0,108	0,095	0,098
Düzenleyici kalite	0,087	0,108	0,095	0,098
Yolsuzluğun kontrolü	0,029	0,027	0,032	0,024

Ek B.6: Normalleştirilmiş Matris 3

	Hükümet etkinliği (2022)	Düzenleyici kalite	Yolsuzluğun kontrolü
Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	0,191	0,191	0,206

Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,032	0,032	0,029
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,032	0,032	0,029
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	0,191	0,191	0,177
Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	0,095	0,095	0,118
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	0,191	0,191	0,177
Politik istikrar (2022)	0,048	0,048	0,059
Hükümet etkinliği (2022)	0,095	0,095	0,088
Düzenleyici kalite	0,095	0,095	0,088
Yolsuzluğun kontrolü	0,032	0,032	0,029

Ek B.7: Nihai Kriter Ağırlıkları

Hidrojen üretim projeleri (mevcut ve planlanan)	0,197
Hidrojen ihracatı (1000 USD)	0,029
Kişi başına GSYİH (2023) (USD)	0,029
Güneş enerjisi kurulu kapasitesi (MW)	0,177
Rüzgâr potansiyeli / kurulu kapasite (MW)	0,112
Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi (MW)	0,188
Politik istikrar (2022)	0,051
Hükümet etkinliği (2022)	0,094
Düzenleyici kalite	0,094
Yolsuzluğun kontrolü	0,029

AHS kapsamında elde edilen kriter ağırlıklarının güvenilirliğini ve mantıksal tutarlılığını değerlendirmek amacıyla Tutarlılık Oranı (TO) kullanılarak bir tutarlılık kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol, ikili karşılaştırma matrisinde kullanılan yargıların rastgele olup olmadığını test etmeyi amaçlamaktadır (Saaty, 1980).

İlk adımda, maksimum özdeğer (λmax) hesaplanmıştır. Bu değer, ikili karşılaştırma matrisi A ile ağırlık vektörü w'nun çarpımı sonucunda elde edilen vektörün, ilgili ağırlık bileşenlerine oranlarının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{(A \cdot w)_i}{w_i}$$

Lambda Maks (λmax) 10,05094 olarak hesaplanmıştır.

Ardından, Tutarlılık Endeksi (TE) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$CI = \frac{\lambda\, max - n}{n - 1} = \frac{10{,}05094 - 10}{9} = 0{,}00566$$

Son olarak, Tutarlılık Oranı (TO), Tutarlılık Endeksi'nin ilgili kriter sayısı için belirlenen Rastgele Endeks (RE) değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Saaty (1980) tarafından önerilen tabloda n=10 için RE = 1,49 olarak verilmektedir:

Tutarlılık Oranı (TO):

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}00566}{1{,}49} = 0{,}0038$$

TO (0,0038) 0,10'dan küçük olduğundan, karşılaştırma matrisi tutarlı ve güvenilir kabul edilmektedir.

Ek C: Ülke Veri Envanteri (2019-2023)

Analiz, beş yıl boyunca sekiz ülke için toplanan gerçek verilere Ağırlıklı Toplam Modeli'ni (ATM) uygulamıştır.

Not: Rusya'nın 2022 yılı hidrojen ihracatı verileri, önceki ve sonraki yılların ortalaması kullanılarak atanmıştır.

Ek C.1: Ham Veri 1 (2019-2023)

