

**TÜRKİYE'NİN ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİNDE YEŞİL
HİDROJEN POTANSİYELİ**

SERHAT ÖZGÜR AYDIN

MEF ÜNİVERSİTESİ

MAYIS 2023

MEF ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
SİYASET BİLİMİ VE ULUSLARARASI İLİŞKİLER ANABİLİM DALI
ULUSLARARASI GÜVENLİK VE STRATEJİ ÇALIŞMALARI
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TÜRKİYE’NİN ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİNDE YEŞİL
HİDROJEN POTANSİYELİ**

Serhat Özgür AYDIN

ORCID NO: 0009-0009-6238-6694

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa KİBAROĞLU

MAYIS 2023

AKADEMİK DÜRÜSTLÜK BEYANI

Bu çalışmada yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak toplanıp sunulduğunu, çalışmada söz konusu kurallar ve ilkelerin zorunlu kıldığı çerçevede, özgün olmayan tüm bilgi ve belgelere, alıntılama standartlarına uygun olarak referans verilmiş olduğunu beyan ederim.

İsim ve Soy İsim: Serhat Özgür AYDIN

İmza:

ÖZET

TÜRKİYE’NİN ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİNDE YEŞİL HİDROJENİN POTANSİYELİ

Serhat Özgür AYDIN

Uluslararası Güvenlik ve Strateji Çalışmaları Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa KİBAROĞLU

Mayıs 2023, 89 Sayfa

Türkiye fosil enerji kaynakları itibarıyla ithal bağımlılığı olan bir ülkedir. Bu bağımlılık ülkenin ekonomik kaynaklarının önemli bir kısmının enerji maliyetlerine ayrılmasına neden olmaktadır. Düzenli büyüyen ekonomisi, nüfus artışının devam etmesi, dış göç alması gibi unsurlar da hesaba katıldığında ülkenin enerji ihtiyacının artarak devam edeceği açıktır. Buna karşın ülkenin yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik ve jeotermal gibi alanlarda çok önemli bir potansiyeli bulunmaktadır. Ancak bu kaynakların mevsimsel ya da dönemsel üretim yapabilmesi ve depolama, nakliye gibi sıkıntıları bulunmaktadır. Bu sebeple yine bu yenilenebilir kaynaklardan üretilen, çevre dostu yeşil hidrojen ve yeşil hidrojen türevi amonyak gibi ürünler enerji taşıyıcısı olarak alternatif olabilir.

Söz konusu tez yeşil hidrojenin ülkenin enerji güvenliği, ekonomik güvenlik, çevre güvenliği ve hatta gıda güvenliğine önemli bir katkı yapabileceğini, bu bağlamda dünyadaki gelişmeleri de değerlendirerek tartışacaktır.

Anahtar Kelimeler: Enerji arz güvenliği, enerjide ithal bağımlılık, yenilenebilir enerji kaynakları, yeşil hidrojen

Bilim Dalı Sayısal Kodu: 114111

ABSTRACT

THE POTENTIAL OF CLEAN HYDROGEN IN TURKEY'S ENERGY SUPPLY SECURITY

Serhat Özgür AYDIN

MA in International Security And Strategic Studies

Thesis Advisor: Prof. Dr. Mustafa KİBAROĞLU

May 2023, 89 Pages

Türkiye is an import dependent country on fossil energy sources. This dependency causes the important part of country's economic sources to allocate to energy costs. It is clear that the country's energy needs will continue to increase in view of factors such as its regularly growing economy, continuing population growth and having foreign. On the other hand, the country has a very important potential in renewable energy sources like solar energy, wind energy, hydroelectric and geothermal. Nevertheless, these resources have problems like seasonal or periodical production and storage and transportation. Therefore, products such as climate friendly green hydrogen and/or green hydrogen derivative ammonia that are produced from these renewable resources might be alternative as energy carriers.

The thesis will discuss whether green hydrogen can make a significant contribution to the country's energy security, economic security, environmental security and even food security, by evaluating the developments in the world in this context.

Keywords : Energy supply security, energy import dependency, renewable energy sources, green hydrogen..

Numeric Code of the Field: 114111

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
GİRİŞ	1
BÖLÜM 1. ENERJİ GÜVENLİĞİ, EKONOMİK GÜVENLİK VE ÇEVRE GÜVENLİĞİ	4
1.1. Güvenlik Kavramı	4
1.2. Enerji Güvenliği	4
1.3. Ekonomik Güvenlik	7
1.4. Çevre Güvenliği	9
BÖLÜM 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	10
2.1. Güneş Enerjisi	11
2.1.1. Güneş Pilleri.....	11
2.1.2. Yoğunlaştırılmış Güneş Pilleri	12
2.2. Rüzgar Enerjisi.....	12
2.3. Jeotermal Enerji	13
2.4. Hidroelektrik	13
2.5. Okyanus Enerjisi	15
2.6. Bio Enerji.....	16
BÖLÜM 3. ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN	17
3.1. Hidrojen Nasıl Üretilir?	22
3.1.1. Termal Süreçler	22
3.1.2. Elektrolitik Süreçler.....	23
3.1.3. Fotolitik Süreçler	24
3.1.4. Hidroliz Süreçler	24
3.1.5. Biyolojik Süreçler.....	25
3.2. Hidrojenin Depolanması ve Nakliyesi	25
3.2.1. Hidrojenin Depolanması	26

3.2.2. Hidrojenin Boru Hatları ile Nakli.....	27
3.2.3. Hidrojenin Deniz Yoluyla Taşınması.....	27
3.3. Hidrojenin Güçlü ve Zayıf Yönleri.....	28
3.4. Hidrojen Konusunda Engeller.....	30
BÖLÜM 4. YEŞİL HİDROJENE GEÇİŞ AŞAMALARI.....	32
4.1. Mavi Hidrojen.....	32
4.2. Sıvı Hidrojen ve Amonyak.....	33
4.3. Doğal Gaz Şebekesine Karışım.....	34
BÖLÜM 5. ENERJİ KAYNAKLARININ KÜRESEL DAĞILIMI, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ETKİLERİ.....	37
5.1. İklim Değişikliği Hedefleri Doğrultusunda Yenilenebilir Enerji Kaynakları	45
5.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Konusunda Engeller.....	47
5.3. Dünyada Hidrojen.....	48
5.3.1. Japonya.....	49
5.3.2. Çin.....	50
5.3.3. Almanya.....	51
5.3.5. Avrupa Birliği.....	52
5.3.6. Güney Kore.....	53
BÖLÜM 6. TÜRKİYE’NİN TEMİZ HİDROJEN POTANSİYELİ VE ENERJİ GÜVENLİĞİ KARŞISINDAKİ DURUMU.....	54
6.1. Türkiye’nin Enerji Güvenliği ve Politikaları.....	55
6.2. Türkiye’de Enerji Kaynakları ve İthal Bağımlılık.....	56
6.3. Türkiye’de Fosil Yakıtlara Bağımlılığın Çevresel Etkisi.....	61
6.4. Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli.....	63
6.5. Türkiye’nin Temiz Hidrojen Potansiyeli.....	64
6.6. Türkiye’nin Temiz Hidrojenin Kullanım Alanları ve Sektörel Bazda Temiz Hidrojen.....	66
6.6.1. Sanayi.....	67
6.6.2. Ulaştırma/Nakliye.....	68
6.6.3. Binalar.....	69
6.7. Türkiye’nin Yeşil Hidrojen İhracat Potansiyeli.....	70
6.8. Türkiye’de Yeşil Hidrojen Konusunda Güncel Gelişmeler.....	72
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	74
KAYNAKÇA.....	79

TABLÖLÄR LİSTESİ

Tablo 1	: Küresel Kaynak Bazında Toplam Enerji Tüketim, 1971-2019 (EJ).....	37
Tablo 2	: Doğal Gaz Net İthalatçı Ülkeler 2020 Yılı Geçici Veri.....	57
Tablo 3	: Kömür Net İthalatçı Ülkeler 2020 Yılı Geçici Veri	58
Tablo 4	: Yıllara Göre Doğal Gaz Piyasası Genel Görünümü, 2016-2021	59
Tablo 5	: 2011-2021 Yılları Doğal Gaz İthalat Miktarları.....	59
Tablo 6	: Türkiye Sera Gazı Emisyon Miktarları, 1990-2020 (Milyon Ton Karbondiyoksit Eşdeğeri)	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1	: Yıllar içinde ham petrol fiyatları (1950-2023)	7
Şekil 2	: Kaynak Bazında Küresel Enerji Tüketimi, 1971 (EJ)	38
Şekil 3	: Kaynak Bazında Küresel Enerji Tüketimi, 2019 (EJ)	38
Şekil 4	: Kaynak Bazında Küresel Enerji Arzı, 1971-2019 (EJ).....	39
Şekil 5	: Bölgeler Bazında Küresel Gaz Üretimi 1971-2020 (bcm).....	40
Şekil 6	: Bölgeler Bazında Küresel Ham Petrol Üretimi 1971-2020 (Mt)	41
Şekil 7	: Bölgeler Bazında Küresel Kömür Üretimi 1971-2020 (Mt)	42
Şekil 8	: Kişi başına karbon dioksit emisyonları, 1990-2019 (Kişi başına metrik ton) Dünya Bankası verisi.....	43
Şekil 9	: Yakıt Bazlı Dünya Karbondioksit Salınımları, 1971-2020 (Mt).....	44
Şekil 10	: Karbondioksit Salınımında Yakıtların Payı-1973 (Mt)	44
Şekil 11	: Karbondioksit Salınımında Yakıtların Payı-2019 (Mt)	45
Şekil 12	: Türkiye Enerji Talebinin Dışa Bağımlılık Oranı, 1990-2020	60
Şekil 13	: Türkiye Ülke Bazında Doğal Gaz İthalatı, 2021	61
Şekil 14	: Sektörlere Göre Sera Gazı Emisyon Oranları, 2020.....	61
Şekil 15	: Türkiye Toplam Sera Gazı Emisyonları	62

KISALTMALAR LİSTESİ

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BCM	: Milyar metre küp
BM	: Birleşmiş Milletler
EJ	: Ekzajul
GAZBİR	: Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
GAZMER	: Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği GAZBİR'in Teknik Merkezi
GJ	: Gigajul
GT	: Gigaton
GW	: Gigavat
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (International Renewable Energy Agency)
KM	: Kilometre
Kw	: Kilovat
Kwh	: Kilovat-saat
Mt	: Milyon Ton
Mtep	: Milyon Ton Petrol Eşdeğeri
MW	: Megavat
ODKA	: Ortadoğu ve Kuzey Afrika (MENA)
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
PJ	: Petajul
PV	: Fotovoltaik
TANAP	: Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı Projesi
TAP	: Trans Adriyatik Boru Hattı Projesi
TCMB	: Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
Tüpraş	: Türkiye Petrol Rafineleri A.Ş.
TWh	: Teravat Saat

GİRİŞ

Türkiye, artan nüfusu ve büyüyen ekonomisi ile enerji ihtiyacı her geçen gün artan bir ülkedir. Enerji konusunda kendi kendine yeten bir ülke olmayan Türkiye'nin kullandığı enerji kaynaklarının ağırlığı (petrol, doğal gaz ve kömür gibi) fosil yakıtlardan oluşmakta ve bu kaynakları ithal etmek zorunda kalmaktadır. Fosil yakıtların fiyatlarının değişkenliği gerek enerji güvenliği gerekse ekonomik güvenlik alanında sıkıntılara yol açabilmektedir. Öte yandan iklim değişikliği tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de önem kazanan bir konu olarak ortaya çıkmıştır. Buna paralel olarak fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, bunların teşvik edilmesi ve yeni kaynaklar yaratılması alanında çalışmalar hızlanmıştır. Özellikle 24 Şubat 2022 tarihinde Rusya'nın Ukrayna'ya saldırması sonrası enerji güvenliği konusu tüm dünyada gündemin ön sıralarına tırmanmış ve Avrupa Birliği içinde yer alan ve enerji konusunda Rusya Federasyonu'na bağımlı ülkeler bu bağımlılıktan hızlı şekilde kurtulabilmek için adımlar atılması gerektiğine karar vermişlerdir. Tüm bu gelişmeler, son yıllarda üzerinde değerlendirmelerin ve akademik çalışmaların yapıldığı ve evrende en fazla bulunan element olan hidrojenin, özellikle de temiz hidrojenin tüm dünya tarafından ilgi odağına yerleşmesine neden olmuştur. Bu çalışma, Türkiye'de temiz hidrojenin potansiyelini ortaya koyarak, temiz hidrojenin ülkenin ekonomik güvenliğine, enerji güvenliğine ve iklim güvenliğine önemli bir katkı sağlayabileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çalışma, nitel araştırma deseninde veri toplama aracı olarak doküman analizi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Doküman analizi, basılı ve elektronik belgeler olmak üzere konu ile ilgili bütün belgelerin incelendiği ve değerlendirildiği ve konunun anlamı ve önemi ile ilgili çıkarımlarda bulunmak, konu ile ilgili bir anlayışı geliştirmek ve ampirik bilgilere kaynak olacak verilerin incelenmesi ve yorumlanması için kullanılan bir yöntemdir (Corbin & Strauss, 2008). Bu çalışmada da temiz hidrojenin Türkiye'deki potansiyelini ortaya çıkarmak ve temiz hidrojenin ekonomik, enerji ve iklim güvenliği açısından katkılarını ortaya çıkaracak verileri gözler önüne serme amaçlandığından doküman analizi yöntemi tercih edilmiştir. Konu ile ilgili yerli ve yabancı literatürde yer alan akademik eserler dışında Uluslararası Enerji Ajansı, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Dünya Enerji Konseyi, Hidrojen Teknolojileri Derneği ve SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi gibi ulusal ve

uluslararası organizasyonlar ve toplulukların raporları ve çalışmalarından yoğun olarak faydalanılmıştır. Bu çalışmada konu ile ilgili basın yayın organlarında çıkmış makaleler ve değerlendirmeler de yer almaktadır. Ayrıca çalışmada yukarıda sözü edilen organizasyonlar ve toplulukların yanı sıra Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB), Avrupa Birliği (AB) gibi bazı kurumların da çok sayıda grafik, tablo ve verileri kullanılarak çalışmaya rakamsal verilerle katkı da sağlanmaya çalışılmıştır.

Dünyada hızla artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik ilerlemeler enerji ihtiyacını her geçen gün artırmaktadır. Günümüzde bu ihtiyacın büyük kısmı sera gazları salınımına yol açan doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtların iklime ve canlı hayatlarına olumsuz etkisi konusundaki küresel farkındalık yenilenebilir enerji kaynaklarına bir ilgi oluşturmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, ekonomik hale getirilmesi ve fosil yakıtları olabildiğince fazla ikame etmesi gezegenimizin geleceği açısından kritik önem taşımaktadır. Ancak küresel ekonomik yapıda fosil yakıtlara olan bağımlılık ve maliyet kısıtları hızlı bir dönüşümün önüne geçmektedir.

Dünyada fosil enerji kaynaklarına sahip ülkeler bu durumu ithalatçı ülkelere karşı bir kaldıraç olarak kullanabilmektedirler. Enerji kaynakları olmayan veya sınırlı olan ülkeler ekonomik anlamda ciddi sıkıntılar çekebilmekte ve enerji ithal ettikleri ülkeye karşı siyasi olarak daha çekinik olabilmektedirler. Buna karşın sürdürülebilir enerji kaynaklarına sahip ülke sayısı çok daha fazladır.

Türkiye ekonomik olarak hızlı büyüyen aynı zamanda da nüfusu büyüyen bir ülke olarak yoğun şekilde enerjiye ihtiyaç duymaktadır ve bu ihtiyacının büyük kısmını ithal etmektedir. Bu durum ithalat yapılan ülkelerle karşılaşılacak olası bir anlaşmazlıkta Türkiye açısından bir dezavantaja yol açabilecektir. Ayrıca ekonomik kaynaklardan önemli bir oranını enerji ithalatı için kullanmak zorunda kalmaktadır. Bu durum dış ticaret açığına da yol açmaktadır. Öte yandan kullanılan fosil yakıtlar sera gazı emisyonları ile çevresel bir tehdit de oluşturmaktadır. Buna karşın Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça zengin bir konumdadır. Türkiye'nin gerek güneş, gerek rüzgâr enerjisi, gerekse hidro enerji anlamında şanslı bir ülke olduğu rahatça söylenilebilir. Bu bağlamda yeşil hidrojen konusunda da önemli bir potansiyele sahip olan Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki potansiyelini ve

yeşil hidrojendeki potansiyelini kullandığı takdirde uzun vadede ithal bağımlılığında önemli ölçüde kurtulup ihracatçı bir pozisyona geçecektir. Bu tezin amacı bu potansiyelin ortaya konmasına veriler ışığında bir katkı sunabilmektir.

Tezin araştırma soruları olarak, aşağıdaki sorulara cevaplar bulunması ve enerji güvenliği literatüründe alternatif kaynaklar ve yenilenebilir kaynaklar konusunda da literatüre katkıda bulunulması amaçlanmaktadır

- Hidrojen, özellikle de temiz hidrojen, bir enerji kaynağı mıdır ve diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında nasıl bir konuma sahiptir? Hidrojen çeşitleri nelerdir?
- Temiz hidrojenin son yıllarda gündeme gelmesinin ekonomik, siyasi ve bilimsel sebepleri nelerdir? Fosil yakıtların, yenilenebilir enerji kaynakları ve hidrojen ile olan ilişkileri nelerdir?
- Dünyanın hidrojen konusunda duruşu nedir ve ne gibi çalışmalar yapılmaktadır?
- Dünyadaki gelişmeler ve eğilimler karşısında Türkiye nerede durmaktadır ve potansiyeli nedir?
- Temiz hidrojenin Türkiye’de kullanımını ne şekilde ekonomik, politik ve çevresel etkilere yol açabilir?
- Temiz hidrojen konusunda Türkiye’nin kısa, orta ve uzun vadeli planları neler olmalı ve konuyla ilgili sorunlar nasıl aşılmalıdır?

Çalışma, Türkiye’nin yenilenebilir enerji potansiyeli, uygun enerji altyapısı ve nitelikli işgücü ile beraber temiz hidrojenle önemli bir potansiyele sahip olduğunu, bu potansiyelin Türkiye’nin enerji güvenliği, ekonomik güvenlik ve çevre güvenliğine önemli katkı yapabileceğini varsaymaktadır. Hidrojen teknolojilerinde gelişmeler ve bu alana yatırımlar sonrası ülkenin coğrafi konumunun, ekonomik, siyasi ve kültürel bağlarının da etkisi ile Avrupa için ihracatçı bir konuma dahi ulaşabileceği tezin bir diğer varsayımıdır.

BÖLÜM 1. ENERJİ GÜVENLİĞİ, EKONOMİK GÜVENLİK VE ÇEVRE GÜVENLİĞİ

1.1. Güvenlik Kavramı

Geleneksel olarak güvenlik kavramından söz edildiğinde akla askeri güvenlik ve bir devletin sınırlarını koruması anlamında güvenlik gelmektedir. Güvenlik kavramı özellikle 70'lerin sonundan itibaren genişleme eğilimi göstermiştir. Çevresel kaygılar ve ekonomik güvenlik fikri daha fazla güvenlik kavramına dahil olmuştur. Enerji kaynaklarına ilişkin güvenlik de genişleme sürecinde buna eklenmiştir (Ullman, 1983). 1973 petrol krizi sırasında petrolün varil fiyatının hızlı artışı sonrası Avrupa ülkelerinde tüketicilerin hükümetlere baskı yaptığı görülmüştür. Arap Ham petrol fiyatı Ekim 1973'de varil başına 3 Dolar iken Ocak 1974'de varil başına 11,65 Dolara yükselmiştir. Bu durum, Batı'da ani enflasyon, ekonomik durgunluk ve bunun sonucu olarak da işsizlik artışına yol açmıştır (Haghighi, 2007, s. 54). Gerek 1973 yılında gerekse 1974 yılında petrol fiyatlarının Arap Ülkelerinin ağırlığı bulunan Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) örgütü tarafından ciddi oranlarda artırılması enerji güvenliği risklerini artırmıştır. Hatta bu dönemde Batılı ülkeler, Ekonomik OECD'ye alternatif olarak Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nı, ambargo vb. risklerden korunmak amacıyla kurmuşlardır (Çelikpala, 2014, s. 81). Günümüzde artık enerji güvenliği kavramı, ekonomik ve siyasi ayakları da bulunan ve enerji altyapısının da güvenliğini içeren daha geniş bir çerçeveye oturtulmaktadır (Çelikpala, 2014, s. 82).

Enerji konusunda ithal bağımlılığı olan devlet/devletler ihracatçı olan devletin/devletlerin enerji üzerinden uygulayabileceği ambargo, fiyat artışı vb durumlara karşı zayıf durumdadır. Yani burada iki egemen güç arasında asimetric bir ilişki, ithalatçı olanın ihracatçı olana karşı zaaf içinde olduğu bir ilişki söz konusudur (Bilgin, 2012, s. 29).

1.2. Enerji Güvenliği

Enerji güvenliği kavramı, herkes tarafından kabul edilen bir tanıma sahip değildir. İlgili tarihsel döneme ve bulunulan coğrafyaya göre farklı anlamlar ifade edebilmektedir. Enerji ve güvenlik kavramları beraber değerlendirildiğinde ülkeler

açısından dışa olabildiğince az bağımlı olmanın, kendi kaynakları ile kendi ihtiyaçlarını karşılayabilmenin aynı zamanda siyasi bağımsızlık ve ülkenin güvenliği anlamına geldiği düşüncesi yaygındır (Kıbaroğlu, 2004, s. 2). Enerji güvenliği bir ülke için çevresel kaygılar gözeterek, uzun vadeli sözleşmeler yoluyla ithalatın garantilenmesi olabilirken, başka bir ülke için enerji ihtiyacının tamamen kendi kaynakları ile sağlanması olabilir. Doğalgaz ithalatçısı bir ülke arzı garantiye alabilmek adına alternatif kaynaklar veya alternatif tedarikçiler yaratmaya çalışabilir (Hatipoğlu, 2019, s. 1).

B. W. Ang, W. L. Choong, T. S. Ng (2015) enerji güvenliği kavramını enerjiye erişilebilirlik, enerji altyapısı, fiyatlar, toplumsal etki, çevresel etki, enerji yönetimi ve verimliliği kavramları üzerinden değerlendirmektedir (B.W.Ang, 2015, s. 1081).

D. Yergin (2006) ise enerji güvenliği kavramını gelişmiş ülkeler için uygun fiyatlarla enerji kaynaklarına ulaşım (Yergin, Ensuring Energy Security, 2006, s. 70) olarak tarif ederken farklı ülkeler adına enerji güvenliğinin farklı manalara geldiğini, örneğin enerji ihracatçısı ülkeler için talep güvenliği ile enerji güvenliğinin aynı anlama geldiği şeklinde bir tanımlamada bulunmaktadır (Yergin, Ensuring Energy Security, 2006, s. 71).

Asya Pasifik Enerji Araştırmaları Merkezi enerji güvenliğini mevcudiyet, erişilebilirlik, ekonomiklik ve sosyal kabul edilebilirlik maddeleri üzerinden açıklamaktadır.

Mevcudiyet: iki boyutu bulunmaktadır. Fosil kaynaklar her coğrafyada bulunmamaktadır. Buldukları coğrafyalarda da bu kaynaklara ulaşmak hem önemli bir teknoloji hem de yatırım gerektirmektedir. Yenilenebilir kaynaklar ise teorik olarak sonsuz enerji kaynaklarıdır ancak dönemsel yahut mevsimsel sınırlılıkları bulunmaktadır. Ancak bu kaynakların depolanması maliyet ve teknoloji anlamında zordur ve bu durum bu kaynaklara dayalı olabilecek ülkelerin enerji güvenliklerini riskli hale getirebilmektedir (Hatipoğlu, 2019, s. 2).

Erişebilirlik: Bir enerji kaynağının varlığı onun kullanılabilir olduğu anlamında gelmemektedir. Bir kaynağı çıkarmak çok maliyetli olabilir yahut çıkarılması uygun maliyetli olsa dahi nakledilmesi problemlidir. Ülkeler arası

çatışmalar yahut bir ülkenin kendi içerisindeki çatışmalar tedarik zincirini tehlikeye sokabilir. Örneğin Suudi Arabistan İran arası gerilimler dünya petrol trafiğinin 1/5'inin geçtiği Hürmüz boğazını trafiğe kapatabilir. Aynı şey dünya petrol trafiğinin %30'nun geçtiği Güneydoğu Asya'daki Malaka Boğazı civarında da olabilir. Nijerya petrolünün üretildiği bölgedeki bulunan isyancı gruplar tedarike sekte vurmaktadır. Öte yandan doğa olayları da tedarik zincirine sekte vurabilmektedir. Örneğin 2005 yılındaki Katrina kasırgası petrol tedarikine o dönemde zarar vermiştir (Hatipoğlu, 2019, s. 3).

Ekonomiklik: Enerji herhangi bir ülkenin ekonomisi açısından temel girdidir. Ekonomi dışında konutlarda ve elektrik üretiminde de kullanılmaktadır. Bu sebeple kaynakların uygun fiyatlı olması ilgili ülke açısından çok önemlidir. Enerji piyasalarında küresel anlamdaki oynaklık bu bağlamda güvenlik sorunu haline gelebilmektedir. Örneğin 1973 petrol krizi kaynak sahibi olmayan ülkelerde panik yaratmıştır. Hatta batılı ülkelerde petrol üretici ülkelerdeki otokratik rejimlere daha yumuşak tavır alınmasına yol açmıştır (Hatipoğlu, 2019, s. 4). Suudi Arabistan örneğinde, ABD ile ilişkilerinin temelini Şubat 1945'de başkan Roosevelt ile Kral İbn Saud arasında yapılan görüşmeye kadar geri gittiği görülmektedir. Truman'dan itibaren Suudi Arabistan petroleri "ulusal çıkar" olarak görülmeye başlanmıştır. Öyle ki Carter doktrini "Basra Körfezine yönelecek bir çabanın ABD'nin hayati çıkarlarına saldırı kabul edileceğini belirtmektedir. İlişkilerin giriftliğinin bir diğer örneği ise 70'li yılların ikinci yarısında Suudi kabinesinde ABD'de doktora sahibi kişi sayısının ABD kabinesinden daha fazla olmasıdır (Yergin, *The Quest, Energy, Security, and The Remaking of the Modern World*, 2011, s. 320) ABD'nin bu bağlamda Suudi Arabistan'daki demokratik olmayan rejimin uygulamalarına göz yumduğu söylenebilir.

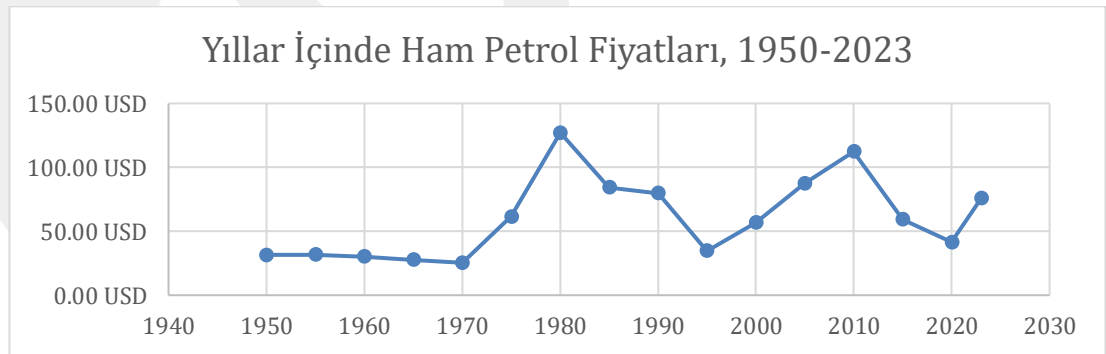
Öte yandan fiyat düşüşleri de tedarikçi ülke açısından ekonomik güvenlik riski yaratmaktadır (Hatipoğlu, 2019, s. 4).

Karbon emisyonu da ekonomiklik anlamında bir başka maddedir. Avrupa Birliği, karasularına girecek tankerlerin karbon ve sülfür emisyonlarına kısıtlama getirmiştir. Bu durumda daha kısıtlı sayıda tankerin bu özelliklere sahip olmaları, tankerlerin kiralarını yükseltmiştir. Dolayısıyla enerji arz maliyeti ve enerji güvenliği etkilenmektedir (Hatipoğlu, 2019, s. 6).

Sosyal kabul edilebilirlik: Enerji kaynaklarının elde edildikleri ve iletildikleri rotalar toplumsal hayat üzerinde önemli etkilerde bulunabilmektedirler. Çernobil ve Fukuşima felaketleri bu ülkelerde, hatta tüm dünyada nükleer enerjiye karşı soru işaretlerine yol açmıştır. Bu durumun toplumsal dokuyu bozucu etkileri de olabilmektedir. Bakü-Tiflis-Ceyhan hattının inşasında çalışan Gürcü köylüleri ciddi gelirler elde ederken, bu hatlarda çalışmayanlar ile aralarında gelir uçurumu oluşmuştur. Öte yandan bu tip projeler nitelikli personel ihtiyacı duyduğu için, nitelikli personelin bu alanlarda istihdamı diğer sektörlerde nitelikli personel açığına yol açmıştır (Hatipoğlu, 2019, s. 6).

1.3. Ekonomik Güvenlik

Küresel ekonominin fosil yakıtlara bağlı olması ekonomik güvenliğini de tehdit etmektedir. Fosil yakıt fiyatlarındaki değişimler bu enerji kaynağına sahip olmayan ülkelerin zayıf karnı durumundadır. Fiyatlardaki yükselmeler ciddi maliyet artışlarına, işten çıkarmalara ve üretim düşüşlerine yol açabilmektedir. Ayrıca bu ülkelerin ithalatlarında fosil yakıtlar önemli bir pay almakta hatta cari açığa yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra Tablo 1’de görülebileceği gibi ham petrol fiyatlarındaki yüksek volatiliteler ileriye yönelik öngöründe bulunmayı da zorlaştırmakta, bu da örneğin bütçe hazırlanması gibi mali ve iktisadi konularda sorunlara yol açabilmektedir.



Şekil 1: Yıllar içinde ham petrol fiyatları (1950-2023)

(Macrotrends, (2023))

Şekil 1, yakından incelendiğinde 1973 Petrol Krizinde petrol varil fiyatlarının 1 aylık sürede %100 fazla arttığı grafiksel olarak gösterilmektedir. Benzer bir durum 1979’da da görülmüştür. Bu durum ithalatçı ülkelerde panik havasına yol açmıştır.

Fosil yakıtlar siyasi bir enstrümana dönüşebilmektedir. Örneğin petrol fiyatları uzun yıllardır iyi ilişkiler içinde olan Suudi Arabistan-Amerika Birleşik Devletleri (ABD) arasında gerginliğe yol açmış ve Beyaz Saray yetkililerinin Suudi Arabistan'ı Rusya-Ukrayna savaşında Rusya'yı destekledikleri ve ABD'ye karşı cephe aldıkları şeklinde suçlamalarına yol açmıştır (Mazzetti , Wong, & Entous, 2022). Doğa olayları da geçici veya uzun vadeli riskler oluşturabilmektedir.

Türkiye için enerji güvenliği, enerji ithalatçısı bir ülke olması sebebiyle enerji arzı güvenliği anlamına gelmektedir. Bunun aynı zamanda ekonomik güvenlik boyutu da vardır. Alınan kaynağın en uygun fiyatlarla temininin yanı sıra depolama ve nakliye gibi diğer maliyet kalemleri de ekonomik güvenlik bağlamında önemlidir.

İkinci Dünya Savaşı sonrası yaşanan ekonomik gelişmeler ve şehirleşme süreci ciddi bir enerji ihtiyacı doğurduğu gibi ekosisteme de önemli zararlar vermiştir. Kalkınmada sanayileşmeyi öncelik haline getiren anlayış çevreye ilişkin bir duyarlılık geliştirmemiş, bu da iklim değişikliği ve çevre kirliliği gibi sorunlara yol açmıştır. Ancak özellikle 1970'li yıllardan itibaren ekonomik kalkınmayı öncelikli sayan anlayış değişip “sürdürülebilir kalkınma”ya dönüşmeye başlamıştır. Bu yeni bakış açısı çevrenin sürdürülebilirliği çerçevesinde bir kalkınma anlayışıdır. Dönemin Birleşmiş Milletler Genel Sekreterinin önerisi ve yine dönemin Norveç Başbakanı Brundtland başkanlığında kurulan Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından hazırlanan 1987 Tarihli Brutland (Ortak Geleceğimiz) Raporu sürdürülebilir kalkınmayı “gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini riske atmadan bugünün ihtiyaçlarının karşılanması” şeklinde tarif etmektedir (The World Commission on Environment and Development, 1987, s. 41). Gelişen süreçler hem enerji güvenliği hem de çevre güvenliği kavramlarını öne çıkarmaya başlamıştır.

1.4. Çevre Güvenliği

Günümüzde ekosistemin korunması konusu küresel bir anlayış haline gelmiş, nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojiadaki gelişmeler hava, toprak kirliliğine, kuraklık, küresel ısınma ve aşırı doğa olaylarına yol açarak tüm insanlık için tehdit oluşturmaya başlamıştır. Çevreye ilişkin problemler kitlesel göçler, ekonomik krizler hatta terör olaylarına dahi neden olabilmektedir. Bu nedenle çevresel güvenlik, çevresel bozulmaların, ekstrem iklim olaylarının güvenlik tehdidi oluşturması olarak tanımlanmaktadır.

Barnett'e göre iklim değişikliği ülkenin egemenliği için tehdit oluşturabilmektedir. Örneğin deniz seviyesinin yükselmesi bazı ülkelerde toprak kaybına ve toplu göçlere neden olabilmektedir. Ayrıca ülkenin toplumsal refahındaki düşüşler iç çatışmalara dönüşebilmektedir (Barnett, 2003, s. 3).

Dünya çapındaki tüm iklime ilişkin hedeflere, yapılan konferanslara karşın karbon emisyonları 2018 yılında tarihteki en yüksek noktaya ulaşmıştır. Sadece hava kirliliğinden yılda 3 milyon insan hayatını kaybetmektedir (International Energy Agency, 2019, s. 13). Enerji kaynaklı karbon emisyonları küresel olarak 2021 yılında 36.6 Gt'ye ulaşmıştır. Bu artış tarihteki en büyük yıllık emisyon artışı anlamına gelmektedir (International Energy Agency, 2023, s. 249).

Tüm bu açıklamalar gösteriyor ki “enerji güvenliği”, “çevre güvenliği” ve “ekonomik güvenlik” kavramları birbirine bağlı kavramlardır. Bu anlamda atılabilecek olumlu adımlar her üç alanda da olumlu etki gösterebilecektir.

BÖLÜM 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Birleşmiş Milletler (BM)'e göre yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan sağlanan ve tüketildiğinden daha fazla yenilenen kaynaklardan elde edilen enerjidir (United Nations, (2022)). Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliği fosil yakıtlara nazaran çok çok daha düşük emisyonu açmasıdır. Bu özelliği iklim değişikliği ile mücadelede temel araç olmasını sağlamaktadır. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeo-termal, hidro enerji, okyanus enerjisi ve bio enerjidir (United Nations, (2022)).

Uluslararası Enerji Ajansı 2021 verilerine göre 2020 yılında küresel enerji arzının %80'i halen fosil yakıtlardan karşılanmaktadır ve emisyonların %45'i kömür, %32'si petrol ve %22'si doğal gaz kaynaklıdır (International Energy Agency, 2021). BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ulaşılabilir, ekonomik, güvenilir ve istikrarlı enerji kaynakları bulunması gerekliliğini vurgulamaktadır (Güney, 2019, s. 4).

Yenilenebilir enerji kaynakları dünyaya fosil kaynaklara göre daha dengeli dağılmışlardır, bu durum bu kaynakların ticaretinin daha düşük hacimli olması anlamına da gelmektedir. Yenilenebilir kaynaklar enerji ithalat-ihracatını düşürerek, ülkelerin ekonomilerinin enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar karşısındaki zayıflığını azaltarak enerji güvenliğine katkı yapmaktadır. Ayrıca kaynak çeşitlendirmesine yol açarak yine bu güvenliğe katkı yapmaktadır (Owusu & Sarkodie, 2016, s. 8).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji güvenliği karşısında durumuna bakıldığında bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Teorik olarak güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerji sonsuz enerji kaynaklarıdır ancak reel duruma bakıldığında hepsinde mevsimsel veya dönemsel kısıtlar ve sınırlılıklar olduğu görülmektedir. Güneş battıktan sonra solar paneller ile üretim yapılamaz, su miktarının azaldığı dönemlerde hidroelektrik santralleri çalışmaz yahut rüzgar esmediği dönemlerde bu şekilde enerji üretimi mümkün olmaz. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji kadar bu enerjinin depolanması önemlidir (Hatipoğlu, 2019, s. 2).

2.1. Güneş Enerjisi

Tüm enerji kaynakları arasında en sınırsız olanıdır. Dünyanın güneşten almış olduğu enerji tüm dünyada tüketilenin on bin mislidir. Güneş ışığı ısıtma, soğutma veya yakıt olarak doğrudan kullanılabilir veya güneş panelleri veya aynalar aracılığı ile elektrik üretimi yapılarak kullanılabilir (United Nations, (2022)). Güneş enerjisi için kullanılan teknolojiler geliştikçe maliyetler düşmekte ve bu da küresel anlamda kullanımını artırmaktadır. İki yöntemle üretim yapılmaktadır.

2.1.1. Güneş Pilleri

Güneş ışığını paneller aracılığı ile doğrudan elektriğe dönüştürürler. Bu yöntemle fotovoltaik pil/batarya sistemi denilmektedir. Sistem kabaca fotovoltaik hücre isimli yarı iletken bir maddenin güneş enerjisini doğru akım elektriğine dönüştürmesidir. Silikonun yarı iletken kullanıldığı sistemler günümüzde en yaygın olan fotovoltaik sistemlerdir. Yani, kalın cam benzeri silikon malzemenin panellerde kullanıldığı bir yöntem. Son zamanlarda ise ince film modülü diye adlandırılan, silikon tabanlı olmayan yarı iletken maddelerden oluşan sistemlerde devreye girmiştir. Bu sistemlerin verimi düşük buna karşın maliyeti de düşüktür (Ellaban, Abu-Rub, & Blaabjerg, 2014, s. 752). Fotovoltaik sisteminin önemli avantajları bulunmaktadır. Büyük fabrikalarda üretim yapılabilir olması ölçek ekonomisine olanak sağlamaktadır. Diğer bir önemli özelliği ise yoğunlaştırılmış güneş enerjisinde olmayan bir özellik olan, tam ışığa olmadan da üretim yapabiliyor olmasıdır. Yani hava tam güneşli olmadığı durumlarda dahi bu yöntemle enerji üretilebilmektedir (Ellaban, Abu-Rub, & Blaabjerg, 2014, s. 753). Bu sebeple dünyanın çok fazla güneş almayan coğrafyalarında dahi üretim imkanı vermektedir.

Özellikle son on yılda fotovoltaik pil maliyetlerindeki keskin düşüşler sonrası kullanım yaygınlığı artmıştır..2010 ile 2020 yılları arasında %93 oranında bir maliyet düşüşü görülmüştür. Sadece 2020 yılında toplam kullanım kapasitesi 125 Gigawatt artmıştır ki bu rakam genel toplamda yalnızca bir yılda %17'lik bir artışa karşılık gelmektedir. Kullanım ömürleri ise otuz yıldır. (The International Renewable Energy Agency, 2022). Fotovoltaik sistemin şebeke dahili ve harici kullanımları olabilmektedir. Şebeke harici kullanım avantajı, özellikle az gelişmiş ülkelerde veya

şehir şebekesine ulaşım imkanı olmayan köylerde elektrik kullanımı imkanı sağlamaktadır (Ellaban, Abu-Rub, & Blaabjerg, 2014, s. 753).

2.1.2. Yoğunlaştırılmış Güneş Pilleri

Aynalar aracılığı ile güneş ışığı yoğunlaştırılarak bu ışık ile bir sıvı buharlaşması yoluyla elektrik üretilir. Bu yöntem büyük santrallerde elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntemin pillere göre avantajı ısıyı depolayabilmesi sayesinde güneş battıktan sonra da kullanılabilmesidir (The International Renewable Energy Agency, 2022). Yöntemin fotovoltaik pil yöntemine göre olumsuz yönü ise yoğun güneş ışması gerektirmesidir. Bu da sınırlı bir alanda bu teknolojinin kullanılmasına yol açmaktadır. Bu yöntemde güneş ışınlarını toplayan konsantratör/yoğunlaştırıcı isimli alıcı ile ışınlar bir merkezi noktaya yahut bir odak hat üzerine toplanır. Yoğunlaştırıcı cihaz, güneş ışını etkisini 70 ile 100 kez arasında bir miktarda artırır. Sonra toplanan bu güneş enerjisi bir ısı motoru benzeri bir cihazla, örneğin buhar türbini ile elektrik enerjisine dönüştürülür. (Edenhofer, ve diğerleri, 2011, s. 62).

2.2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi karada, denizde yahut tatlı suda rüzgar tribünleri aracılığı ile üretilen, hareket eden havanın kinetik enerjisini kullanan enerji türüdür. Rüzgar enerjisi de elektriğe dönüştürülerek kullanılmaktadır. Potansiyel olarak tüm dünyada bulunmaktadır ancak özellikle açık deniz gibi yerleşimden uzak bölgelerin potansiyeli daha yüksektir (United Nations, (2022).

Küresel kullanımı en hızlı artan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bunun temel sebebi maliyetteki düşüştür. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) verilerine göre rüzgarda kurulu kapasite 1997 yılında 7.5 Gigawatt iken, 2000'lerin ortalarından itibaren kullanım hızı daha da artmıştır, 2018'de 564 Gigawatt'a çıkmıştır. 2016'da yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin %16'sını rüzgar oluşturmuştur (The International Renewable Energy Agency, 2022).

(Owusu & Sarkodie, 2016) (Güney, 2019) Rüzgardan elde edilebilecek enerji tribünlerin büyüklüğü ile orantılı olduğu gibi rüzgarın hızı ile de ilintilidir. Teorik

olarak rüzgar enerji potansiyeli hızın küpü ile orantılı olmaktadır (The International Renewable Energy Agency, 2022).

2.3. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji dünyanın içinden çıkan termal enerjiyi jeotermal kuyular aracılığı ile çıkararak kullanan enerji türüdür. Bu rezervuarlar doğal olarak yeterince sıcak ve geçirgen olabildiği gibi, yapay şekilde güçleri artırılabilir. Doğal rezervuarlara hidrotermal rezervuar, teknoloji yöntemi ile uyarılan rezervuarlara ise gelişmiş jeotermal sistemler denilmektedir (United Nations, (2022)). Jeotermal enerji yüzeye çıktıktan sonra doğrudan ısıtma ve soğutma da kullanılabilirdiği gibi, elektriğe dönüştürülerek de kullanılabilir. Ancak elektrik üretimi olabilmesi için sıcaklığın belirli bir düzeyin üzerinde olması gerekmektedir (International Renewable Energy Agency, 2023).