Yıl	Ülke	Hidrojen Üretim Projeleri (Adet)	Hidrojen İhracatı (1000 USD)	Kişi başına GSYİH (cari USD)	Kurulu Güneş Enerjisi Kapasitesi (MW)
2023	Çin	9	212,2	12951	610000
2023	Hindistan	1	36,5	2530	73000
2023	Güney Afrika	0	74,4	6022	6164
2023	Brezilya	1	17,3	10377	37449
2023	Rusya	0	0	14159	2100
2023	Fas	0	0	3771	934
2023	Mısır	0	44,9	3456	1856
2023	Türkiye	0	50,8	13105	11293
2022	Çin	7	971,4	12970	393032
2022	Hindistan	2	22,8	2347	63390
2022	Güney Afrika	1	24,8	6523	6326
2022	Brezilya	2	34,5	9281	25520
2022	Rusya	1	115,1	15619	1816
2022	Fas	0	0	3455	854
2022	Mısır	1	6	4233	1724
2022	Türkiye	0	34,7	10674	9426
2021	Çin	4	685,3	12887	306900
2021	Hindistan	1	4,4	2239	49950
2021	Güney Afrika	0	10,3	6843	6316
2021	Brezilya	1	10	7972	14499
2021	Rusya	0	230,2	12425	1600
2021	Fas	0	0	3785	854
2021	Mısır	0	33,9	3827	1663
2021	Türkiye	0	19,7	9743	7800
2020	Çin	4	1455,1	10627	253800
2020	Hindistan	0	21,7	1907	39705
2020	Güney Afrika	0	22,8	5580	5994
2020	Brezilya	0	1,3	7074	8452

2020	Rusya	0	568	10108	1428
2020	Fas	0	1,1	3268	774
2020	Mısır	0	0	3511	1643
2020	Türkiye	0	30,1	8638	6600
2019	Çin	2	3990,5	10343	205000
2019	Hindistan	0	13,3	2041	35250
2019	Güney Afrika	0	28,7	6533	4908
2019	Brezilya	0	8	9029	4698
2019	Rusya	0	601,1	11447	1276
2019	Fas	0	0	3508	734
2019	Mısır	0	8,7	2963	1647
2019	Türkiye	0	40,4	9215	5990

Ek C.2: Ham Veri 2 (2019-2023)

Yıl	Ülke	Kurulu Rüzgâr Kapasitesi (MW)	Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)	Politik İstikrar (Yüzdelik Sıralama: 0–100)	Hükümet Etkinliği (Yüzdelik)	Düzenleyici Kalite (Yüzdelik)	Yolsuzluğun Kontrolü (Yüzdelik Sıralama: 0–100)
2023	Çin	441895	1453701	25,12	73,58	38,68	54,25
2023	Hindistan	44736	176000	21,33	67,92	47,17	41,51
2023	Güney Afrika	3442	10623	20,85	40,57	44,34	45,75
2023	Brezilya	29135	194085	28,44	32,08	40,09	34,43
2023	Rusya	2518	56708	13,27	26,42	12,74	15,57
2023	Fas	1800	4105	29,86	50	50,94	33,02
2023	Mısır	1890	6700	16,59	41,98	26,89	24,53
2023	Türkiye	11697	58462	13,74	41,51	43,87	34,91
2022	Çin	365964	1156126	29,72	68,4	36,79	55,19
2022	Hindistan	41930	163013	24,06	63,21	50,94	44,81
2022	Güney Afrika	3163	10505	20,75	47,17	44,34	43,87
2022	Brezilya	24163	176710	31,13	31,13	43,87	32,08
2022	Rusya	2218	56880	14,15	25,94	13,21	18,4
2022	Fas	1558	3725	33,49	49,53	49,06	39,62

2022	Mısır	1643	6322	14,62	34,43	24,53	26,89
2022	Türkiye	11396	55946	13,68	43,87	43,4	34,91
2021	Çin	328900	1017852	28,3	75,71	40	56,19
2021	Hindistan	40067	147390	22,64	60,95	49,05	44,76
2021	Güney Afrika	2495	9827	20,28	50	49,52	53,81
2021	Brezilya	21161	160000	31,13	33,81	47,14	34,29
2021	Rusya	1955	56462	21,7	43,33	32,86	19,52
2021	Fas	1471	3638	31,6	45,71	46,67	38,57
2021	Mısır	1640	6258	14,62	34,76	34,29	26,67
2021	Türkiye	10607	53175	11,79	48,57	48,1	39,52
2020	Çin	281900	896000	27,83	73,33	44,29	52,86
2020	Hindistan	38600	134774	18,4	65,71	46,67	44,29
2020	Güney Afrika	2516	9523	39,15	53,33	53,33	53,33
2020	Brezilya	17198	150685	31,13	34,76	47,62	37,62
2020	Rusya	945	55219	22,64	49,05	34,76	19,05
2020	Fas	1435	3522	33,96	46,67	50	38,57
2020	Mısır	1380	5934	11,79	36,19	31,43	23,81
2020	Türkiye	8832	49195	12,74	47,14	50,48	41,9
2019	Çin	210000	758870	38,21	70,95	41,9	43,81
2019	Hindistan	37500	128475	19,34	59,05	47,14	44,76
2019	Güney Afrika	2100	8014	36,32	58,75	55,24	54,29
2019	Brezilya	15500	144657	20,75	41,9	49,05	39,52
2019	Rusya	102	53913	25,94	52,86	33,81	23,81
2019	Fas	1225	3272	32,55	40,48	46,67	41,43
2019	Mısır	1132	5690	12,26	40,95	21,9	28,57
2019	Türkiye	7591	44389	9,91	50,95	52,38	42,86