Jeotermal enerjinin en önemli özelliği bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak günün bulunulan saatinden yahut havanın açık ya da kapalı olmasından bağımsız olarak kesintisiz enerji sunmasıdır. Ayrıca jeotermaldeki ısı enerjisi uygun yapı ve teknolojiye sahip depolarda depolanabilmektedir (International Energy Agency Geothermal, 2022, s. 21)

Jeotermal enerji santrallerinin kuruluş ve ilk yatırım maliyetleri yüksektir ancak kuruluş sonrası işletme maliyetleri alternatiflerine göre nispeten daha uygundur (Edenhofer, ve diğerleri, 2011, s. 71).

Jeotermal enerji ile İzlanda, El Salvador, Yeni Zelanda, Filipinler, Kenya gibi ülkelerde elektrik ihtiyacının büyük kısmı karşılanırken, yine İzlanda'da ısıtma ihtiyacının neredeyse tamamı jeotermal ile karşılanmaktadır (International Renewable Energy Agency, 2023).

2.4. Hidroelektrik

Tarihte dünyanın birçok farklı coğrafyasında su değirmenlerinden ürünleri öğütmede faydalanılmıştır. Hidroelektrik enerjisi rezervuar ve nehirlerde kot farkından hareket eden suyun enerjisinden üretilen enerjidir. Rezervuarlı santraller

depolanan suyu kullanırken, nehir tipi santrallerde nehrin akışından ortaya çıkan enerji üzerinden hareket eder (United Nations, (2022).

Hidroelektrik an itibariyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın kullanılan kaynaktır. Kuraklık ve yağış rejimi değişikliklerinin menfi etkileri olabilmektedir. Hidroelektrik sistemi için gerekli altyapının çevreye olumsuz etkileri olabilmektedir, bu sebeple çevre dostu bir seçenek olarak tercihlerden birisi olmamaktadır (United Nations, (2022).

Hidroelektrik sistemleri buldukları nehirlerin yapısını değiştirmeleri, canlı yaşamına, nehir ekolojisine olumsuz etkide bulunmaları ve nehrin akış rejimini değiştirmeleri sebebiyle çevre dostu olarak düşünülmemektedir. Buna karşın enerji üretmesi sırasında ve sonrası emisyon olmaması olumlu yönü olarak düşünülmektedir (Edenhofer, ve diğerleri, 2011, s. 83-84).

Hidroelektrik santrallerinde baraj olan santraller ve baraj olmayan santraller olmak üzere temel iki tür vardır. Barajlı olan santrallerde talebe uygun şekilde su depolaması yapılabilir. Baraj yahut rezervuar olmayan santrallerde ise depolama yapılmaz, suyun akışından faydalanılarak enerji üretimi yapılır. Bu yöntem daha küçük ölçeklidir ve daha çevre dostu olarak düşünülmektedir (International Renewable Energy Agency, 2022). Rezervuarlı santrallerde akışa, akışın hızına bağımlılık azalır, mevsimsel durumlar ve yağış rejimi rezervuarlı olmayan santrallere göre daha düşük olur. Öte yandan hidroelektrik teknolojisi oldukça gelişmiş bir durumdadır, kullanılan su %90 oranında enerjiye dönüştürülebilmektedir. Yani verimi çok yüksektir (Ellaban, Abu-Rub, & Blaabjerg, 2014, s. 752).

Hidroelektrikte temel hedef, merkezi elektrik sistemine enerji sağlamak olmakla beraber kurulabildikleri ücra bölgelerde ya da merkeze uzak coğrafyalarda elektrik ihtiyacını karşılayarak diğer sistemlere göre avantajlı bir yöntem olabilmektedir (Edenhofer, ve diğerleri, 2011, s. 80).

Hidroelektrik dünyada en yaygın kullanılan yenilenebilir kaynaklardan birisidir. Norveç elektrik ihtiyacının %99'luk kısmını bu şekilde karşılamaktadır (International Renewable Energy Agency, 2022). Hidroelektrik ile enerji üretimi son yirmi yıl içerisinde ilk defa 2021 yılında düşüş göstermiştir ve bunun temel nedeni de

kuraklık olmuştur. Bu durum özellikle hidroelektrik bakımından güçlü olan Türkiye, Brezilya, Çin, Hindistan, ABD, Kanada gibi ülkelerde gözlemlenmiştir. Net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda bakıldığında ise hidroelektrik alanındaki büyümenin yetersiz kaldığı söylenebilir. Özellikle de kuraklıklar sebebiyle su tutma kapasitelerinin de düşmesi ile kapasiteler büyüse dahi verim düşük kalmaktadır (Bojek, 2022).

2.5. Okyanus Enerjisi

Okyanus enerjisi, deniz enerjisi yahut marine enerjisi olarak da bilinmektedir. Deniz suyunun, dalga ve akıntılarının kullanılarak kinetik ve termal enerjinin elektrik ve ısı üretmek için kullanıldığı enerji türüdür. Bu teknoloji henüz emekleme aşamasında olmakla beraber potansiyeli insanlığın günümüzdeki ihtiyacının oldukça üzerinde olarak öngörülmektedir (United Nations, (2022). Bu enerji türünün altı farklı kaynağı bulunmaktadır. Dalgalar, okyanus akıntıları, gelgit akıntıları, gelgit aralıkları, denizlerde termal enerji dönüşümü, tuzluluk dereceleri. Bu yöntemlerin her birinin temel yapısı ve teknolojileri farklı olduğu için enerji elde etmek yöntemleri de birbirinden farklıdır. Bu alandaki teknolojiler de henüz yeterince gelişkin olmadığı için ticari anlamdan henüz yeterince verimli, anlamlı bir durumda değildir. Teorik olarak okyanus enerjisinin yıllık 7,400 Exajoule kapasitesi bulunmaktadır. Bu miktar insanlığın günümüz hatta gelecek ihtiyacı için bile fazlası ile yeterli bir miktardır (Ellaban, Abu-Rub, & Blaabjerg, 2014, s. 752).

Dünya yüzeyinin %70'dan fazlası okyanuslar ile çevrilidir bu da okyanusları en büyük güneş ışığı toplayıcısı haline getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en düşük çevresel etkiye sahip olan ve uygun teknoloji devreye sokulduğunda en bol olan kaynaktır (Melikoglu, 2018, s. 564).

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na göre okyanus enerjisi rüzgar ve güneş enerjisini tamamlayıcı bir enerji olabilir, bu özelliği ile şebeke esnekliği sağlar ve enerji güvenliğine katkıda bulunur. Rüzgar dursa bile okyanusta dalga enerjisi güç üretmeyi sürdürür. Gelgitten enerji üreten teknolojiler ise dünyanın döngülerini esas aldığı için öngörülebilirlik ihtimali daha fazladır (International Renewable Energy Agency, 2023, s. 8).

2.6. Bio Enerji

Bio-enerji bio kütle adı verilen odun, odun kömürü gübre gibi kimi organik ürünlerden ve tarımsal ürünlerden enerji ve ısı üretimi için kullanılan enerji türüdür. Bio kütle genellikle gelişmekte olan ülkelerdeki yoksul toplulukların aydınlatma, ısınma, yemek pişirme gibi amaçlarla kullandığı malzemelerdir (United Nations, (2022)). Yukarıda anlatılanlar bioenerjinin geleneksel formunu temsil ederken, bir de küspe ve başka bitkilerden üretilen sıvı biyoyakıtlar, bio rafineriler ve farklı yöntemlerle üretilen biogaz gibi modern formu da bulunmaktadır (International Renewable Energy Agency, 2023).

Bioenerji, Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2019 yılı verilerine göre toplam temel enerji arzında %9.5'luk bir paya sahiptir. Bunun önemli bir bölümü endüstrileşmemiş bölgelerde yemek pişirme ve ısınma amacıyla yahut küçük endüstrilerde kullanılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı 2017 yılı verilerine göre bioenerji, toplam tüketilen yenilenebilir enerjinin yarısını oluşturmaktadır, fotovoltaik güneş pilleri ve rüzgar enerjisinin toplam üretiminin ise dört misli oranında üretim sağlamaktadır (Reid, Ali, & Field, 2020, s. 275). Bioenerji 2015 yılında toplam nihai enerji tüketiminin onda birini ve küresel enerji tüketiminin yirmide birini oluşturmaktaydı (International Renewable Energy Agency, 2023).

Bio kütle kullanımı fosil yakıtlara nazaran çok düşük oranda olmakla beraber sera gazı açığa çıkarmaktadır. Öte yandan eko sisteme ormansızlaşma, yoğun tarımsal arazi kullanımı gibi olumsuz etkileri olması sebebiyle yoğun kullanıma uygun değildir (United Nations, (2022)).

BÖLÜM 3. ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN

Tarihsel gelişime baktığımızda enerji kaynaklarının gelişimi odundan başlayarak, sanayi devrimi döneminde kömüre, I. Dünya Savaşı sonrasında petrole ve 1980'lerden sonra ise doğal gaz dönüşüm şeklinde olmuştur (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 5). Tüm bu kaynaklar düşen oranlarda olmakla beraber karbon emisyonu yaratmaktadır. Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve kentleşme gibi gelişmeler sera gazlarında sürekli bir artışa yol açmaktadır.

Kovid pandemisi tüm dünyaya iklim dönüşümüne ilişkin gerçekleri daha net şekilde ifade etmiştir. Özellikle de solunum yolu ve kardiyovasküler sağlık sorunları olan insanlar daha fazla etkilenmişlerdir (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 8). Ayrıca pandeminin yoğun dönemlerinde ulaşım ve üretim gibi alanlardaki yavaşlamanın doğadaki olumlu etkileri sera gazı emisyonlarının etkisini konusunda bir başka kanıt olmuştur. Örneğin Çin Halk Cumhuriyeti'nde 4 haftalık sürede karbon emisyonları yaklaşık %25 azalmıştır (Myllyvirta, 2020). 2020 yılında küresel karbondioksit emisyonu 2 Gigaton (Gt) yani %5.8 oranında azalmıştır. Bu düşüş tamamen pandemi kaynaklıdır ve 2009 global ekonomik krizine göre 5 misli daha yüksek bir düşüşe karşılık gelmektedir (International Energy Agency, 2021, s. 12). Temiz enerji kaynaklarının aktif şekilde kullanımı ve bunların enerji sistemine dahil edilmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir.

Hidrojen ismi ilk kez Fransız kimyager Lavoisier tarafından 1787'de kullanılmıştır. İsmi temeli Yunanca su anlamına gelen "hydor" ve üretmek anlamına gelen "genes" kelimelerine dayanmaktadır (Adolf, ve diğerleri, 2017, s. 6). Hidrojen evrende en fazla bulunan elementtir ve en temel element olarak sayılmaktadır. Bilinen evrenin %90'dan fazlası hidrojenden oluşmaktadır. Dünyanın kabuğu %14 oranında hidrojenden oluşmaktadır, bunun yanı sıra, yıldızlarda güneş dışındaki solar sistemlerde de en yüksek miktarda bulunan element hidrojendir. Dünyada hidrojen doğrudan, doğal haliyle, yani gaz şeklinde bulunmamakta ancak maddelerin içeriklerinde ve suyun içerisinde bileşik olarak bulunmaktadır (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24151). Kokusu, rengi ve tadı olmayan hidrojen aynı zamanda çok hafif bir gazdır buna karşın enerji içeriği çok yüksektir. Fosil yakıtlara oranla verimi 1.13 fazladır. Yakıt olarak kullanıldığında sadece su emisyonuna yol açmaktadır (Ozdemir & Mutlubaş, 2019). Bu özellikleri itibariyle çevreci özellikleri olan bir elementtir.

Hidrojen tüm yakıtlar içinde enerji yoğunluğu en yüksek olan maddedir. Bu yoğunluk volumetrik ve gravimetrik olarak ölçülebilmektedir. Hidrojenin gravimetrik enerji yoğunluğu, yani birim başına ısıtma değeri, en yüksek iken volumetrik yoğunluğu çok çok düşüktür. Volumetrik kapasitesinin düşük olması örneğin aynı miktarda gaza karşılık sıvı hidrojen için 3.7 kat büyük tank gerekliliği anlamına gelmektedir. Buna karşın aynı miktarda enerjiyi daha düşük hacim içerisinde barındırmaktadır (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24151).

Hidrojen, boru hatlarından gaz olarak yahut sıkıştırılmış gaz veya sıvı olarak gemilerle taşınabilmektedir. Elektrik ve metana dönüştürülerek sanayide ve evlerde kullanılabilir, ayrıca otomobillerde, kamyonlarda, gemicilik ve havacılıkta yakıt olarak kullanılabilir.

Son yıllarda hidrojen temiz enerji üretiminde kilit enstrümanlardan birisi haline gelmiştir. Özellikle son beş yılda hızlı şekilde artan sayıda ülke hidrojen stratejilerini ve/veya yol haritalarını açıklamaktadır. 2021'de Glasgow'daki Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP26), AB ve 32 ülke temiz hidrojen kullanımının artırılması konusunda ortak karara varıldı. Sonuç olarak düşük karbonlu ve uygun maliyetli yenilenebilir hidrojene 2030'a kadar küresel boyutta hazırlık konusunda bir konsensüs sağlanmıştır (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 18).

Öte yandan tek başına hidrojen kullanımı karbonsuzlaşma anlamına gelmemektedir. 2020 yılı itibarıyla kullanılan hidrojenin %80'i fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Oluşan karbon emisyonu Endonezya veya Birleşik Krallık'taki karbon emisyonu miktarına eşittir. Bu sebeple sıfır emisyonlu veya düşük emisyonlu teknolojiler geliştirilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır (International Energy Agency, 2021)

Hidrojene olan ilginin artması hidrojen çeşitlendirmelerine yol açmıştır. Bu farklı çeşit hidrojenleri adlandırmada renkler kullanılmaktadır. Siyah, gri ve kahverengi hidrojen fosil yakıtlardan elde edilen ve sera gazı salınımına yol açan hidrojeni temsil etmekte iken mavi hidrojen yine fosil yakıtlardan elde edilen ancak karbon yakalama teknolojisi ile emisyon yaratmayan ya da düşük emisyon yaratan hidrojen çeşidini temsil etmektedir. Yeşil hidrojen ise tamamen yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve sera gazı emisyonuna yol açmayan hidrojen çeşidi

anlamında gelmektedir. Temiz hidrojen denildiğinde yeşil ve mavi hidrojen kastedilmektedir (International Energy Agency, 2019, s. 34).

Hidrojen bir enerji kaynağı değil enerji taşıyıcısıdır ki bu özelliği ile elektriğe benzemektedir. Her ikisi de farklı kaynaklardan, farklı teknolojiler ile üretilmektedirler (International Energy Agency, 2019, s. 32).

Hidrojen ve elektrik arasındaki temel fark hidrojenin kimyasal bir enerji taşıyıcısı olmasıdır. Bu özelliği depolanma ve nakliye anlamında olumlu bir özelliktir. Uzun süre saklanabilir, gemilerle uzun mesafelere taşınabilir, sanayide kullanılan yüksek sıcaklıkları üretmek amacıyla yakılabilir, fosil yakıtların kullandığı altyapıyı kullanabilir. Ayrıca karbon, nitrojen gibi elementlerle birleştirilip hidrojen bazlı yakıtlara kolaylıkla dönüştürülebilir (International Energy Agency, 2019, s. 33). Buna karşın elektrik sadece küçük miktarlarda depolanabilmekte ve nakliyesi ancak şebeke üzerinden olabilmektedir (Adolf, ve diğerleri, 2017, s. 5).

Yeşil hidrojen, elektroliz yöntemi ile suyun içindeki hidrojenin oksijenden ayrıştırılması ile elde edilmektedir. Elektroliz yöntemi kullanımı elektrik gerektirmektedir. Elektrik enerjisi güneş veya rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanıyorsa bu hidrojene yeşil yahut temiz hidrojen adı verilmektedir. Yani elektrik üretimi doğaya fosil gaz salınımı yapılmadan elde edilmektedir. Bu hidrojen karbon yakalama teknolojisi ile elde edilen karbondioksit ile piroliz denen yöntemle sentezlendiğinde yenilenebilir metanol elde edilir. Metanol ya da metil alkol oda sıcaklığında saklanabilen bir sıvı karışım olduğu için nakliye veya depolama anlamında önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle denizcilik sektöründe yoğun kullanılmaktadır (Iberdrola, (2023).

Amonyak bir hidrojen taşıyıcısı maddedir. İçeriğindeki hidrojen miktarı sıvı hidrojenden fazla olması, kolayca sıvı hale getirilebilmesi, uzun süredir endüstride kullanılıyor olması ve buna bağlı olarak depolama ve nakliye kolaylığı ve maliyet düşüklüğü amonyağı olumlu bir seçenek haline getirmektedir (Chai, Bao, Jin, Tang, & Zhou, 2021, s. 2). Amonyak, Haber-Bosch denilen bir yöntemle hidrojenin nitrojen ile sentezi ile bir sürece sokularak elde edilmektedir (Morawski, ve diğerleri, 2022, s. 1).

Hidrojeniz, karbonsuz enerji sistemleri elektriğe mahkum olacaktır. Bu enerji yapısının ise esnekliği ve istikrarı düşük olur. Fosil yakıtlar dahil tüm enerji taşıyıcıları üretildikten sonra dönüştürülür veya kullanılırken enerji kaybı yaşanır. Hidrojende asıl üretilen miktarın %30'una kadar bir kayıp söz konusu olabilmektedir, bu da hidrojeni elektriğe karşı şu an için pahalı hale getirmektedir. Öte yandan bazı uygulamalarda hidrojen diğer alternatiflere göre çok daha verimlidir. Örneğin hidrojen pilli bir arabanın verimi %60 iken, doğal gaz kullanan bir motor %20, kömür santrallerindeki motorlar %45 verimliliğe sahiptirler (International Energy Agency, 2019, s. 33).

Aralık 2015'de Fransa/Paris'de düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP21) ile tüm dünyada "global sıcaklık artışını, sanayi öncesi dönemdeki düzeye göre 2 derece celsius'un altında tutmak ve sanayi öncesi düzeyin 1.5 derece celsius üzerinde sınırlamak" konusunda bir mutabakat sağlanmıştır. Burada 1.5 derece üzerine çıkılması şiddetli iklim olaylarına, kuraklık ve sellere yol açma riskinin çok daha fazla artması anlamına geleceği için belirlenmiştir bir sınırdır. Bu bağlamda Paris Anlaşması 196 ülke tarafından onaylanmış, bağlayıcılığı olan bir anlaşmadır (United Nations, 2023). Paris anlaşması öncesinde de iklim değişikliği hakkında bir farkındalık olsa da, anlaşmasını bağlayıcı olması bir dönüm noktası olmasına ve ülkelerin emisyon azaltma yahut uzun vadede sıfırlama konusunda hedefler belirlemelerine ön ayak olmuştur. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları öne çıkmaktadır.

2015 Paris Antlaşması ile küresel sıcaklık artışının 1.5 santigrat dereceyi aşmaması ve 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefine ulaşma konusunda hidrojen çok önemli bir noktada durmaktadır. Bu hedefler için ağır sanayi dallarında ve uzun mesafeli taşımacılıkta emisyonların olabildiğince düşürülmesi gerekmektedir ki hidrojen bu bağlamda en önemli seçeneklerden birisi olabilir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 19).

İkincisi yenilenebilir enerji kaynaklarındaki ve elektrolizörlerdeki teknolojik ilerlemeler kaynaklar maliyet düşüşleri yeşil hidrojene olan ilgiyi artırmaktadır. Rüzgar ve fotovoltaik güneş aracılığı ile üretilen elektriğe artan bir talep olmakla beraber bu alanlardaki mevsimsel/döngüsel esneklik esnekliği ve depolama konusundaki sıkıntıları yeşil hidrojen çözebilir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 19). Günümüzde 0.3 GW olan elektroliz kapasitesinin 2030'da 850 GW civarına,

2050'den önce 3,600 GW'a ulaşması beklenmektedir. Yeşil hidrojen üretimi ile yakalanan karbondioksitin ise bugünün rakamı olan 135 Mt'dan, 2030'da 680 Mt'a ve 2050 yılında 1,800 Mt'a ulaşması beklenmektedir (International Energy Agency, 2021).

Son iki yılda dünyada hidrojen stratejisi açıklayan ülke sayısı hızla artmaktadır. Haziran 2019'da yalnızca Japonya ve Güney Kore'nin bir hidrojen stratejisi, Fransa'nın ise Hidrojen kullanım planı vardı (International Energy Agency, 2021, s. 25). 2020 yılında hidrojen talebi 90 Mt idi ve bunun ağırlıklı kısmı fosil yakıtlardan elde edilmişti. Bu talebin karşılığı 900 Mt karbon salınımı olmuştur. Bununla beraber son beş yıllık süreçte elektrolizör sayısı iki misline çıkmıştır ve 2021 ortası itibariyle 399 MW kapasiteye ulaşmıştır. 2030 yılına kadar tamamlanması beklenen 390 projeden 90 GW kapasite eklenmesi beklenmektedir. Tüm bunlar gerçekleştiği takdirde temiz hidrojen arzı 2030 yılında 8 Mt olacaktır ki 2050 yılında sıfır karbon hedefine ulaşma anlamında çok geride kalacaktır (International Energy Agency, 2021, s. 5).

Global hidrojen talebi 2000-2020 yılları arasında %50 oranında artmıştır. Bu artış ağırlıklı olarak endüstri kaynaklıdır. 2020 yılındaki 90 Mt olan talebin 50 Mt'u (%55) endüstri talebidir (International Energy Agency, 2021, s. 43). 2050 yılı karbon sıfır hedefi doğrultusunda olacak bir hesaplamada hidrojen talebinin 530 Mt'a çıkması gerektiği öngörülmektedir. Ki bu senaryoda bu talebin yarısı sanayi ve taşımacılıktan gelecektir. Bugün 50 Mt olan sanayi talebi bu senaryoda 140 Mt olacaktır. Günümüzde 20 Kt'dan daha az olan taşımacılık alanındaki talebin 100 Mt olması beklenmektedir (International Energy Agency, 2021, s. 45).