Ek D: Veri Normalleştirme

Kriterleri karşılaştırılabilir hale getirmek için ham veriler Min-Maks yöntemi kullanılarak normalleştirilmiştir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}}$$

Ek D.1: Normalleştirilmiş Veri Matrisi 1 (Değerler 0 ile 1 arasında değişmektedir; burada 1, o yıl için o kategorideki en iyi performansı temsil etmektedir)

Yıl	Ülke	Hidrojen Üretim Projeleri (Sayı)	Hidrojen İhracatı (1000 USD)	Kişi başına GSYİH (cari USD)	Güneş Enerjisi Kurulu Kapasitesi (MW)
2023	Çin	1	1	0,896122	1
2023	Hindistan	0,111111	0,172008	0	0,118322
2023	Güney Afrika	0	0,350613	0,300284	0,008587
2023	Brezilya	0,111111	0,081527	0,674779	0,059952
2023	Rusya	0	0	1	0,001914
2023	Fas	0	0	0,106716	0
2023	Mısır	0	0,211593	0,079629	0,001514
2023	Türkiye	0	0,239397	0,909365	0,017008
2022	Çin	1	1	0,800407	1
2022	Hindistan	0,285714	0,023471	0	0,159458
2022	Güney Afrika	0,142857	0,02553	0,314647	0,013953
2022	Brezilya	0,285714	0,035516	0,522453	0,062895
2022	Rusya	0,142857	0,118489	1	0,002453
2022	Fas	0	0	0,083484	0
2022	Mısır	0,142857	0,006177	0,142104	0,002218
2022	Türkiye	0	0,035722	0,627411	0,021857
2021	Çin	1	1	1	1
2021	Hindistan	0,25	0,006421	0	0,16042
2021	Güney Afrika	0	0,01503	0,432382	0,017847
2021	Brezilya	0,25	0,014592	0,538411	0,044585
2021	Rusya	0	0,335911	0,956612	0,002438
2021	Fas	0	0	0,145192	0
2021	Mısır	0	0,049467	0,149136	0,002643
2021	Türkiye	0	0,028747	0,704733	0,022696
2020	Çin	1	1	1	1
2020	Hindistan	0	0,014913	0	0,153862
2020	Güney Afrika	0	0,015669	0,421216	0,02063
2020	Brezilya	0	0,000893	0,592546	0,030345
2020	Rusya	0	0,390351	0,940482	0,002585
2020	Fas	0	0,000756	0,156078	0

2020	Mısır	0	0	0,183945	0,003434
2020	Türkiye	0	0,020686	0,771904	0,023025
2019	Çin	1	1	0,882628	1
2019	Hindistan	0	0,003333	0	0,168976
2019	Güney Afrika	0	0,007192	0,477568	0,020434
2019	Brezilya	0	0,002005	0,74293	0,019406
2019	Rusya	0	0,150633	1	0,002653
2019	Fas	0	0	0,155964	0
2019	Mısır	0	0,00218	0,098023	0,00447
2019	Türkiye	0	0,010124	0,762705	0,025731

Ek D.2: Normalleştirilmiş Veri Matrisi 2 (Değerler 0 ile 1 arasında değişmektedir; burada 1, o yıl için o kategorideki en iyi performansı temsil etmektedir)

Yıl	Ülke	Kurulu Rüzgâr Kapasitesi (MW)	Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)	Politik İstikrar (Yüzdelik Sıralama: 0–100)	Hükümet Etkinliği (Yüzdelik)	Düzenleyici Kalite (Yüzdelik)	Yolsuzluğun Kontrolü (Yüzdelik Sıralama: 0–100)
2023	Çin	1	1	0,714286	1	0,679058	1
2023	Hindistan	0,097561	0,118581	0,485835	0,879983	0,901309	0,670631
2023	Güney Afrika	0,003731	0,004496	0,456902	0,300042	0,827225	0,780248
2023	Brezilya	0,062112	0,131057	0,914406	0,120017	0,715969	0,48759
2023	Rusya	0,001631	0,036288	0	0	0	0
2023	Fas	0	0	1	0,5	1	0,451138
2023	Mısır	0,000205	0,00179	0,200121	0,329941	0,370419	0,231644
2023	Türkiye	0,022488	0,037498	0,02833	0,319975	0,814921	0,5
2022	Çin	1	1	0,809692	1	0,624967	1
2022	Hindistan	0,110789	0,138223	0,523978	0,877767	1	0,717858
2022	Güney Afrika	0,004404	0,005883	0,35689	0,5	0,825073	0,692308
2022	Brezilya	0,062032	0,150108	0,880868	0,122233	0,812616	0,37184
2022	Rusya	0,001811	0,046125	0,023725	0	0	0
2022	Fas	0	0	1	0,555582	0,950172	0,576787
2022	Mısır	0,000233	0,002254	0,047451	0,199953	0,300027	0,230769

2022	Türkiye	0,026997	0,045315	0	0,42228	0,800159	0,448763
2021	Çin	1	1	0,833417	1	0,428571	1
2021	Hindistan	0,117876	0,141737	0,547703	0,647733	0,971789	0,688301
2021	Güney Afrika	0,003127	0,006102	0,428571	0,386396	1	0,935097
2021	Brezilya	0,060135	0,154171	0,976275	0	0,857143	0,402782
2021	Rusya	0,001478	0,052084	0,500252	0,227208	0	0
2021	Fas	0	0	1	0,28401	0,828932	0,519498
2021	Mısır	0,000516	0,002583	0,142857	0,022673	0,085834	0,194982
2021	Türkiye	0,027902	0,048843	0	0,352267	0,914766	0,545405
2020	Çin	1	1	0,586257	1	0,587215	0,986289
2020	Hindistan	0,134025	0,147065	0,241594	0,802437	0,69589	0,736289
2020	Güney Afrika	0,005592	0,006724	1	0,481462	1	1
2020	Brezilya	0,057849	0,164893	0,706871	0	0,739269	0,541715
2020	Rusya	0	0,057925	0,396564	0,370495	0,152055	0
2020	Fas	0,001744	0	0,810307	0,308789	0,847945	0,569428
2020	Mısır	0,001548	0,002703	0	0,037075	0	0,138856
2020	Türkiye	0,028072	0,051175	0,034722	0,320975	0,869863	0,666569
2019	Çin	1	1	1	1	0,59988	0,656168
2019	Hindistan	0,178172	0,165701	0,333216	0,609452	0,757049	0,687336
2019	Güney Afrika	0,009519	0,006276	0,933216	0,599606	1	1
2019	Brezilya	0,073359	0,187117	0,383039	0,046603	0,814337	0,51542
2019	Rusya	0	0,067021	0,566431	0,406301	0,357229	0
2019	Fas	0,00535	0	0,8	0	0,742951	0,578084
2019	Mısır	0,004907	0,0032	0,083039	0,015425	0	0,156168
2019	Türkiye	0,035679	0,054417	0	0,343617	0,914217	0,625

Ek E: Ağırlıklı Toplam Hesaplaması ve Nihai Skorlar

Her ülke için nihai skor, normalleştirilmiş skorun (rij) Ek B'de türetilen kriter ağırlığıyla (wi) çarpılması ve sonuçların toplanmasıyla hesaplanmıştır.