3.1. Hidrojen Nasıl Üretilir?

Hidrojen günümüzde fosil yakıtlardan, nükleer enerji yoluyla veya elektroliz yoluyla sudan elde edilebilir. En yaygın olarak doğal gazdan elde edilmektedir. Elektroliz yöntemi doğal gaza göre daha maliyetli bir yöntem olsa da çevreye zarar verici bir etkisi bulunmamaktadır. Elektroliz için gerekli enerji güneş, rüzgar, hidro enerji ve jeotermal ile elde edilebilmektedir (Kurtoğlu, 2014, s. 63).

Hali hazırda küresel olarak üretilen hidrojenin çoğu fosil yakıtlardan, daha çok da doğal gazdan elde edilmektedir. Günümüzde elde edilen hidrojen miktarı olan 70 Mt'luk hidrojenin tamamı elektroliz ile üretiliyor olsaydı 617 Milyon metreküp suya ihtiyaç olması anlamına gelmektedir. Bu su sıkıntısı çekilen coğrafyalar için önemli bir sorun olacaktır. Bu noktada deniz suyunun ters ozmos yöntemi ile tuzdan arındırılması bir çözüm olabilir. Bu yöntemde ise her metreküp su için 3-4 kilowatt saat elektrik harcanması gerekmektedir. Bunun anlamı metreküp başına 0.7-2.5 Dolar maliyet demektir ki bu maliyet total maliyette çok küçük bir değişime yol açmaktadır. Kilogram hidrojen başına 1.2 sent maliyet artışı anlamına gelmektedir (International Energy Agency, 2019, s. 43).

Hidrojen üretiminde teknik olarak 5 yöntem bulunmaktadır.

1. Termal süreçlerle
2. Elektrolitik süreçlerle
3. Fotolitik süreçlerle
4. Hidroliz süreçleri ile
5. Biyolojik süreçlerle

3.1.1. Termal Süreçler

Bu yöntemde hidrojeni birleşik olduğu diğer maddelerden ayırmak için yeterli miktarda ısı kullanılır ya da bu bileşikler ekzotermik ısı ile yakılarak hidrojen elde edilir. Termal süreçlerde daha önce belirttiğimiz gibi, hidrojenin içeriğinde olduğu su veya fosil yakıt yahut bio yakıtlar parçalarına ayrılarak hidrojen elde edilir. Bu süreçlerde hidrokarbon emisyonu görülür (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24152).

Hidrojenin kimyasal yöntemlerle ayrışması için termal enerjinin kullanılması termoliz süreci olarak isimlendirilmektedir. Su termolizi için minimum 2000 K üzeri

sıcaklık gerekmektedir ancak ayrışma sırasında hidrojen oksijen ile tekrar tepkimeye girerek suya dönüşebilmektedir. Bu sebeple sıcaklık düzeyi daha da önem kazanmaktadır. 2000 K'da %1, 2500 K'da %8, 3000 K'da %64 oranında ayrışma meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık gerekliliğinin yanında bu sürecin yürütülebilmesi için bu sıcaklıklara dayanıklı maddelere de gerek bulunmaktadır. Bu süreçteki bir başka problem yüksek sıcaklık sebebiyle ayrışma sonrasında bir çok başka element ortaya çıkmaktadır (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 26).

3.1.2. Elektrolitik Süreçler

Bu yöntemde su elektroliz ile parçalanarak hidrojen elde edilir. Elektrolizde kullanılan elektrik geleneksel kaynaklardan elde edilebileceği gibi yenilenebilir kaynaklardan da elde edilebilir (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24153). Elektroliz en iyi bilinen ve en yerleşik yöntemdir. Elektroliz sürecinde bir elektrolit içinde bulunan katot ve anot aracılığı ile süreç ilerletilir. Enerji verildiğinde su ayrışır, anotta oksijen, katotta hidrojen oluşur (Nikolaidis & Poullikkas, 2015, s. 605). Elektrokiz yönteminde her kilo temiz hidrojen için 18-24 litre suya ihtiyaç olmaktadır. Bu su sıkıntısı çekilen ülkelerde sıkıntı olabilir. Deniz suyu bir alternatif olabilir ancak bu durumda suyu tuzdan arındırmak gerekecektir ki bu işlemin de maliyeti her metreküp su için 0.7-2.5 Dolar arasındadır (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 32).

En bilinen elektroliz yöntemleri alkalın elektroliz, proton değişim membran (PEM) ve katı oksit elektroliz hücre yöntemleridir. Elektroliz yöntemi oldukça basit bir süreç olsa da sürecin gerektirdiği elektrik miktarının yoğunluğu maliyetin büyümesine yol açmaktadır. Oysa hidro, rüzgar ve güneş gibi yöntemlerle elektrik sağlanıyorsa maliyet çok daha uygun, verim daha yüksek ve depolama imkanları daha fazladır. Bu durum ticari anlamda üretimi mümkün kılar (Nikolaidis & Poullikkas, 2015, s. 606).

Alkalın elektroliz yöntemi bunların arasında en gelişmiş ve yaygın olan formudur. Proton değişim membran formu çok daha yakın tarihli ve daha küçük ölçekli üretime uygun olan bir form iken kato oksit elektroliz yöntemi aralarında en yeni formdur (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 24,25). Alkali elektrokiz yöntemi en eski olması sayesinde en gelişmiş ve %80'e ulaşan verimliliği ile en efektif formdur

ve aynı zamanda ticari üretime aralarında en uygun formdur (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 25).

3.1.3. Fotolitik Süreçler

Suyun hidrojen üretmek için bölünmesinde ışık enerjisi kullanılır. Bu yöntem henüz gelişim aşamalarını tamamlamamıştır (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24153). Bu yöntemde güneş ışığı yarı iletken madde aracılığı ile emilir ve aynen elektroliz yöntemindeki gibi su ayrıştırılır (Nikolaidis & Poullikkas, 2015, s. 607). Fotolitik yöntemde gerekli enerjiyi sağlamak için itici bir güç gerekmemektedir, bu enerji güneşten doğrudan dünyamıza gelmektedir. Bizim güneş ışığı dediğimiz foton spektrumu dünyamızdaki yaşamın devamını sağlamaktadır. Foton, maddeler ile fiziksel ve kimyasal tepkimeye girerek canlı hayatına olanak sağlamaktadır. Bununla beraber foton ile doğrudan suyu hidrojene ayırtırmak mümkün değildir. İşlemin gerçekleşebilmesi için fotokataliz denilen kimyasal bir süreç gereklidir. Bu süreç ışığa maruz kalma denilen süreci hızlandırmaktadır. Bu yöntemle hidrojen üretimi mümkündür ancak günümüz teknolojisi ile verim ve ölçek düşüktür. Ayrıca kataliz yöntemi için gerekli cihazlar oldukça maliyetlidir dolayısıyla şu an için mantıklı bir seçenek olarak görülmemektedir (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 29).

3.1.4. Hidroliz Süreçler

Metal tabanlı hidroliz hidrojen üretiminde bir başka yöntemdir. Bu tip süreçlerde su yüksek tepkili metaller aracılığı ile çözülerek hidrojen açığa çıkarılır. Lityum, sodyum, rubidyum gibi örnekleri olan bu metallere alkali metaller diyoruz (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24154).

Hidrojen halen öncelikle fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bunun yanında biyolojik yöntem veya suyun ayrıştırılması gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler hem maliyetli hem de yoğun enerji tüketimi yaratan süreçlerdir. Hidroliz bu anlamda kolay uygulanabilmesi ve düşük maliyeti ile her geçen gün dikkatleri üzerine çekmektedir. Burada kullanılan metallerin özelliklerine çok dikkat etmek gereklidir. Örneğin lityum hidrür ve kalsiyum klorürün hidrolizi yoğunluğu sebebiyle uygulama zorluğuna yol açabilmektedir. Ancak sodyum borhidrür hem hidrojen içeriğinin

yüksekliği hem de tepkisinin kontrolü edilebilmesi sebebiyle hidroliz yöntemi ile hidrojen üretimi açısından öne çıkmaktadır (Xie, ve diğerleri, 2019, s. 2).

3.1.5. Biyolojik Süreçler

Bu yöntemde su algler ve siyanobakteriler kullanılarak fotobiyolojik ayrıştırılmaya uğrar. Işığın dahil veya hariç olabildiği süreçlerle fermantasyon yöntemi ile hidrojen üretilir (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24153).

Biyolojik süreçler kendi içerisinde beş farklı forma ayrılmaktadır. Direk ve dolaylı biofotoliz, fotofermantasyon, karanlık fermantasyon ve biyolojik şekilde suyun gazı çevrimi yöntemleridir. En sık kullanılan biyolojik yöntem olan direk biofotolizde iki ayrı sistem ile bir çeşit fotosentez süreci yürütülür. İlk sistem karbon dioksit miktarını azaltan indirgeyici sistem, diğeri ise suyu ayrıştıran ve oksijeni sağlayan sistemdir. Yeşil bitkilerde ve alglerde karbon azalması hidrojen üretimi sağlar. Bu süreçler genel anlamda laboratuvar ortamında çalışılmaktadır ancak yoğun bir üretim aşamasına henüz geçilmemiştir

3.2. Hidrojenin Depolanması ve Nakliyesi

Enerji sisteminde sıfır karbon emisyon hedefi yolunda yeşil hidrojen en önemli enstrümanlardan birisi olabilir. Bu bağlamda sistemin dönüşümünde temiz hidrojenin her adımı dikkatle irdelenmek durumundadır. Üretiminden son kullanıcıya ulaştırılmasındaki aşamaların olabildiğince uygun maliyetli, istikrarlı bir şekilde olması, yani arz zincirinde gerek depolama gerekse nakliye çok önemlidir. Arz güvenliği düşünülüğünde hidrojenin kesintisiz sağlanması birincil önemdedir. Günümüzde hidrojen altyapısı henüz yeterine gelişkin olmadığı için bu konuda sıkıntılar bulunmaktadır. Şu an için hidrojen üretim tesisleri yakını bölgelerde kesintisiz arz sağlanabilmektedir (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24154).

Arz ve talebin mümkün olduğunca birbirine yakın bölgelerde olması hem maliyet, hem hız açısından hem de kolaylık anlamında faydalı olacaktır. Yerel üretim ve yerinde tüketim çevresel etki açısından da çok daha anlamlıdır. Hidrojenin saf haliyle, yani gaz olarak depolanması ve nakliyesi günümüz teknolojisi ile sıkıntılı ve maliyetli olabilmektedir ancak likit şekilde veya amonyağa dönüştürülmüş hidrojen bir alternatif olabilir. Bu durumda da hidrojen altyapısının planlanması hayati bir

önem taşımaktadır. Uygun bir altyapı hem üretimde verimi artıracak hem de son kullanıcıya ulaşımında maliyet ve hız avantajı sağlayacaktır (International Energy Agency, 2021, s. 143).

3.2.1. Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin gaz veya sıvı olarak depolanabilir. Gaz olarak tutulacak ise boşalmış yer altı mağaraları kullanılabilir. Daha önce doğal gaz depolamasında kullanılan mağaralar gazın boşalması ardından hidrojen tutulması amacıyla kullanılabilir. Hidrojen sızma ihtimali yüksek bir gaz olsa da bu mağaralarda sızma olmadan saklanabilir (Tutar & Eren, 2011, s. 8,9). Bu mağaralar tuz mağaralarıdır (Abe, Popoola, Ajenifuja, & Popoola, 2019, s. 15076). Tuz mağaraları özellikle uzun dönemli depolama ve ölçek ekonomilerinde öne çıkmaktadır. Bu durum ise maliyet avantajı yaratmaktadır. Tuz mağaraları dışında boşalmış petrol ve gaz rezervuarları da depolamada kullanılabilir ancak bunlarda petrol ve/veya gazın boşaltılması ardından rezervuarın temizlenmesi gerekmektedir. Tuz ve rezervuarlarda yapılan depolamalara genel anlamı ile jeolojik depolama adı verilmektedir (International Energy Agency, 2019, s. 69-70). Depolamada bir başka yöntem sıvı versiyon ile depolanmasıdır. Bu yöntemde çift katmanlı ve iyi yalıtıma sahip yapay depolar kullanılmaktadır. Ancak hidrojenin sıvıya dönüşümü ve sonrasında sıvıdan yeniden gaza dönüştürmesi gibi gereklilikler sebebiyle maliyet artabilmektedir. Sıvı halinde, ama özellikle de gaz halinde hidrojenin yoğunluğunun düşük olması daha büyük depolama araçları ihtiyacı doğurmaktadır. Bu bağlamda katı şekilde saklama bir diğer alternatiftir. Katı halde saklamada hidrojen molekülleri karbon tabanlı malzemeler ile etkileşime girerek bu malzemelerin yüzeylerinde emilerek depolanabilir. Daha sonra ihtiyaç halinde bu malzemelerin yüzeylerinden serbest bırakılmaktadır (Abe, Popoola, Ajenifuja, & Popoola, 2019, s. 15076).

Depolama tankları sıkıştırılmış hidrojen ve sıvılaştırılmış hidrojen saklanmasında kullanılmaktadır. Genel olarak küçük ölçekli depolamalarda kullanılmaktadır (International Energy Agency, 2019, s. 70).

3.2.2. Hidrojenin Boru Hatları ile Nakli

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre hidrojeni 1,500 Km ile 3,000 Km arası mesafelere ulaştırmada boru hatları en uygun maliyetli çözümdür. Daha uzun mesafeler için sıvılaştırılmış hidrojen, amonyak gibi yöntemler alternatif olarak kullanılabilir (International Energy Agency, 2021, s. 144).

Hidrojen boru hatları ilk olarak 1938'de Almanya'da kullanılmıştır. İlk kullanılan Rhine-Ruhr boru hattı halen aktif bir hattır. Aktif kullanılan hatların çoğunluğunun kimya fabrikaları, petrol rafinerileri gibi sanayi bölgeleri çevresinde bulunduğu görülmektedir (International Energy Agency, 2021, s. 144).

Hidrojen boru hatlarındaki en önemli sıkıntı başlangıç sermayesinin yüksek olmasıdır. Bu sebeple bu gibi bir yatırımın yapılabilmesi için mevcut hidrojen talebi bulunması, gerekli regülasyonların tamamlanmış olması gereklidir. Burada belirtilmesi gereken bir diğer nokta ise aynı çap ve uzunluktaki boru hatları karşılaştırılmasında doğal gaz boru hatları hidrojene oranla %10-15 daha ucuzdur (International Energy Agency, 2021, s. 144). Yeni hidrojen boru hatlarının inşası yerine doğal gaz için kullanılan hatların dönüştürülmesi ve hidrojene uygun şekilde güncellenmesi yeni boru hattına nazaran %50 ile 80 arasında bir maliyet kısıntısına karşılık gelmektedir (International Energy Agency, 2022, s. 112).

3.2.3. Hidrojenin Deniz Yoluyla Taşınması

Boru hatları ile hidrojen nakli 2,500 km ile 3,000 km'ye kadar olan mesafeler için uygulanabilir görünmektedir. Bunun üzeri mesafeler için ise deniz yolu öne çıkmaktadır. Bu şekilde taşımada hidrojeni gaz olarak taşımak düşük yoğunluk sebebiyle mantıklı olmamaktadır. Sıvılaştırılmış hidrojen, amonyak gibi formlarda taşımak hem enerji içeriği hem de maliyet açısından en uygun görünmektedir (International Energy Agency, 2022, s. 132). Hidrojenin sıvılaştırılması için -253 santigrat dereceye kadar soğutulması gerekliliği burada bir maliyete ve enerji kaybına yol açmaktadır. Sıvılaştırma sürecinde hidrojenin kendisi kullanılmakta bu da günümüz imkânları ile hidrojenin ilk halinden %25-35 arası bir kayba yol açmaktadır (International Energy Agency, 2019, s. 74). Amonyak sıvılaştırılmış hidrojene oranla 1.7 misli daha fazla hidrojen içermektedir, dolayısıyla hem enerji içeriği hem maliyet

anlamında sıvı hidrojenden daha anlamlı görünmektedir ancak küresel olarak iyi bir dağıtım ve ticaret ağına sahip olmasına karşın amonyak zehirli bir madde olması sebebiyle sınırlı bir kullanıma sahiptir (International Energy Agency, 2019, s. 75). Bununla beraber özellikle uzay teknolojilerinde sıvı hidrojenin kullanılıyor olması sebebiyle bu teknolojiye bir yatkınlık bulunmaktadır ve bu teknoloji nispeten gelişmiş bir durumdadır (International Energy Agency, 2022, s. 132). Her durumda deniz yoluyla hidrojen taşınması uygun bir altyapı gerektirecektir. Yükleme istasyonları, sıvılaştırma ve yeniden gaz haline dönüşüm için tesisler, saklama tankları ve üniteleri gibi gereklilikler bulunmaktadır.

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak deniz yoluyla nakledilmesinin ötesinde taşıyıcı gemilerin kendilerinde de hidrojen kullanımı mümkündür. Günümüzde sıfır karbon hedefi doğrultusunda hidrojen denizcilikte en uygun yakıt olarak öne çıkmaktadır. Büyük tonajlı tankerlerde hidrojen henüz test edilmiş değildir ancak daha küçük deniz taşıtlarında, feribotlarda hidrojen Birleşik Amerika, Norveç, Belçika, Fransa gibi ülkelerde denenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bir diğer avantaj hali hazırda deniz araçlarında önemli bir değişiklik yapılmadan hidrojen kullanılması mümkündür (Reinsch, (2021)). Hidrojenin ağır kara taşıtlarında da verimli çalışması sayesinde bazı endüstri alanlarının da karbonsuzlaşma yolunda avantajları olabilir. Karbon emisyonlarına küresel anlamda %7'ye varan etkide bulunan madencilik sektöründe bu emisyonun da yaklaşık %50'si uzun yol kara taşıtları kaynaklıdır. Bu sektörde hidrojenin dizel yerine ikamesinde bir problem yaşanmamış, verim düşüşü olmamıştır (Chen, (2022)).

3.3. Hidrojenin Güçlü ve Zayıf Yönleri

Temiz hidrojene son yıllarda önemli bir ilgi var olsa da halen aktif anlamda kullanımı sınırlıdır. Yaygınlaşma konusunda hidrojenin güçlü ve zayıf yönlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme yapılırken öncelikle ideal yakıt nedir sorusunun cevabının açıklanması gerekmektedir:

- İdeal yakıt kolay ve güvenli olarak iletilebilmeli ve nakledilebilmeli, bu nakil sırasında enerji kaybı ya hiç olmamalı ya da düşük miktarda olmalı,
- İdeal yakıt kolay depolanabilmeli ve saklanan miktarın verimi düşmemeli,

- Karbon vb. emisyonları sıfır veya çok düşük olmalı, yani çevreye olumsuz etkisi olmamalı,
- Birim kalori değeri/verimi yüksek olmalı,
- İdeal yakıt farklı şekillerde (gaz/sıvı) olarak ve hemen her coğrafyada kullanılabilmesi, kullanımını güvenli olmalı,
- İdeal yakıt diğer enerji türlerine, mesela elektriğe dönüşümü kolay ve hızlı olmalı,
- İdeal yakıt ekonomik olmalı, (Şahin S. , 2006, s. 123)

İdeal yakıt koşulları değerlendirildiğinde hidrojenin çok sayıda olumlu özelliği ortaya konulabilir.

Öncelikle hidrojen hafif olduğu için bir tehlike anında uçuculuğu ile diğer gazlar gibi risk oluşturmaz. Sıvı hidrojenin ısı değeri çok yüksektir. Örneğin uçak yakıtının yaklaşık 3 mislidir. Bu sebeple uzay araçlarında yakıt olarak sıvı hidrojen kullanılır (Aslan, 2007, s. 285).

Sıvı hidrojen, gaz halindeki hidrojen hacminin 1/700'ü kadardır. Enerji içeriği anlamında bilinen tüm yakıtlar içinde en yüksek değere sahip olan enerjidir (120.000 kl/kg). Otomobillerde benzinin verimi %25 iken, hidrojenin verimi %60'dır. Verimin yüksekliği ve sıfır karbon emisyonu hidrojeni önemli bir alternatif haline getirmektedir (Kurtoğlu, 2014, s. 62).

Hidrojen bilinen evrende en fazla bulunan element olmasını yanı sıra bir enerji taşıyıcısı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilmektedir. Yani sıfır karbonlu bir enerji taşıyıcısı özelliği taşımaktadır (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24151).

Demir-çelik gibi sanayi sektörleri yüksek sıcaklık (1,000 santigrat üzeri) gerektirmektedir. Bu yüksek sıcaklıklar günümüzde fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları bu alanda bir alternatif olamamaktadır, ancak yeşil hidrojen bu alanlarda bir alternatif olabilir. Bu sektörlerin yüksek miktarda emisyonu yol açtığı düşünüldüğünde yeşil hidrojen çok faydalı bir alternatif olabilir (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 13). Sadece demir-çelik değil,

kimya, uzun mesafe taşımacılık gibi karbonsuzlaştırılması en zor sektörlerde yeşil hidrojen çok uygun bir seçenektir (International Energy Agency, 2019, s. 13).

Yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen hem elektrikten farklı olarak uzun süreli olarak ve yüksek miktarlarda depolanabilir hem de farklı formlarda çok uzun mesafelere nakil edilebilir. Bu özelliği ile enerji ihtiyacı duyan coğrafyalara rahatça ulaştırılabilir (International Energy Agency, 2019, s. 13). Hidrojenin hem farklı formlarda (sıkıştırılmış gaz, likit gibi) hem de yüksek miktarlarda depolanabilmesi, hem de jeolojik olarak yahut yapay tanklarda depolanabilme gibi farklı alternatiflere sahip olması ciddi bir esneklik avantajı sağlamaktadır (The International Renewable Energy Agency, 2019, s. 26).

3.4. Hidrojen Konusunda Engeller

Hidrojenin enerji sistemine dahli ve aktif olarak kullanılması konusunda önünde bazı engeller bulunmaktadır.