Ek E.1: Ağırlıklı Skor Hesaplaması 1

Yıl	Ülke	Hidrojen Üretim Projeleri (Sayı)	Hidrojen İhracatı (1000 USD)	Kişi başına GSYİH (cari USD)	Güneş Enerjisi Kurulu Kapasitesi (MW)
2023	Çin	0,196763	0,029155	0,026126	0,177055
2023	Hindistan	0,021863	0,005015	0	0,02095
2023	Güney Afrika	0	0,010222	0,008755	0,00152
2023	Brezilya	0,021863	0,002377	0,019673	0,010615
2023	Rusya	0	0	0,029155	0,000339
2023	Fas	0	0	0,003111	0
2023	Mısır	0	0,006169	0,002322	0,000268
2023	Türkiye	0	0,00698	0,026512	0,003011
2022	Çin	0,196763	0,029155	0,023336	0,177055
2022	Hindistan	0,056218	0,000684	0	0,028233
2022	Güney Afrika	0,028109	0,000744	0,009173	0,00247
2022	Brezilya	0,056218	0,001035	0,015232	0,011136
2022	Rusya	0,028109	0,003455	0,029155	0,000434
2022	Fas	0	0	0,002434	0
2022	Mısır	0,028109	0,00018	0,004143	0,000393
2022	Türkiye	0	0,001041	0,018292	0,00387
2021	Çin	0,196763	0,029155	0,029155	0,177055
2021	Hindistan	0,049191	0,000187	0	0,028403
2021	Güney Afrika	0	0,000438	0,012606	0,00316
2021	Brezilya	0,049191	0,000425	0,015697	0,007894
2021	Rusya	0	0,009793	0,02789	0,000432
2021	Fas	0	0	0,004233	0
2021	Mısır	0	0,001442	0,004348	0,000468
2021	Türkiye	0	0,000838	0,020546	0,004018
2020	Çin	0,196763	0,029155	0,029155	0,177055
2020	Hindistan	0	0,000435	0	0,027242
2020	Güney Afrika	0	0,000457	0,01228	0,003653
2020	Brezilya	0	2,6	0,017276	0,005373
2020	Rusya	0	0,011381	0,02742	0,000458
2020	Fas	0	2,2	0,00455	0
2020	Mısır	0	0	0,005363	0,000608

2020	Türkiye	0	0,000603	0,022505	0,004077
2019	Çin	0,196763	0,029155	0,025733	0,177055
2019	Hindistan	0	9,72	0	0,029918
2019	Güney Afrika	0	0,00021	0,013923	0,003618
2019	Brezilya	0	5,84	0,02166	0,003436
2019	Rusya	0	0,004392	0,029155	0,00047
2019	Fas	0	0	0,004547	0
2019	Mısır	0	6,36	0,002858	0,000791
2019	Türkiye	0	0,000295	0,022237	0,004556

Ek E.2: Ağırlıklı Skor Hesaplaması 2

Yıl	Ülke	Kurulu Rüzgâr Kapasitesi (MW)	Toplam Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)	Politik İstikrar (Yüzdelik Sıralama: 0–100)	Hükümet Etkinliği (Yüzdelik)	Düzenleyici Kalite (Yüzdelik)	Yolsuzluğun Kontrolü (Yüzdelik Sıralama: 0–100)
2023	Çin	0,111489	0,187866	0,036712	0,093986	0,063822	0,029149
2023	Hindistan	0,010877	0,022277	0,024971	0,082706	0,08471	0,019548
2023	Güney Afrika	0,000416	0,000845	0,023484	0,0282	0,077747	0,022743
2023	Brezilya	0,006925	0,024621	0,046998	0,01128	0,067291	0,014213
2023	Rusya	0,000182	0,006817	0	0	0	0
2023	Fas	0	0	0,051397	0,046993	0,093986	0,01315
2023	Mısır	2,28	0,000336	0,010286	0,03101	0,034814	0,006752
2023	Türkiye	0,002507	0,007045	0,001456	0,030073	0,076591	0,014575
2022	Çin	0,111489	0,187866	0,041616	0,093986	0,058738	0,029149
2022	Hindistan	0,012352	0,025967	0,026931	0,082498	0,093986	0,020925
2022	Güney Afrika	0,000491	0,001105	0,018343	0,046993	0,077545	0,02018
2022	Brezilya	0,006916	0,0282	0,045274	0,011488	0,076374	0,010839
2022	Rusya	0,000202	0,008665	0,001219	0	0	0
2022	Fas	0	0	0,051397	0,052217	0,089303	0,016813
2022	Mısır	2,6	0,000423	0,002439	0,018793	0,028198	0,006727
2022	Türkiye	0,00301	0,008513	0	0,039688	0,075204	0,013081
2021	Çin	0,111489	0,187866	0,042835	0,093986	0,04028	0,029149