➤ Düşük karbonlu veya sıfır emisyonla hidrojen üretimi maliyetlidir. Uluslararası Enerji Ajansı analizlerine göre yenilenebilir kaynakların üretimindeki maliyet düşüşü ve ölçek artışı sayesinde yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi 2030 yılına kadar %30 daha uygun maliyetli hale gelecektir, (International Energy Agency, 2019, s. 14).

➤ Hidrojen altyapısı yavaş gelişmektedir ve yaygınlığı düşüktür. Tüketici hidrojen fiyatları ikmal istasyonlarının azlığı, istasyonlara yakıt temin sıklığının düşüklüğü vb sebeplerle yüksektir. Bu konuda devletlerin, yerel idarecilerin, sanayi temsilcileri ve yatırımcıların bir araya gelerek planlama yapması ve politika üretmesi gerekmektedir, (International Energy Agency, 2019, s. 14).

➤ Altyapı yanı sıra teknolojik engeller de söz konusudur. Yeşil hidrojen teknolojileri halen oldukça yeni ve üzerinde çalışılan teknolojilerdir. Bu geniş ölçekli kullanımı yavaşlatmaktadır. Örneğin deniz aşırı ticaret günümüzde sadece likit olarak mümkündür, saf haliyle hidrojen kullanılamamaktadır (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 31),

➤ Verimlilik bir başka önemli sorundur. Yeşil hidrojen üretim zincirinin her halkasında enerji kaybı görülmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 31),

➤ Özellikle sanayide elektrifikasyon yeşil hidrojen üretimine sekte vurabilir. 2050 yılına kadar yeşil hidrojen üretiminde kullanılacak elektrik miktarının 21,000 terawatt saat (TWh) olacağı tahmin edilmektedir ki bu miktar günümüzde küresel olarak üretilen elektrik miktarına denk gelmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 31),

➤ Günümüzde regülasyonlar yeşil hidrojen kullanımını teşvik etmekten uzak, neredeyse kullanımını engeller niteliktedir. Devletlerin ve özel sektörün bir araya gelerek yeşil hidrojen kullanımını önündeki engelleri kaldırması, buna uygun politikalar geliştirmesi gerekmektedir. Ayrıca bunların hem yerel hem uluslararası düzeyde yapılması gerekmektedir (International Energy Agency, 2019, s. 14). Her ne kadar 140 ülke net sıfır emisyon taahhüdünde bulundaysa da bu konuda yapılacakların çerçevesi net değildir, ayrıca halen hidrojen enerji istatistiklerinde yer almamaktadır ve temiz hidrojenin emisyon düşüşüne katkısı göz ardı edilmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 31).

BÖLÜM 4. YEŞİL HİDROJENE GEÇİŞ AŞAMALARI

İklim hedefleri doğrultusunda enerji dönüşümü büyük önem taşıırken, yeşil hidrojenin de bu dönüşümde mihenk taşlarından birisi olması şaşırtıcı olmayacaktır. Özellikle enerji tüketimi yoğun sektörlerde bu dönüşüm daha da kıymetli olacaktır.

Temiz hidrojenin ekonomide ve üretimde bir yer alması, bazı ekonomik ve politik sonuçlara yol açacaktır. Sıfır emisyon konusunda önemli avantajına karşın kısa vadede maliyeti, teknolojik ve mevzuat anlamında görece yeterli gelişmişlik düzeyinin var olmaması gibi problemler bulunmaktadır.

Temiz hidrojenin geleceğin yakıtı olacağı şekilde görüşler yaygınlaşmaktadır. Ancak hidrojenin küresel üretimi henüz ticarileşebilecek miktarda değildir. Bunun yanı sıra ticari meta haline gelebilmesi için depolanabilmesi ve uzak mesafelere taşınabilmesi de önemlidir. Bir diğer önemli konu ise maliyetlerdir. Temiz hidrojenin maliyeti fosil yakıtlardan düşük veya ona yakın düzeyde olmalıdır. Bunun için bazı adımlar öngörülmektedir.

4.1. Mavi Hidrojen

Yeşil hidrojene geçişte mavi hidrojen formu bir ara aşama olabilir. Temel hedef yeşil hidrojen olmakla beraber, mavi hidrojen kısa ve kısa-orta vadede bir katkıda bulunabilir. Mavi hidrojen fosil yakıtlardan üretilen ancak karbon yakalama teknolojisi ile hidrojen üretim yöntemidir. Bu yöntemle ile karbon hemen hemen %100 oranında yakalanmaktadır ancak metan kaçakları olabilmektedir. Metan karbon dioksit oranla çok daha tehlikeli bir sera gazıdır. Bu sebeple kaçak oranı binde 2'yi aşmamalıdır. En önemli riski bu olan mavi hidrojenin bir başka olumsuz yönü fosil yakıtlardan üretiliyor olması sebebiyle fosil yakıtların fiyat değişimlerinden doğrudan etkileniyor olmasıdır. Elbette bu yönüyle enerji güvenliğine bir katkısı bulunmamaktadır. Kısacası mavi hidrojen ana hedef olan yeşil hidrojen sistemine geçişte başlangıçta bir esneklik sağlamak ancak nihai bir çözüm olmamaktadır (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 27).

Maliyet avantajı sebebiyle tezin yazıldığı tarih itibariyle fosil yakıtlardan üretilen gri hidrojen sanayi alanında ciddi oranda kullanılmaktadır. Karbon yakalama teknolojisi içeren mavi hidrojen büyük ölçekli kullanımda maliyetleri düşürerek dönüşümü hızlandırabilir. Mevcut durumda gri hidrojen kilogram başına 1.5 Euro, mavi hidrojen 2-3 Euro, yeşil hidrojen ise 3.5-6 Euro arası bir fiyata sahiptir (Kovac, Paranos, & Marcius, 2021, s. 10020). Karbon yakalama teknolojisi kimya sektöründe hali hazırda kullanılmaktadır. Örneğin amonyak üretim sürecinde karbondioksit hidrojenden ayrılmaktadır ve bu karbondioksit üretimin başka alanlarında kullanılmaktadır (International Energy Agency, 2021, s. 56).

4.2. Sıvı Hidrojen ve Amonyak

Sıvı hidrojen adımlardan birisidir. Sıvı hidrojen tankerlerle deniz aşırı mesafelere rahatlıkla taşınabilir. Burada tedarik zinciri oluşturulmalıdır. Hem ihracat hem ithalat terminallerinde büyük hacimli sıvı hidrojen terminalleri depolamada işin temelidir. Bunun yanında denizcilik taşıtları, bunlara uygun materyaller ve ekipmanlar, limanlarda kullanılacak cihazlar ve kargo ekipmanları bu zincirde yer alacaktır (Ratnakar, ve diğerleri, 2021, s. 24150, 24151). Hidrojenin düşük yoğunluklu yapısı sebebiyle fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında çok daha büyük hacimli depolara ihtiyaç duymaktadır. Buna karşın sentetik metan, sentetik likit yakıt ve amonyak şeklinde hidrojen bazlı yakıtlara dönüştürüldüğünde hali hazırda var olan altyapı ile depolanması ve nakli mümkündür. Bu yeşil hidrojene geçişte bir adım olabilir. Tahminlere göre sıfır emisyon hedefi doğrultusunda 2050 yılında amonyak denizcilik sektöründeki yakıtların %45'ini karşılarken, sentetik kerosen havacılık sektöründeki yakıt tüketiminin 1/3'ünü karşılayacaktır (International Energy Agency, 2021, s. 143). Amonyak karbon emisyonuna yol açmayan hidrojen taşıyıcısı bir maddedir. Yakıt olarak, temizlik ürünlerinde ve gübre üretimindeki ana maddedir. Ayrıca soğutma tesislerinde soğutucu olarak da kullanılmaktadır (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 42).

Maliyetler açısından bakıldığında sıvı hidrojen uzun mesafeler, sıkıştırılmış gaz nispeten kısa mesafeler için daha uygundur. Doğrudan hidrojen boru hatları yüksek başlangıç sermayesi gerektirdiğinden yerel ve bölgesel hatlara öncelik verilip piyasaların oluşumu sonrası bu hatların birbirine bağlanması sağlanabilir (Dincer, Eroglu, & Ozturk, 2021, s. 39).

Sıvı hidrojen teknolojisi henüz olgun bir aşamada değildir. Amonyakın gübre hammaddesi olarak kullanılması onun depolaması, nakli ve diğer altyapı organizasyonu anlamında gelişkin bir durumda olmasına yol açmıştır. Küresel olarak 120'den fazla limanda 195 adet amonyak tesisi bulunmaktadır (International Energy Agency, 2022, s. 135). Amonyakın zehirli bir madde olması gibi bir olumsuz yönü olmasına karşın yaygın kullanımı sayesinde depolaması, taşınması ve kullanımında risklerin nasıl azaltılacağı, nasıl tedbirler alınacağı bilinmektedir.

Küresel amonyak ticareti 2020 itibariyle 20 milyon tonluk bir hacme sahiptir ve bunun çoğunluğu gübre ticareti kaynaklıdır. Bu 20 milyon tonluk ticaret hacminin 4 milyonluk kısmı Avrupa Birliği ülkelerine yapılmaktadır. Hali hazırda Avrupa Birliği sınırları içerisinde 18 adet amonyak terminali bulunmaktadır. Bu altyapı amonyakın hidrojen enerjisi taşıyıcısı olarak da kullanımında da kolaylık yaratacak bir durumdur. Altyapıda çok ciddi olmayan güncellemeler ve düşük maliyetli yatırım ile işler hale getirilmesi mümkündür (International Energy Agency, 2022, s. 257).

Küresel amonyak ihracatçısı ülkelere bakıldığında oluşan tablo halen fosil kaynakların ağırlığına işaret etmektedir. 2021 yılı verilerine göre Rusya Federasyonu toplam küresel ihracatın %17.3'ünü gerçekleştirirken, Trinidad ve Tobago %16.8, Suudi Arabistan %15.1 ve Endonezya %8.64'ünü gerçekleştirmiştir (OEC World, (2023). Temiz hidrojen amonyak üretimindeki eğilimi değiştirebilecek bir enstrüman olabilir.

4.3. Doğal Gaz Şebekesine Karışım

Yeşil hidrojene geçişte bir başka önemli adım doğal gaz şebekesine karışımıdır. Yüksek miktarda hidrojen naklinde var olan doğal gaz altyapısı kullanılarak yahut şebekede bazı güncellemeler yapılması suretiyle hidrojen nakli sağlanabilir. Doğrudan bir hidrojen altyapısı oluşturmak çok yüksek maliyetlere yol açabileceği için bu şekilde bir yumuşak geçiş uzun vadeli yatırıma olanak sağlayabilir ve bir hidrojen piyasası oluşumuna ön ayak olabilir. Yerel tüketiciler için uygun dolun tesisleri üzerinden kamyonlarla nakil sağlanabilir. Bu da hem yerel Pazar oluşumunu sağlayacaktır. Tüm bu adımlar kimi coğrafyalarda arz fazlası kimi coğrafyalarda talep fazlası oluşturacak, ihracat ve ithalatın yapıldığı, yerelden küresele doğru bir sirkülasyon yaratacak ve her çapta tüketici için üretim ve lojistik sağlanarak bu şekilde

bir hidrojen piyasası oluşumu ortaya çıkacaktır (The International Renewable Agency, 2019, s. 30).

Düşük karbonlu, yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretme amacıyla bir araya gelen 32 adet enerji alt yapı firması girişimi olan (European Hydrogen Backbone, (2023) Avrupa Hidrojen Omurgası İnisyatifinin hesaplamalarına göre hali hazırda var olan boru hatlarını dönüştürmenin maliyeti yeni boru hatları inşasına göre %21-33 daha düşük olacaktır. Almanya Dönüşüm Sistemi Birliği hesaplamalarına göre ise yeni boru hattı inşası 9 kat maliyetlidir (International Energy Agency, 2021, s. 148). Temmuz 2021'de Hollanda'da yapılan bir çalışmaya göre ise bu oran 4 mislidir. Benzer bir oran Danimarka-Alman Hidrojen Network'ü tarafından tespit edilmiştir. Bu sebeple enerji dönüşümünde yeni boru hatları inşası yerine doğal gaz boru hatlarının dönüşümü daha mantıklı görünmektedir (International Energy Agency, 2021, s. 149).

Doğal gaz hatlarında hidrojen kullanımında ilk adım doğal gaz şebekesine hidrojenin karıştırılmasıdır. Bununla ilgili dünya üzerinde çeşitli denemeler görülmüştür. Şebekeye ne oranda hidrojen enjekte edilebileceği test edilmektedir. Ancak bu yöntemin bazı soru işaretleri mevcuttur:

- Hidrojenin enerji yoğunluğunun düşük olması karışım durumunda iletilen gazın enerji içeriğini düşürecektir. %3'lük bir karışım enerji içeriğini %2 düşürecektir,
- Hidrojen çok yanıcı bir madde olduğu için ve alevi parlak olmadığı için risk içermektedir. Yüksek miktarda karışımlarda bu riski azaltıcı önlemler alınmalıdır,
- Hidrojen karışımının bir üst limiti olacaktır. Bu limit ise olay bazında tespit edilebilir (International Energy Agency, 2019, s. 71)

Bazı yöntemlerde yüksek oranlı karışım mümkündür. Örneğin polietilen boru hatlarında %100 karışım dahi mümkündür. Benzer şekilde tuz mağaralarında herhangi bir düzenleme, ek yatırım olmaksızın hidrojen depolanabilir. Ancak belirtmek gerekir ki sanayi alanındaki aletlerin ne oranda karışıma izin vereceği henüz test edilmemiştir (International Energy Agency, 2019, s. 71).

Hidrojenin doğal gaz sistemine enjekte edilmesi konusunda farklı ülkelerde farklı oranlarda denemeler olmuştur. Her bir ülkenin teknik şartları ve altyapı

durumları farklıdır, bu da farklı oranlarda karışıma yol açmakta ve olay bazında değerlendirilme yapılması gereğini ortaya koymaktadır (Boudellal, 2018, s. 110). Ülke bazında farklı oranlarda denemeler yapılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken konu, pilot bölgeler seçilip buralarda nispeten uzun dönemli ve farklı oranlarda karışım denemeleri yapılmasıdır. Ayrıca karışım oranlardaki farklılıklar ülkeler arası gaz işbirliği konularında sıkıntı yaratabilecektir. İş birliği olan ülkelerin şebekelerinde bir uyum değerlendirmesi yapılması gerekebilir.

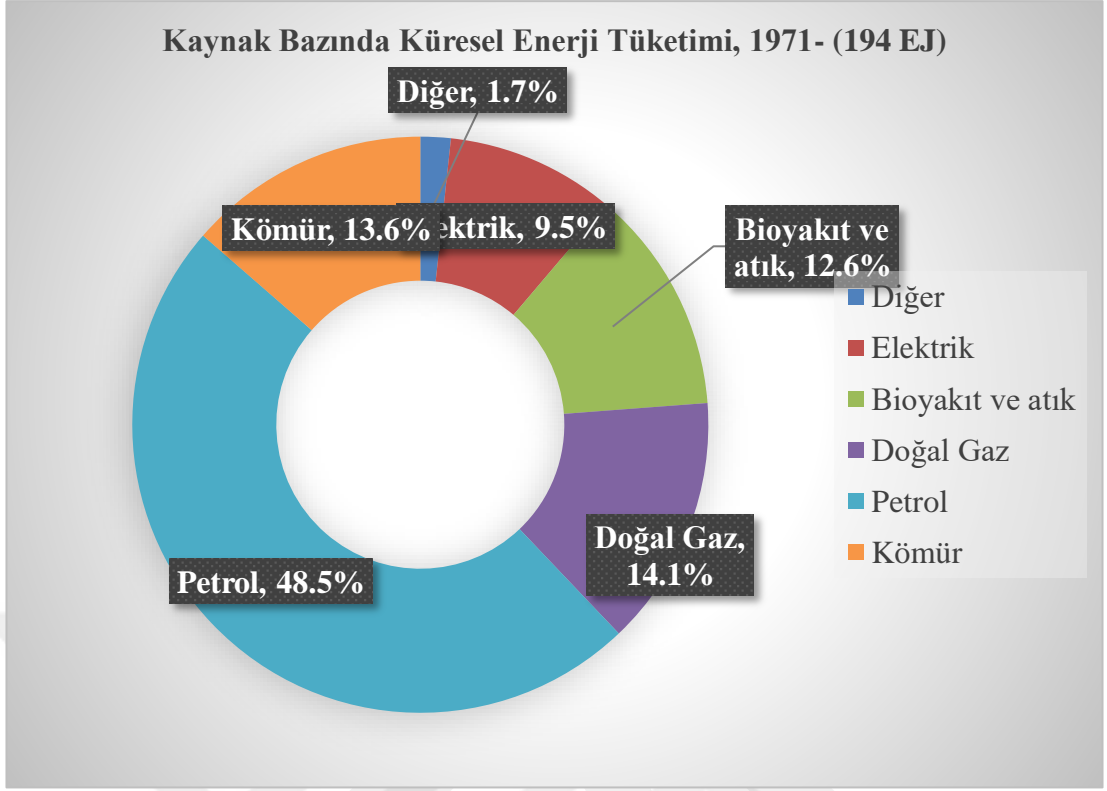
Birleşik Krallık 2023’de %20 karışım denemesi yapma kararı almıştır, Slovak EUSTREAM firması yine 2023’de %5’lik karışım deneyecektir, Yunan White Dragon firması oran açıklamamakla beraber hidrojen karışım denemesi yapacağını açıklamıştır, Kogas isimli Kore firması da 2026 yılına kadar %20’lik karışım denemeyi planlamaktadır, Danimarkalı Energinet firması %15’i test etmiştir ve karışımın %25’e kadar artırılmasını test etmeyi planlamaktadır (International Energy Agency, 2022, s. 116). REPowerEU projesi çerçevesinde Avrupa’da 2030’a kadar %3’e varan oranda bir karışım önerilmektedir (International Energy Agency, 2022, s. 115).

BÖLÜM 5. ENERJİ KAYNAKLARININ KÜRESEL DAĞILIMI, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

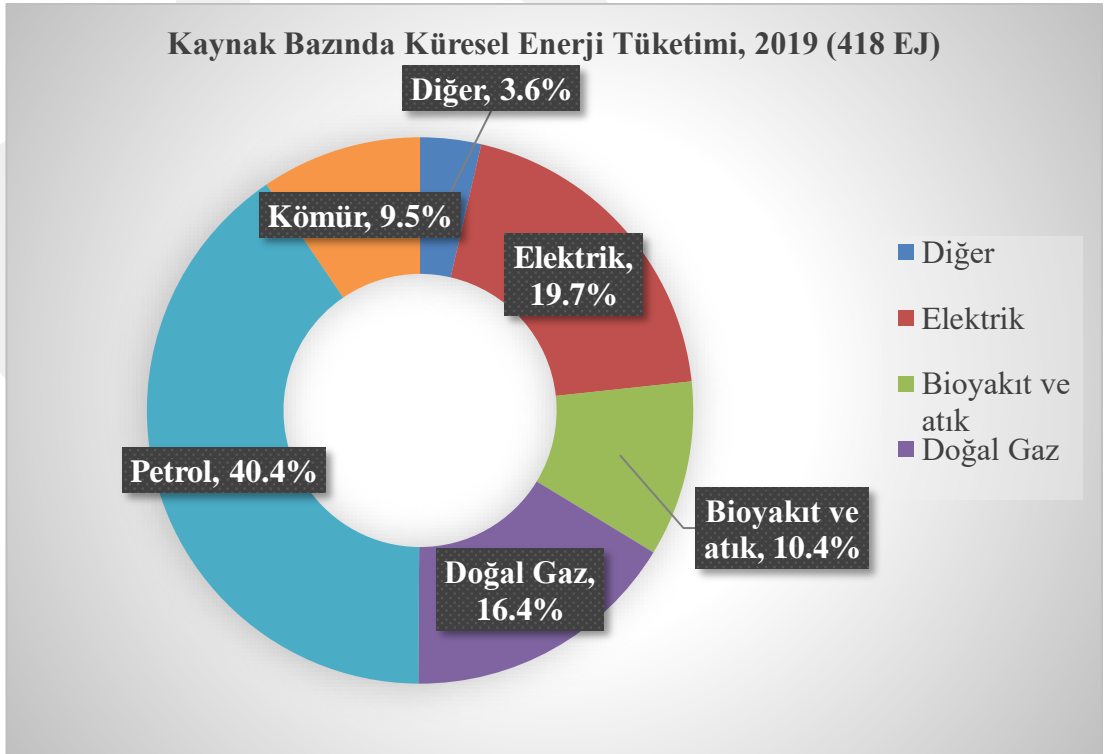
Dünya nüfusu, artma hızı düşmekte olsa da büyümeye devam etmektedir. 1973 yılı yıllık büyüme hızı %2, 1974 yılı için 1.9 iken 2020’de bu oran %1 ve 2021’de 0.9’dur (The World Bank, (2023)). Rakamsal olarak bakıldığında 1970 yılında dünya nüfusu 3.69 milyar iken, 1973 yılında 3.92 milyar olan rakam 2020’de 7.82 milyar, 2021 yılında ise 7.89 milyara çıkmıştır ki bu yaklaşık %100 oranında bir artışa işaret etmektedir (The World Bank, 2023). 1973-2021 tarih aralığında şehirli nüfus %37’den %56’ya çıkmış (The World Bank, (2023)) ve kilometrekare başına yoğunluk ise 1973’de 30’dan 2020 yılında tam iki katına, 60’a yükselmiştir (The World Bank, (2023)). Veriler gösteriyor ki dünya nüfusu, özellikle de şehirli nüfus, büyümeye devam etmektedir. Şehirleşme ile paralel olarak sanayi de büyümektedir. Tüm bunların ışığında enerji ihtiyacının arttığı gözlemlenmektedir.

Tablo 1: Küresel Kaynak Bazında Toplam Enerji Tüketim, 1971-2019 (EJ)
(International Energy Agency, 2021, s. 34)

Küresel Kaynak Bazında Toplam Enerji Tüketimi, 1971-2019 (EJ)											
Diğer	2,9	3,9	5,1	6,8	14,2	12,2	10,8	11,4	12,4	13,1	15,1
Elektrik	15,8	19,5	24,5	28,9	34,9	39,1	45,7	54,5	64,4	72,9	82,3
Biyoyakıt ve atık	23,5	25,2	27,9	30,7	31,8	34	36,7	38,3	40,5	41,9	43,4
Doğal Gaz	24,4	27,9	34,1	36,4	39,5	42	46,9	50	56,3	59,5	68,4
Petrol	83,6	92,3	102,6	99,4	109,1	117,2	130,5	144,2	150,6	160,3	169
Kömür	26,6	26,8	29,4	31,7	31,5	27,6	22,7	34,5	44,3	46,1	39,8
Yıllar	1971	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019

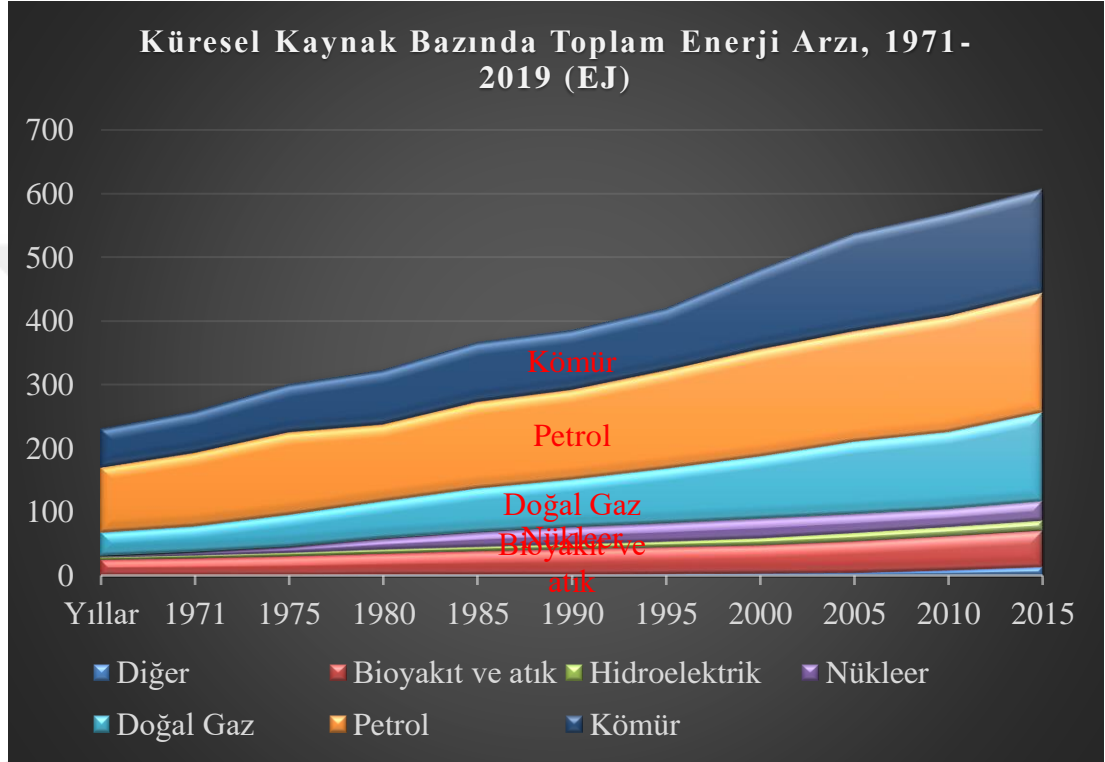


Şekil 2: Kaynak Bazında Küresel Enerji Tüketimi, 1971 (EJ)
(International Energy Agency, 2021, s. 34)



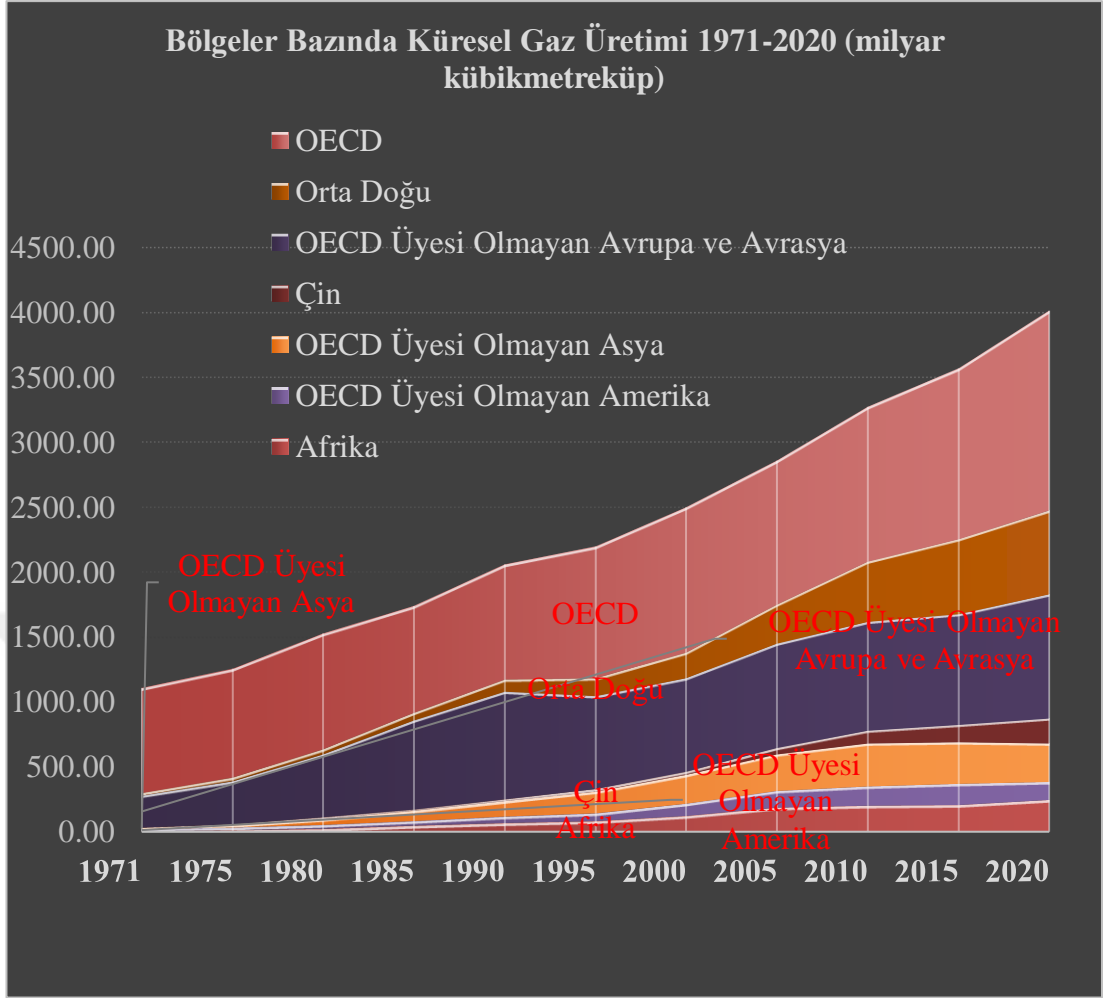
Şekil 3: Kaynak Bazında Küresel Enerji Tüketimi, 2019 (EJ)
(International Energy Agency, 2021, s. 34)

Tablo 1’de görülen Uluslararası Enerji Ajansının 2021 verilerine göre küresel olarak hemen hemen tüm enerji kaynaklarının tüketimi düzenli olarak artış göstermektedir. Bu artışa karşılık petrol ve kömürün payının azaldığı ve elektriğin arttığı görülmektedir (International Energy Agency, 2022, s. World Total Final Consumption by Source, 1973 to 2019). Elektriğin büyük kısmı, başta kömür olmak üzere halen fosil yakıtlar ile üretilmektedir.



Şekil 4: Kaynak Bazında Küresel Enerji Arzı, 1971-2019 (EJ)
(International Energy Agency, 2021, s. 6)

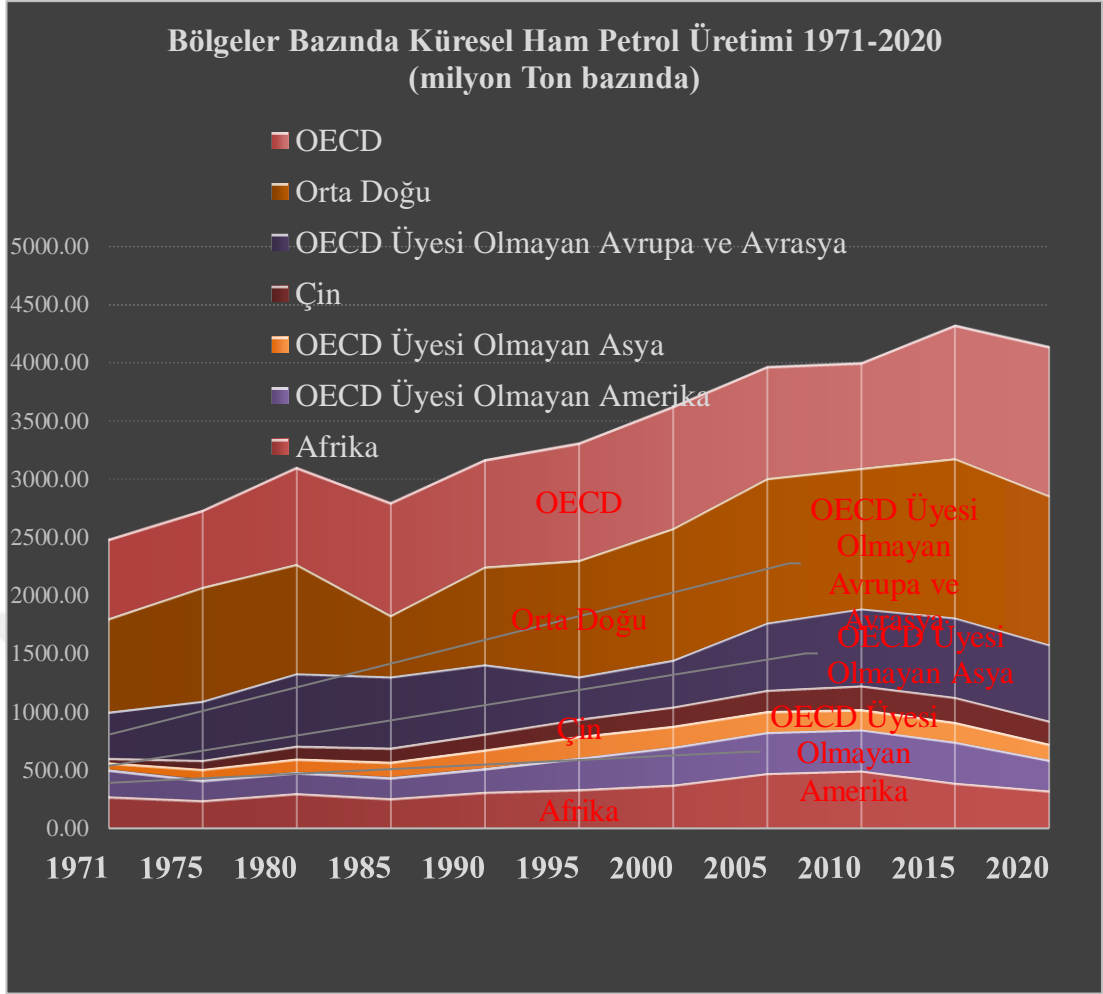
Şekil 4’deki enerji arzına bakıldığında da benzer bir tablo görünmektedir. Toplam enerji arzının payları yıllar içinde değişse de, yaklaşık %81’lik kısmı halen fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (International Energy Agency, 2022, s. World Total Energy Supply by Source, 1971-2019).



Şekil 5: Bölgeler Bazında Küresel Gaz Üretimi 1971-2020 (bcm)

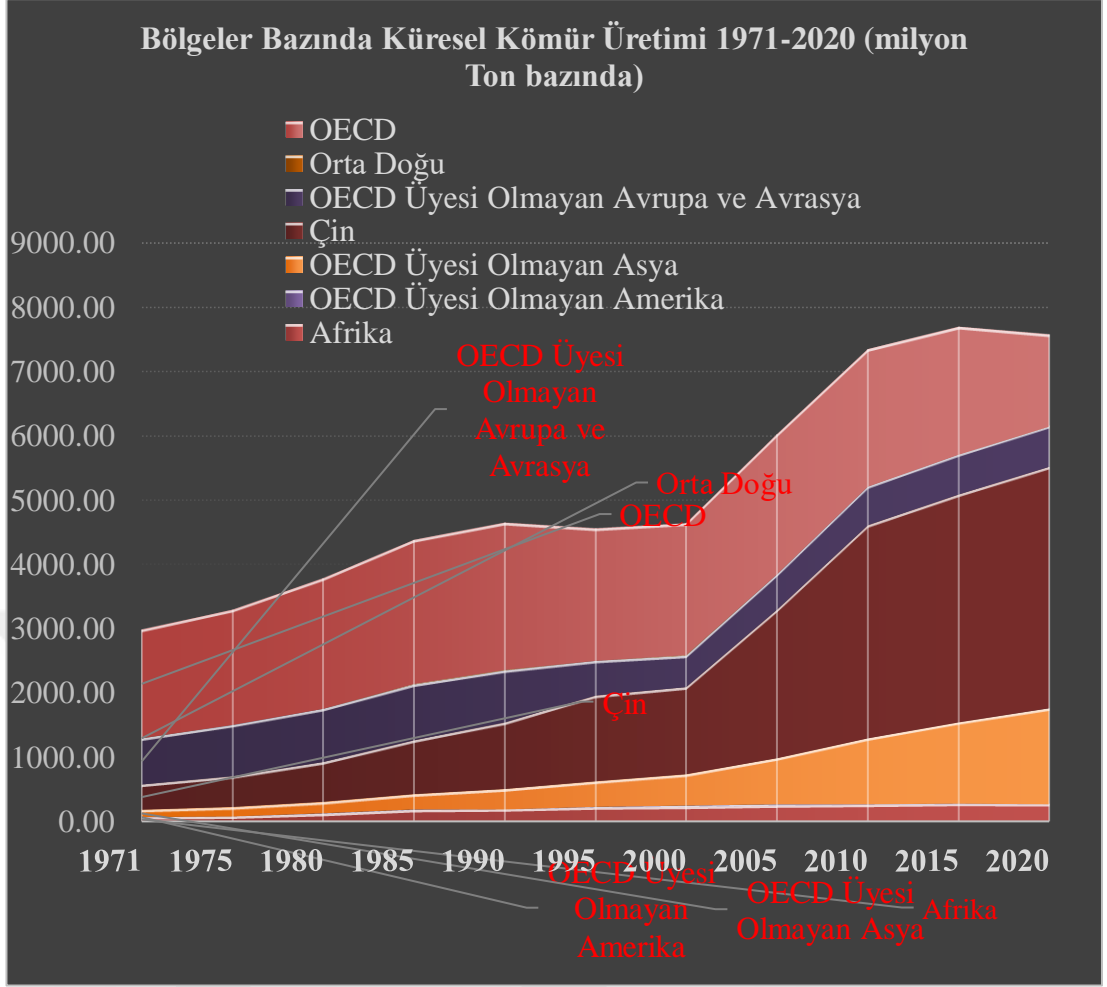
(International Energy Agency, 2021, s. 14)

Yakıtlar bazında bakıldığında da görünüm, genel durumu teyit eder niteliktedir. Doğal gaz üretimi 1971 yılından bu yana sürekli olarak artış göstermektedir. Yaklaşık 50 yıllık bir sürede 4 misline ulaşan bir üretim artışı görülmektedir (International Energy Agency, 2022, s. World Natural Gas Production by Region, 1971-2019, billion cubic metres, bcm)



Şekil 6: Bölgeler Bazında Küresel Ham Petrol Üretimi 1971-2020 (Mt)
(International Energy Agency, 2021, s. 12)

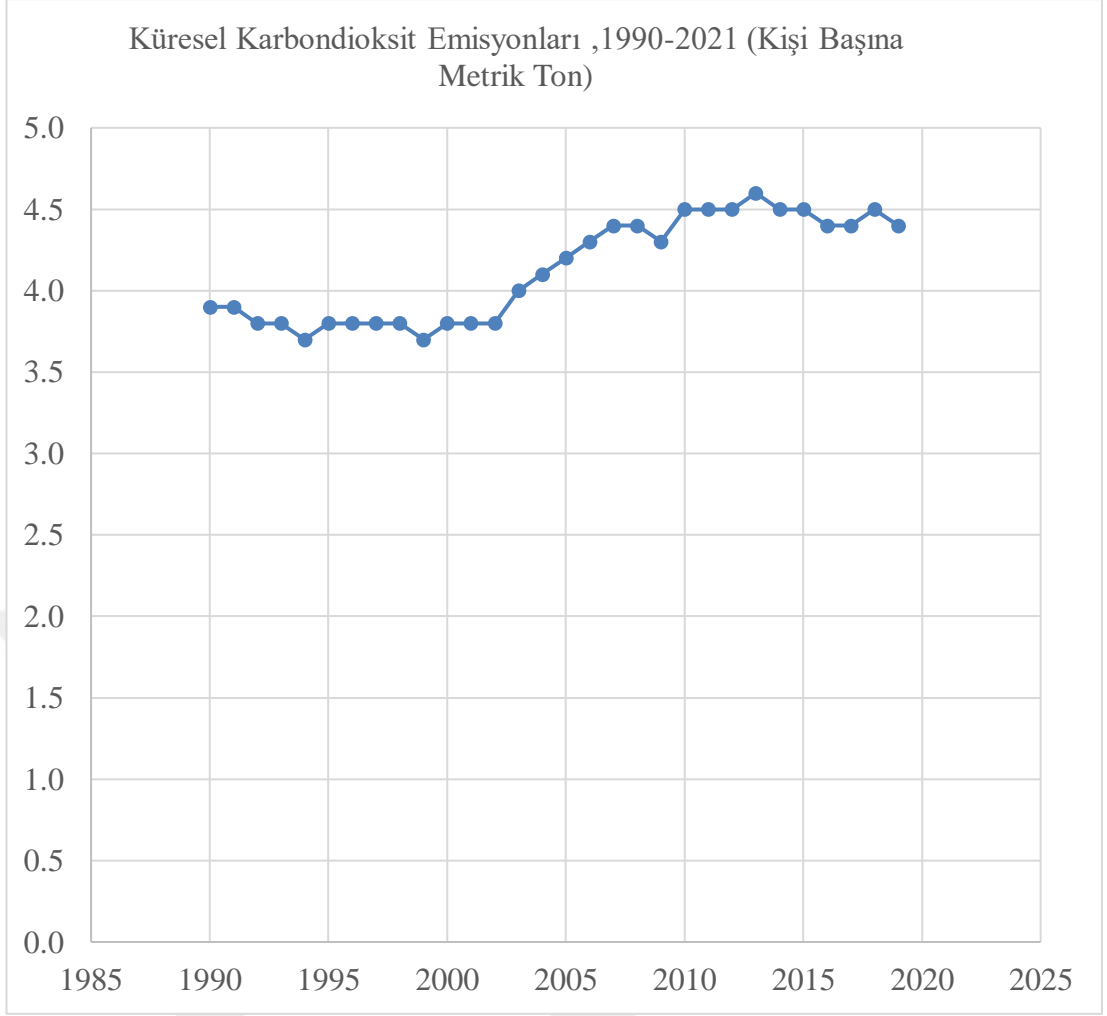
Keza ham petrol üretimindeki artış doğal gaz kadar yüksek olmasa da aynı zaman sürecinde devam etmektedir (International Energy Agency, 2022, s. World Crude Oil Production by Region, 1971-2019 (Mt)).



Şekil 7: Bölgeler Bazında Küresel Kömür Üretimi 1971-2020 (Mt)
(International Energy Agency, 2021, s. 16)

Aynı şekilde kömür üretiminin artış hızı azalsa da 1971-2019 sürecinde dünyada kömür üretimi artmaya devam etmektedir. Kömür üretiminde özellikle Çin'in payı dikkat çekmektedir (International Energy Agency, 2022, s. 411).