2021	Hindistan	0,013142	0,026628	0,02815	0,060878	0,091334	0,020063
2021	Güney Afrika	0,000349	0,001146	0,022027	0,036316	0,093986	0,027257
2021	Brezilya	0,006704	0,028963	0,050178	0	0,080559	0,011741
2021	Rusya	0,000165	0,009785	0,025712	0,021354	0	0
2021	Fas	0	0	0,051397	0,026693	0,077908	0,015143
2021	Mısır	5,75	0,000485	0,007342	0,002131	0,008067	0,005684
2021	Türkiye	0,003111	0,009176	0	0,033108	0,085975	0,015898
2020	Çin	0,111489	0,187866	0,030132	0,093986	0,05519	0,028749
2020	Hindistan	0,014942	0,027628	0,012417	0,075418	0,065404	0,021462
2020	Güney Afrika	0,000623	0,001263	0,051397	0,045251	0,093986	0,029149
2020	Brezilya	0,00645	0,030978	0,036331	0	0,069481	0,01579
2020	Rusya	0	0,010882	0,020382	0,034821	0,014291	0
2020	Fas	0,000194	0	0,041648	0,029022	0,079695	0,016598
2020	Mısır	0,000173	0,000508	0	0,003485	0	0,004048
2020	Türkiye	0,00313	0,009614	0,001785	0,030167	0,081755	0,01943
2019	Çin	0,111489	0,187866	0,051397	0,093986	0,05638	0,019127
2019	Hindistan	0,019864	0,031129	0,017126	0,05728	0,071152	0,020035
2019	Güney Afrika	0,001061	0,001179	0,047965	0,056354	0,093986	0,029149
2019	Brezilya	0,008179	0,035153	0,019687	0,00438	0,076536	0,015024
2019	Rusya	0	0,012591	0,029113	0,038187	0,033574	0
2019	Fas	0,000596	0	0,041118	0	0,069827	0,016851
2019	Mısır	0,000547	0,000601	0,004268	0,00145	0	0,004552
2019	Türkiye	0,003978	0,010223	0	0,032295	0,085923	0,018218

Ek E.3: Nihai ATM Skorları (2019-2023)

Yıl	Ülke	SKOR
2023	Çin	0,952122
2023	Hindistan	0,292916
2023	Güney Afrika	0,173932
2023	Brezilya	0,225855
2023	Rusya	0,036493
2023	Fas	0,208637

2023	Mısır	0,091979
2023	Türkiye	0,16875
2022	Çin	0,949152
2022	Hindistan	0,347793
2022	Güney Afrika	0,205155
2022	Brezilya	0,262713
2022	Rusya	0,071239
2022	Fas	0,212163
2022	Mısır	0,089431
2022	Türkiye	0,162699
2021	Çin	0,937732
2021	Hindistan	0,317976
2021	Güney Afrika	0,197285
2021	Brezilya	0,251353
2021	Rusya	0,09513
2021	Fas	0,175374
2021	Mısır	0,030025
2021	Türkiye	0,172671
2020	Çin	0,939539
2020	Hindistan	0,244948
2020	Güney Afrika	0,238059
2020	Brezilya	0,181704
2020	Rusya	0,119635
2020	Fas	0,171729
2020	Mısır	0,014183
2020	Türkiye	0,173065
2019	Çin	0,94895
2019	Hindistan	0,246602
2019	Güney Afrika	0,247445
2019	Brezilya	0,184113
2019	Rusya	0,147481
2019	Fas	0,132939
2019	Mısır	0,015131
2019	Türkiye	0,177725