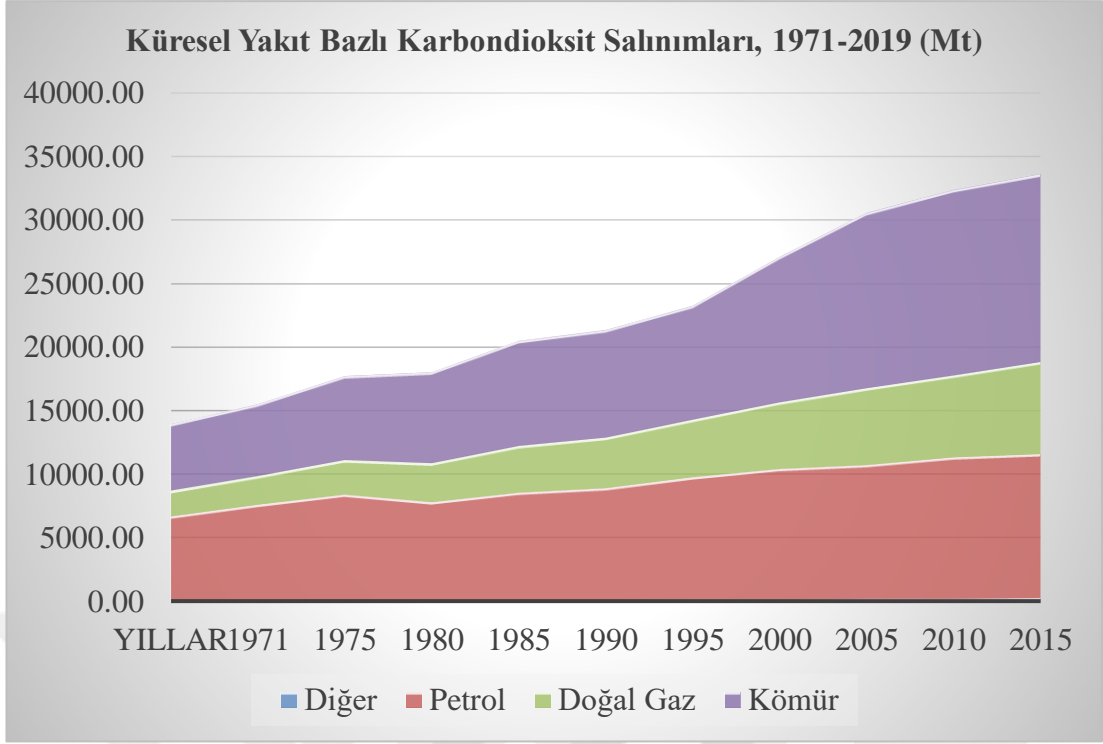
Fosil yakıt üretiminin yıllar bazında artış göstermeye devam etmesi üretici ülkelerin ekonomilerinin gücünün devamı, ithalatçı ülkeler içinse bağılılığın devamı anlamına gelmektedir. Bu aynı zamanda karbon emisyonlarının düşürülememesi anlamına gelmektedir.



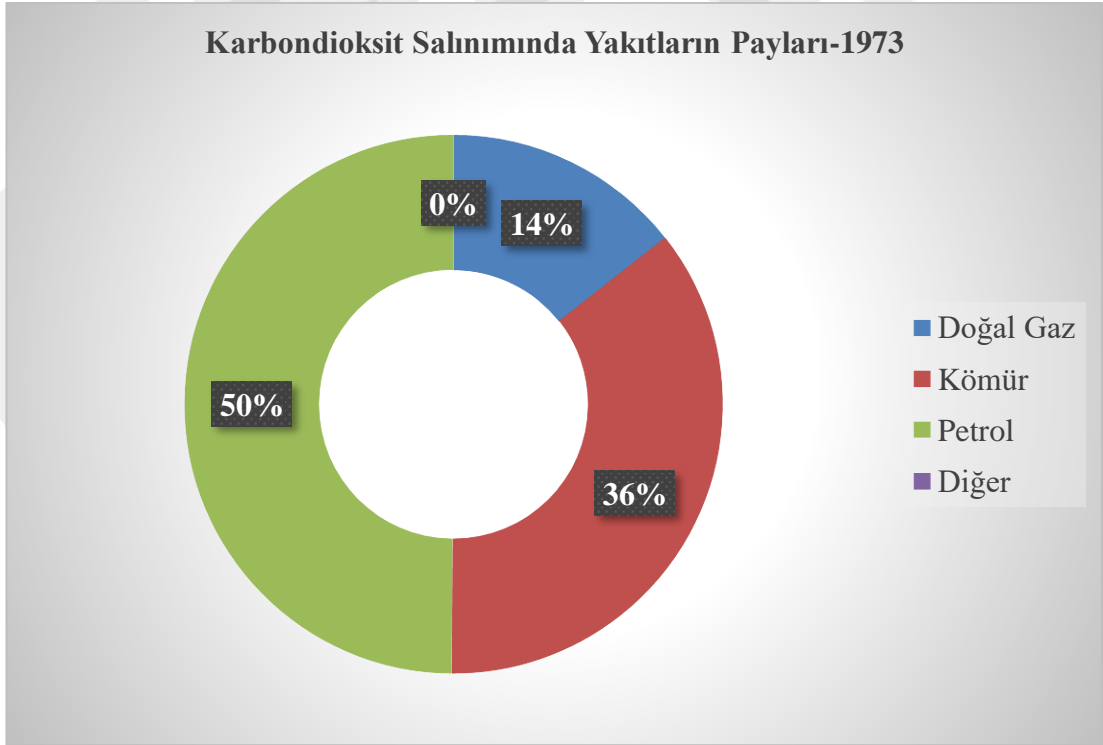
Şekil 8: Kişi başına karbon dioksit emisyonları, 1990-2019 (Kişi başına metrik ton)
Dünya Bankası verisi

Dünya Bankası karbon dioksit emisyon verileri kontrol edildiğinde ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeyleri ile doğrudan bir bağlantı olduğu söylenebilir. Ülkeler bazındaki verilere göre Angola'nın kişi başı karbon dioksit emisyonu 0.9 Metrik ton iken, Kamerun'da 0.3, Kosta Rika'da 1.7'dir. Diğer yandan Danimarka'da 5.8, Çin'de 7.4, Almanya'da 8.6 metrik tondur (World Bank, (2022)).

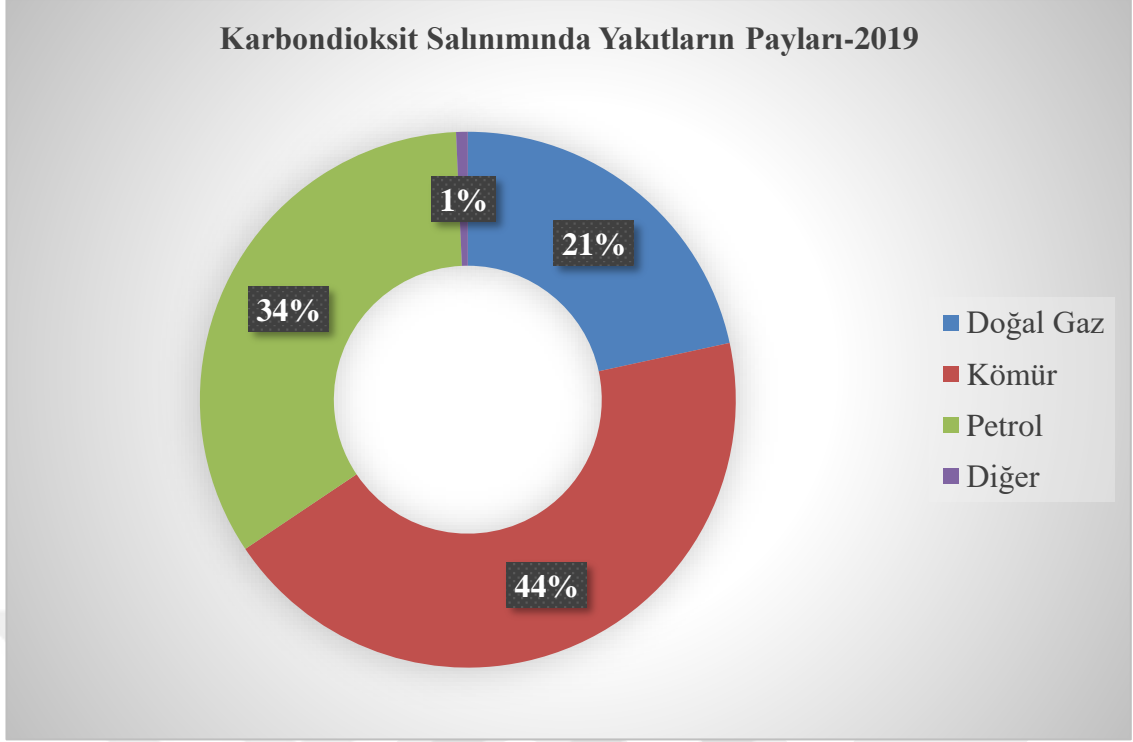
Uluslararası Enerji Ajansı Global Enerji İncelemesi 2021 raporuna göre 2020 yılında Kovid pandemisi sebebiyle dünya çapında %5.8 düşen karbon dioksit emisyonları 2021 itibariyle yeniden artış trendine girmiştir. Enerji kaynaklı karbon dioksit emisyonları 2008 yılındaki ekonomik krizden bu yana görülen en yüksek yıllık artış olan 400 Mt'a ulaşmıştır. Bu rakam 2019'daki tepe noktasının %1.2 üzeri anlamına gelmektedir (International Energy Agency, 2021).



Şekil 9: Yakıt Bazlı Dünya Karbondioksit Salınımları, 1971-2020 (Mt)
(International Energy Agency, 2021, s. 54)



Şekil 10: Karbondioksit Salınımında Yakıtların Payı-1973 (Mt)



Şekil 11: Karbondioksit Salınımında Yakıtların Payı-2019 (Mt)

(International Energy Agency, 2021, s. 54)

(International Energy Agency, 2022, s. Karbondioksit Emisyon Verileri 1973-2019)

Dünya Enerji Ajansı karbondioksit emisyon verilerine baktığımızda 1973'den 2019 yılına doğru dağılımın petrolden doğal gaz ve kömüre doğru kaydığını ancak genel anlamda bakıldığında tamamen fosil yakıtlar kaynaklı olduğu görülmektedir. Ayrıca 46 yıllık bir tarih aralığında 15,461 Mt olan salınım miktarı 2 mislinden fazla artarak 33,622 Mt'a ulaşmıştır (International Energy Agency, 2021, s. 54)

5.1. İklim Değişikliği Hedefleri Doğrultusunda Yenilenebilir Enerji Kaynakları

İklim değişikliği ile ilgili hedefler için yenilenebilir enerji tesislerinde ölçek etkisi öne çıkmaktadır. Avrupa ve Kuzey Amerika'da kapasite 3-4 misli, Asya'da 4 misli, Afrika ve Ortadoğu'da daha da fazla büyümelidir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 64). Güneş panellerinin kapasitesinin 2030'a kadar yedi misli, 2050'ye kadar yirmi misli büyümesi beklenmektedir. Bu kapasitenin 2030'a kadar yarısını, başta Çin ve Hindistan olmak üzere, Asya kıtasının oluşturması beklenmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 66). Kuzey Afrika ile Avrupa arasında bir enerji entegrasyonu ve ticaret şebekesi çalışması

bulunmaktadır. Bu organizasyon her iki taraf için de faydalı görünmektedir. Bu anlamda Avrupa Birliği (AB) ülkelerinden Afrika'ya güneş panelleri yatırımları artmaktadır (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 66).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tahminlerine göre yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik üretimi 2020-2026 arasında %60 büyüyerek 4,800 GW'a ulaşacaktır. Bu dönemdeki büyümenin büyük kısmı (%43) Çin tarafından gerçekleştirilecektir. Avrupa Birliği (AB), Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Hindistan eklendiğinde bu tüm küresel kapasitenin %80'i olacaktır (International Energy Agency, 2021, s. 14)

Paris Anlaşması 1.5 derece hedefi doğrultusunda küresel hidroelektrik kapasitesi de 2030 yılına kadar %30 büyümek durumdadır. Bu kapasitenin %46'lık oranının başta Çin, Hindistan ve Rusya Federasyonu olmak üzere Asya kıtasında oluşturulacağı öngörülmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 67).

Yenilenebilir kaynakların elektriğe dönüştürülmeden taşımacılıkta, binalarda ve bazı sanayi alanlarında kullanımı da artacaktır. Son kullanıcı da doğrudan yenilenebilir enerji kullanım oranı 2019'da %19 iken, iklim hedefleri doğrultusunda 2030'a kadar iki misline çıkmalıdır (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 72). 2019 yılında sanayide kullanım oranı olan %12, 2030 yılına kadar %19'a çıkmalıdır (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 73).

Rüzgar enerjisi IRENA tahminlerine göre 2030'a kadar en önemli enerji kaynaklarından birisi olacak ve toplam elektrik ihtiyacının %24 gibi ciddi bir oranını karşılayacaktır. İklim hedefleri doğrultusunda 2030'a kadar kurulu rüzgar enerjisi kapasitesinin dört misli büyümesi beklenmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 65).

McKinsey'in yaptığı projeksiyonda yenilenebilir enerji kaynakları 2050 yılına kadar tüm enerji sistemi içerisinde %80-90'lık bir paya sahip olacaktır. Olumlu senaryoda 15 yıl içinde bu payın %29'dan %60'a ulaşılması öngörülmektedir. Bunun büyük kısmını ise düşen maliyetler sayesinde güneş ve rüzgar enerjisinin oluşturulacağı öngörülmektedir (McKinsey&Company, 2022, s. 12).

5.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Konusunda Engeller

2020 yılı başından 2021 sonuna kadar olan dönem değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji sektöründe güneş panelleri ve rüzgar tribünlerinin başlangıç sermayesi ciddi oranda artmıştır. Örneğin çelik %50, alüminyum %80 ve bakır %60 artış gösterirken, nakliye bedelleri de 6 misli artmıştır. Bu da güneş ve rüzgar santrallerinin kurulum maliyetlerinin %25 artışına işaret etmektedir. Bu durum çok sayıda projenin askıda kalmasına neden olmuştur. Özellikle de finansal gücü kısıtlı, küçük firmaların projelerinin... (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 17).

Gerek rüzgar enerjisinde gerekse güneş enerjisinde altyapı ve şebeke yetersizlikleri, regülasyon ve düzenlemelerde eksiklikler ve boşluklar, nitelikli personel ve siyasi irade yetersizlikleri gibi diğer engeller de bu alanda büyümenin önünde engel olarak görülmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 65,66).

Buna karşılık Brent petrol varil fiyatı 2020 Ocak (63.65 Dolar) 2022 Ağustos (100.45 Dolar) arası %58 artarken (US Energy Information Administration, 2023), aynı dönemde doğal gaz fiyatı %290'lık bir artış göstermiştir (Nasdaq, 2023) Bu durum yenilenebilir enerjideki maliyet artışlarına karşın bu alandaki talebi diri tutmaya devam etmektedir (United Nations, (2022).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünyada fosil yakıtlara göre daha dengeli dağılması enerji güvenliğine katkı sağladığı gibi, fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalardan uzaklaşarak ekonomik güvenliğe de katkı sağlamaktadır. Bunu yanı sıra yenilenebilir enerji teknolojileri çok sayıda yeni iş alanı yaratmakta, çevre korumasına, cinsiyet ayrımının azaltılmasına, sağlık ve eğitim alanlarına da dolaylı katkı yapmaktadır Yenilenebilir enerji kaynakları sera gazı salınımını düşürerek ekolojik dengenin değişiminde yavaşlamaya sağladığı katkı yanında fosil yakıtların insan sağlığına verdiği zararların bertaraf edilmesinde de faydalı olmaktadır (Owusu & Sarkodie, 2016, s. 8,9).

Yenilenebilir kaynakların enerji sektöründeki etkisi hızlı şekilde artmaktadır ve bu ivme son yıllarda daha da hızlanmıştır. Son 10 yılda yenilenebilir kaynakların

kapasitesi %130 artarken, yenilenebilir olmayan kaynaklar %24 artmıştır. Buna karşın 1.5 derece hedefine ulaşılabilmesi için 2030 yılına kadar hali hazırda kurulu kapasitenin 3 misline çıkarılması gerekmektedir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 42).

Hidroelektrik halen yenilenebilir kaynaklar arasında en büyük paya sahiptir ancak son 10 yıllık dönemde güneş ve rüzgar enerjisi en hızlı büyüyen yenilenebilir kaynaklar olmuştur (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 42).

Yenilenebilir kaynaklara dayalı bir enerji sistemi hem maliyet, hem enerji güvenliği hem de iklim güvenliği sorunlarını aynı anda çözebilir (The International Renewable Energy Agency, 2022, s. 27).

5.3. Dünyada Hidrojen

Geçmişte hidrojenin kullanımı konusunda bazı başarısız denemeler olmuştur. Ancak son yıllarda güneş ve rüzgar teknolojilerindeki ilerlemeler, hidrojen pilleri, hidrojenli araçlar konusundaki gelişmeler bu alanda önemli adımlar atılmasına yardım etmiştir. Bununla beraber hidrojenin enerji sistemine adapte edilmesi, sanayide ve evlerde kullanımı konusunda küresel adımlar atılması gerekmektedir. Bu anlamda birçok farklı ülkelerde ciddi çalışmalar ve yatırımlar yapıldığı gözlemlenmektedir.

Hidrojen konusu özellikle son üç yılda yoğun şekilde gündemi işgal etmektedir. Haziran 2019'da yalnızca Japonya ve Güney Kore'nin bir hidrojen stratejisi, Fransa'nın ise hidrojen kullanım planı vardı. Sonraki süreçte Eylül 2021'e kadar AB Komisyonu ile beraber 13 ülke hidrojen stratejilerini açıklamıştır (International Energy Agency, 2021, s. 25). McKinsey raporuna göre küresel hidrojen talebinin 2050'ye kadar beş misli artacağı, hali hazırda neredeyse %100 gri hidrojen olan üretimin ise 2035'e kadar %60 oranında yenilenebilir kaynaklardan üretileceği öngörülmektedir (McKinsey&Company, 2022, s. 17).

Ülkelerin stratejileri incelendiğinde görülüyor ki taşıma sektörü ve sanayi sektörleri öne çıkmaktadır. Ulaşımında özellikle orta büyüklükte ve ağır yük taşımacılığının altı çizilirken Japonya ve Güney Kore'de kişisel otomobillerin kullanımına önem verilmektedir. Bazı hükümetler hidrojen ve amonyakın denizcilikteki kullanımını önemserken, daha az sayıda hükümet havacılıkta

kullanılmak üzere sentetik yakıtların üzerinde durmaktadır. Almanya demiryollarında hidrojeni yakıt olarak kullanmaktadır (International Energy Agency, 2021, s. 25).

Sanayiye dönüldüğünde her ülke kendi ana sanayi kolunda hidrojeni kullanabilecektir. Örneğin Şili’de ve İspanya’da kimya sektörü, Japonya çelik sektöründe hidrojen kullanımı planlanmaktadır (International Energy Agency, 2021, s. 25). Sıfır karbon çelik üretimi 2021’de İsveç’te başlamıştır. Cam, seramik ve çimento üretiminde yeşil hidrojen kullanımı konusunda da gelişmeler olmaktadır (International Energy Agency, 2021, s. 5,6).

Japonya hidrojen üretimi konusunda öncü ülke konumundadır. ABD ve Almanya’da onu takip eden ülkeler arasındadır. Avrupa’da sadece sanayi alanına değil, aynı zamanda taşımacılık alanında da hidrojen yatırımı yapılmaktadır. AB İnovasyon Fonu hidrojen altyapısının oluşumu ve temiz hidrojen teknolojilerine 2030 yılına kadar 10 Milyar EUR yatırım yapmayı planlamaktadır. AB yeşil hidrojene ilişkin stratejisi üç aşama üzerinden planlanmıştır. 2020-2024 arası olan ilk aşamada 1 milyon ton yeşil hidrojen üretebilecek kapasitede, minimum 6 GW’lık elektrolizörlerin kurulması yer almaktadır. 2030’a kadar olan ikinci aşamada 40 GW’lık elektrolizörlerle 10 milyon tona kadar yeşil hidrojen üretimi ve yeşil hidrojenin enerji sistemine entegrasyonu yer almaktadır. 2050 yılına kadar olacak son aşamada ise sıfır karbon hedefi doğrultusunda yeşil hidrojen altyapısının tamamlanması ve tüm alanlarda aktif kullanılır hale gelmesi planlanmaktadır (Kovac, Paranos, & Marcus, 2021, s. 10025).

5.3.1. Japonya

Hidrojen teknolojilerinde dünyanın en önde gelen ülkelerindedir. 2017 yılında hidrojen stratejisini açıklayan dünyada ilk ülke oldu (Euronews, (2021). Enerji arzı güvenliği ve sürdürülebilirlik anlamında hidrojene büyük önem verilmektedir. Hem sanayide hem ulaşımda hidrojen kullanılmaktadır. Hem sıkıştırılmış gaz olarak, hem sıvılaştırılmış formatta kullanılan hidrojen, hem boru hatları yoluyla hem de kara yoluyla hidrojen nakledilmektedir (Kovac, Paranos, & Marcus, 2021, s. 10028). Japonya’nın Kobe şehrinde, yeşil hidrojenden hastane ve trenler için ısı ve elektrik üretilmektedir. Ülke 2030 yılına kadar sera gazı salınımlarını %46 oranında düşürüp, 2050’ye sıfır karbon salınımı ile ulaşmayı hedeflemektedir. Dünyanın en büyük ikinci

sıvı hidrojen tankına sahip Japonya depolama maliyetleri ve nakil maliyetlerini de düşürme konusunda çalışmalar yapmaktadır (Euronews, (2021)).

5.3.2. Çin

Dünyanın en büyük ikinci ekonomisi olan Çin hızlı bir şekilde büyümektedir, hızlı büyüme de hızlı bir şekilde kirlenmeyi gündeme getirmiştir. Özellikle büyük şehirlerdeki geniş nüfuslar konusunda yapılan çalışmalar yeşil hidrojenin öneminin anlaşılmasına yol açmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle güneş enerjisine ciddi yatırımlara yapan Çin Halk Cumhuriyeti yeşil hidrojenin güneş enerjisinden üretilmesi konusunda çabalarını sürdürmektedir. Çin'in ekonomik büyüklüğü yenilenebilir enerji ve yeşil hidrojen konularında da ölçek ekonomisi uygulama şansı, böylece de maliyetlerin düşürülmesi şansı yaratmaktadır. Çin'in bu alana yaptığı yatırımlar ve maliyet düşüşleri de otomatik olarak tüm dünyadaki maliyetlere olumlu anlamında etki etmektedir (Kovac, Paranos, & Marcius, 2021, s. 10030).

İklim değişikliğine ilişkin olarak Çin Halk Cumhuriyeti Başkanı Xi Jinping Eylül 2020'de BM genel kurulunda Çin'in 2060'dan önce karbon sıfır olma hedefinden bahsetmiştir. Bu da yeni enerji yapısının yenilenebilir kaynaklara dayalı ve üretilen enerjinin depolanabildiği bir yapıyı gerektirmektedir. Ancak Çin genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunduğu coğrafyalar ile yükleme tesisleri arasında bir uyumsuzluk bulunmaktadır. Kuzey Batı Çin rüzgar enerjisi kaynaklarının %90, güneş enerjisi kaynaklarının %80'ine sahipken, merkez ve doğudan yer alan yükleme tesislerine 1000 ile 4000 km mesafededir. Dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynaklarında bir istikrar görünmemektedir Ulusal Enerji İdaresi'ne göre Çin'in yenilenebilir kaynaklardan enerji ihtiyacı her sene artacaktır ve 2060'da enerji arzının %96'sından fazlası yenilenebilir kaynaklarından sağlanacaktır. Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi konusunda ekonomik açıdan avantajlı olabilmesi için kısa vadede sıvı hidrojen öne çıkmaktadır (Wu, Wu, Zeng, & Yang, 2022, s. 24636).

Çin günümüzde dünyanın en büyük hidrojen üreticisidir ve dünyadaki üretimin yaklaşık üçte birini üretmektedir. Bununla beraber üretimin çoğu kömürden elde edilmektedir. 2030'a kadar yeşil hidrojenin toplam hidrojen üretiminin %15'ine

ulaşması, 2050'ye kadar ise %75'e ulaşması hedeflenmektedir (Noussan, Raimondi, Scita, & Hafner, 2021, s. 14).

5.3.3. Almanya

Yeşil hidrojen dönüşümü konusunda öncü ülkelerden birisi olan Almanya stratejisini iki aşama üzerinden belirlemiştir. İlk aşamada Federal Hükümet hidrojenin üretimi, nakliyesi, hidrojen altyapısının kurulması, hidrojen arzı, inovasyon, eğitim ve uluslararası işbirliklerini içeren 38 adet önlem alacaktır. Bu aşamanın 2023'e kadar tamamlanması beklenmektedir. İkinci aşamada lokal piyasada ve Avrupa piyasasında istikrar sağlanması hedeflenmektedir. Bu bağlamda nakliye ve dağıtım altyapısının uygun olması gerekmektedir (Kovac, Paranos, & Marcus, 2021, s. 10027).

25 Ağustos 2022 itibarıyla Almanya'da beş adet yeşil hidrojen yakıtlı yolcu treni seferleri başlamıştır.. Yılsonuna kadar 14 adet trenin sefere girmesi bekleniyor. Seferlerin başlayacağı Aşağı Saksonya Eyaletinde dizel yakıtlı trenlerin zamanla yeşil hidrojenli olanları ile değiştirilecektir (Euronews, (2022)).

1 Kg hidrojen yakıtının verdiği performans yaklaşık 4.5 Kg dizel yakıtın verdiği performansı verebilmekte ve tüketildiğinde sadece su ve su buharı açığa çıkarmaktadır (Euronews, (2022)).

İlgili devlet destekli demiryolları şirketi ile treni imal eden Fransız Alstom şirketi arasında 93 Milyon Euro'luk anlaşma imzalandı. Almanya'da başlayan hidrojen yakıtlı seferlerin sonrasında Fransa ve İtalya'da da devreye girmesi planlanmaktadır (Euronews, (2022)). İlk hidrojen enerjili tren denemelerine Eylül 2021'de Fransa'da başlanmıştır. Hali hazırda Hollanda, Avusturya ve İsveç'te de testler yapılmaktadır. Bu trenler hem hidrojen hem elektrikle çalışmaktadır. 220 yolcu kapasitesine sahip olan hidrojenli trenler 160 km hıza ulaşabilmektedir. Bu trenler dizel trenlere göre %30 daha maliyetli olmasına karşın daha az onarım ve bakım gerektirmektedir, ayrıca sessiz çalışma gibi bir avantaja daha sahiptir (IICEC, 2021, s. 13,14).

5.3.4. Hollanda

Hollanda’da da doğal gaz kullanımını azaltmak, özellikle yüksek rüzgar potansiyeli üzerinden yeşil hidrojen üretimi hedeflenmektedir. Hidrojen stratejileri Almanya kadar detaylı olmamakla birlikte genel hatları belirlenmiştir. Öncelikle ilgili mevzuatın ve kuralların oluşturulması, sonrasında yeşil hidrojenin kullanımı için maliyetlerin düşürülmesi planlanmaktadır. Maliyet düşürülmesi sonrası yeşil hidrojenin sürdürülebilir şekilde ve büyük ölçekli üretimi, ardından da bölgesel ve uluslararası işbirliklerinin geliştirilmesi ikinci aşamada düşünülmektedir. Maliyet düşürme ve kolaylık açısından rüzgar tribünlerinin elektrolizörler ve yakıt ikmal istasyonları ile aynı bölgede kurulması önerilmektedir (Kovac, Paranos, & Marcius, 2021, s. 10028).

5.3.5. Avrupa Birliği

AB 8 Temmuz 2020’de hidrojen stratejisini “A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe” adıyla açıklamıştır. Stratejide hidrojenin neden önemli olduğu, özellikle iklim anlamındaki katkısı hakkında detaylı bilgiler verilmektedir. Hidrojenin hammadde, yakıt, enerji taşıyıcısı ve depolama amacıyla, aynı zamanda da taşımacılık, sanayi, ev kullanımı ve enerji gibi farklı alanlarda kullanılan bir element olduğunu altı çizilmektedir. Stratejiye göre AB 2050 yılına kadar bir temiz hidrojen ekosistemi oluşturmayı hedeflemektedir. Buna ilişkin bir yol haritası belirlenmiştir. Bu yol haritasına göre yeşil hidrojene geçişteki adımlarda düşük karbonlu hidrojen kullanılabileceği, zamanla yeşil hidrojene geçileceği vurgulanmıştır. Bu noktada özellikle karbonsuzlaşması zor sektörlerin dönüşümünde hidrojenin önemi üzerinde durulmakta ve hidrojen teknolojilerinin gelişimi konusunda Avrupa’nın öncü olacağı belirtilmektedir (European Commission, 2020, s. 2,3,5,21).

5.3.6. Güney Kore

Güney Kore hidrojen konusunda dünyadaki önde gelen ülkelerden birisidir. 2019 yılında “Hidrojen Ekonomisi Yol Haritası” yayınlanırken, 2020 yılında hidrojen kanunu çıkarılarak legal altyapı hazırlanmış oldu. Ülkede hidrojen yakıtlı otomobiller dışında, ağır taşıt üretimi de yapılmaya başlanmıştır ve hidrojen istasyonu sayısı da artmaktadır. Taşıtların yanı sıra enerji alanında, şehirlerin ısınması ve soğutulması konusunda da hidrojen çalışmaları yapılmaktadır. Ancak bu noktada üretilen hidrojenin çoğunluğu fosil yakıtlardan üretilmektedir. Ülkenin hedefi 2040 yılına kadar ülkenin hidrojen talebinin %70’inin yeşil hidrojen ile karşılanmasıdır. Bu da gelecekte bile halen ciddi bir sera gazı emisyonundan bahsedilmesi anlamına gelmektedir. Paris Anlaşması hedeflerine ulaşma anlamında Güney Kore’nin çok daha ciddi önlemler alması gerekmektedir.

BÖLÜM 6. TÜRKİYE’NİN TEMİZ HİDROJEN POTANSİYELİ VE ENERJİ GÜVENLİĞİ KARŞISINDAKİ DURUMU

Paris Anlaşması 22 Nisan 2016 tarihinde Türkiye tarafından imzalanması sonrası 7 Ekim 2021’de Cumhurbaşkanı kararı ile onaylanmıştır. Böylece Türkiye 2053 yılı için sıfır emisyon hedefini ortaya koymuştur (Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, (2023). Türkiye açısından sera gazı emisyonlarının %72’sine yol açan kömürün ikamesi olarak yenilenebilir enerjinin devreye girmesi bu hedef anlamında çok etkili olacaktır. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin iki misline çıkarılması durumunda 2035’e kadar karbon emisyonları %82.8 oranında azaltılmış olacaktır (Göksal, (2022). Elbette bu çapta bir değişiklik için ekonominin bir dönüşümden geçmesi gereklidir. Bu dönüşüm bir yol haritası üzerinden takip edilmesi, kamu-özel sektör iş birliğinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Türkiye aynı zamanda Avrupa ile Ortadoğu ve Asya’daki enerji üretici ülkeler arasında bir geçiş noktasında yer alıyor. Bu özelliği ile Avrupa’nın enerji güvenliğine de katkı yapmaktadır. Rusya-Ukrayna çekişmesinin geçmişte gaz akışını engellediği de düşünüldüğünde günümüzde Türkiye’nin önemi daha da artmaktadır. Güney Enerji Koridorunu ele aldığımızda Türkiye’nin kıymetli bir rolü bulunmaktadır. Bu koridorun üç ayrı kanalı bulunmaktadır. Bakü-Tiflis-Ceyhan boru hattı Hazar petrolünü Ceyhan terminaline kadar getirmektedir. İkinci olarak Rus enerji kaynaklarını Karadeniz üzerinden Türkiye’ye taşıyan Mavi Akım ve son olarak Hazar ve Orta Asya kaynaklarını Avrupa’ya taşıyan Trans Anatolian Boru Hattı (TANAP) yer almaktadır (Yorucu & Özay, 2018, s. 16).

Türkiye 2004 yılı itibariyle Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)’ni imzalamıştır. Buna istinaden her sene sera gazı envanteri hazırlayarak Birleşmiş Milletler’e sunmaktadır. 2021 envanterinde toplam sera gazı salınımlarının 1990’dan 2019’a kadar %130.5 arttığı belirtilmektedir. (Şahin, ve diğerleri, 2021, s. 24). Raporda aynı dönemde nüfusun %49.8 arttığı ekonominin ise %245 oranında büyüdüğü tespit edilmiştir. Bu göstergeler emisyon artışının nüfus ile ama daha çok ekonomik büyüme ile paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şahin, ve diğerleri, 2021, s. 25). Hidrojen bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları ile beraber sıfır emisyon hedefi doğrultusunda çok önemli bir enstrüman olacaktır.

Hidrojenin özellikle yenilenebilir enerjiye dönüşümü güç endüstrilerde büyük katkısı olabilir.

Türkiye’de yurtiçi üretim 2014’den 2019 yılına kadar, çoğunluğu yenilenebilir kaynaklardan olmak üzere, %59 büyümüştür. Ancak bu büyümeye karşın ihtiyaç duyulan enerjinin büyük çoğunluğu halen ithal edilmektedir (International Energy Agency, 2021, s. 21). Petrol ve doğalgazda bu bağımlılık %93 ve %99 seviyelerindedir (International Energy Agency, 2021, s. 11). 2019 itibariyle Türkiye’de üretilen elektriğin %44’ü yenilenebilir kaynaklardan üretilmiştir. Yerli kaynak kullanımı Türkiye için hedeflerden birisidir. SHURA hesaplamalarına göre Türkiye 2030’da toplam elektrik üretiminin %30’unu rüzgar ve güneş, %20 üzerinde bir kısmını ise diğer yenilenebilir kaynaklardan elde edebilecek imkanlara sahiptir (Çolak, Aksoy, & Sanlı, Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi, 2021, s. 12,13).

Türkiye hidrojen konusunda uzun süre sessiz kalırken 15 Ocak 2020’de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın 15 Ocak 2020 tarihli Hidrojen Arama Konferansı bir dönüm noktası olmuştur. Bu konferansla beraber devlet-özel sektör işbirliği artmış ve hidrojen ülkenin enerji dönüşümünün bir parçası haline gelmiştir. Aynı zamanda bu tarihten itibaren Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği aracılığı ile hidrojenin doğal gaza karıştırılması süreci de başlamıştır (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 20). 19 Ocak 2023’de Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasının yayınlanması ise bir başka dönüm noktası olmuştur (T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2023).

6.1. Türkiye’nin Enerji Güvenliği ve Politikaları

Türkiye’nin enerji politikalarının çok geniş bir çerçevede değerlendirilmesi gereklidir. Ekonomik ve enerji güvenliği ötesinde, stratejik kaygılar ve elbette iklim değişimi ve buna paralel karbon emisyonlarının azaltılması yönündeki kaygılar da politikaların belirlenmesinde öne çıkmaktadır. Ülkenin artan nüfusu, göç çeken bir ülke olması gerçeği ve sürekli bir ekonomik büyüme olgusu sebebiyle enerji kaynaklarının önemi artmaktadır. Bu bağlamda ülkenin ithal kaynak bağımlılığı görülmektedir. 2018 yılının ortalarından itibaren Türk Lirasının önemli ölçüde değer kaybetmesi sebebiyle enerji kaynakları için ödenen rakam ekonomiye önemli yük

getirmiştir. 2020 yılı ilk ilk dört aylık dönemde 11.464.070 Milyar dolar olan enerji ithalatı ödemesi, 2023 aynı dönem için 26.339.976 Milyar dolar olarak gerçekleşmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu, (2023). Üç yıllık süreçte %130'luk bir artışa tekabül etmektedir. Örneğin doğal gazda 2010'lu yıllarda %55'lere varan ithal bağımlılığı Türkiye'yi Rusya karşısında politik anlamda zayıf duruma düşürebilmektedir. Bu sebeple Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Nisan 2017'de yayınladığı bir duyuru ile enerji politikalarında bu bağımlılığı azaltma yönünde adımlar atacağını duyurmuştur.

Bunu da üç temel ayağa dayandırmıştır

- Enerji arzı güvenliğini artırmak
- Yerel kaynak kullanımını artırmak ve yerel kaynak araştırmalarını artırmak
- Enerji piyasalarında öngörülebilirlik üzerinde çalışmak (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 2)

6.2. Türkiye'de Enerji Kaynakları ve İthal Bağımlılık

Türkiye fosil enerji kaynakları bakımından kendi kendine yeterli bir ülke olmadığı için bu anlamda ithal etmek zorundadır. Tablo 1'de görüldüğü üzere fosil yakıtların fiyat değişkenliği göstermesi ülkemiz ekonomisi için de yük oluşturmakta ve dış ticaret açığındaki en önemli payı enerji ithalat kalemi oluşturmaktadır. "Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı 10 Ocak 2022 tarihli En Fazla İthalat Yapılan 20 Fasil" verilerine göre enerji ürünleri ithalatı (Mineral yakıtlar, mineral yağlar ve bunların damıtılmasından elde edilen ürünler, bitümenli maddeler, mineral mumlar) 2020 yılından 2021 yılına %74,6 oranında büyümüştür. Enerji ürünleri ithalatında 2020 yılı için covid pandemi etkisi göz önüne alınsa dahi 2019 yılı verileri ile karşılaştırıldığında %21 oranında bir artış görülmektedir ki 2021 yılı toplam ithalat içindeki payı %18'dir.

2021 yılı Brent petrol fiyatı 2020'ye oranla %70 artmıştır. Doğalgazda ise ekstrem artışlar görülmektedir. ABD Henry Hub doğalgaz fiyatı 2020'den 2021'e %90 oranında artmıştır. Pandemi öncesi 10 yıllık dönem ortalamasının ise %20 üzerine çıkmıştır. Avrupa'da Dutch TTF doğal gaz fiyatı ise 1 yılda %500 artmıştır. Pandemi öncesi 10 yıllık ortalamasının ise %200 üzerindedir (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, 2022, s. 5).

Ödemeler dengesi rakamlarından da petrol fiyatlarının etkisini görmek mümkündür. 2014 yılında 38,02 milyon Dolar cari açık verilmiştir. Petrol fiyatlarının nispeten düşük olduğu 2015 ve 2016 yıllarında cari açık sırasıyla 26,625 milyon Dolar ve 26,668 milyon Dolar olmuştur. Petrol fiyatlarının artışa geçmesiyle 2017’de cari açık 39,955 milyon Dolar olarak gerçekleşmiştir (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, Eylül 2022, s. 12). Eylül 2022’de ise 12 aylık ödemeler dengesi 39,164 milyon Dolar, Ocak-Eylül 2022 esas alındığında ise 37,977 milyon Dolar açık vermiştir (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, Eylül 2022, s. 3).

Dünya Enerji Ajansı 2020 verilerine göre Türkiye hem doğal gaz hem de kömürde net ithalatçı pozisyonundadır.

Tablo 2: Doğal Gaz Net İthalatçı Ülkeler 2020 Yılı Geçici Veri
(International Energy Agency, 2022, s. Natural Gas Production 2020)

Doğal Gaz Net İthalatçı Ülkeler	BCM
Çin Halk Cumhuriyeti	125
Japonya	105
Almanya	83
İtalya	66
Meksika	64
Güney Kore	54
Türkiye	47
Fransa	37
Birleşik Krallık	34
Hindistan	34
Diğer	324
Toplam	973

Tablo 3: Kömür Net İthalatçı Ülkeler 2020 Yılı Geçici Veri
(International Energy Agency, 2022, s. Coal Production 2020)

Kömür Net İthalatçı Ülkeler	Mt
Çin Halk Cumhuriyeti	306
Hindistan	210
Japonya	183
Güney Kore	123
Çin Taiwanı	63
Vietnam	52
Türkiye	40
Malezya	31
Almanya	29
Tayland	25
Diğer	202
Toplam	1.264

2020 Yılı Geçici Veri

Kömür Net İthalatçı Ülkeler	Mt
Çin Halk Cumhuriyeti	306
Hindistan	210
Japonya	183
Güney Kore	123
Çin Taiwanı	63
Vietnam	52
Türkiye	40
Malezya	31
Almanya	29
Tayland	25
Diğer	202
Toplam	1.264

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) verilerine göre Türkiye'nin doğal gaz ithalatı da, tüketimi de düzenli şekilde artış göstermektedir.

Tablo 4: Yıllara Göre Doğal Gaz Piyasası Genel Görünümü, 2016-2021
(T.C.Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2022, s. VII)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Değişim (%)
İthalat	46.352,17	55.249,95	50.282,05	45.211,47	48.125,51	58.703,93	21,98
Üretim	367,28	354,15	428,17	473,87	441,27	394,44	-10,61
İhracat	674,68	630,67	673,29	762,68	577,52	382,89	-33,7
Tüketim	46.395,06	53.857,14	49.204,14	45.285,50	48.261,35	59.854,17	24,02
Dönem Sonu Stok	1.700,25	2.948,37	3.167,23	3.095,44	2.852,00	1.914,17	-32,88

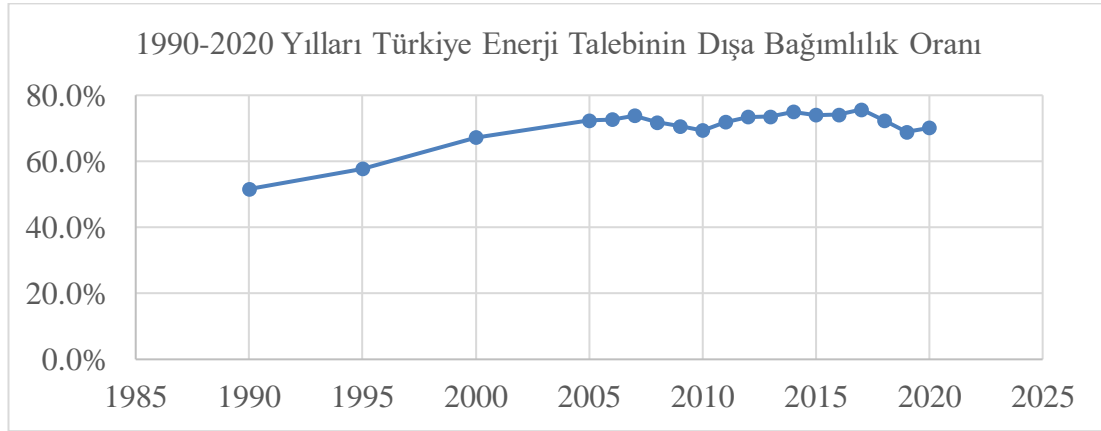
Tablo 5: 2011-2021 Yılları Doğal Gaz İthalat Miktarları
(T.C.Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2022, s. 11)

2011-2021 Yılları Doğal Gaz İthalat Miktarları (Milyon Sm³)

Ülke	Rusya		İran		Azerbaycan		Cezayir		Nijerya		Diğer**		Toplam	Bir Önceki Yıla Göre Yüzde Değişim
	Miktar	Pay (%)	Miktar	Pay (%)	Miktar	Pay (%)	Miktar	Pay (%)	Miktar	Pay (%)	Miktar	Pay (%)		
2011	25.406	57,91	8.190	18,67	3.806	8,67	4.156	9,47	1.248	2,84	1.069	2,44	43.874	15,35
2012	26.491	57,69	8.215	17,89	3.354	7,3	4.076	8,88	1.322	2,88	2.464	5,37	45.922	4,67
2013	26.212	57,90	8.730	19,28	4.245	9,38	3.917	8,65	1.274	2,81	892	1,97	45.269	-1,42
2014	26.975	54,76	8.932	18,13	6.074	12,33	4.179	8,48	1.414	2,87	1.689	3,43	49.262	8,82
2015	26.783	55,31	7.826	16,16	6.169	12,74	3.916	8,09	1.240	2,56	2.493	5,15	48.427	-1,7
2016	24.540	52,94	7.705	16,62	6.480	13,98	4.284	9,24	1.220	2,63	2.124	4,58	46.352	-4,28
2017	28.690	51,93	9.251	16,74	6.544	11,85	4.617	8,36	1.344	2,43	4.804	8,7	55.250	19,2
2018	23.642	47,02	7.863	15,64	7.527	14,97	4.521	8,99	1.668	3,32	5.061	10,21	50.282	-8,99
2019	15.196	33,61	7.736	17,11	9.585	21,2	5.678	12,56	1.756	3,88	5.260	11,63	45.211	-10,08
2020	16.166	33,59	5.321	11,06	11.548	24	5.573	11,58	1.358	2,82	8.159	16,95	48.126	6,45
2021	26.343	44,87	9.434	16,07	7.986	13,6	5.987	10,2	1.249	2,13	7.706	13,13	58.704	21,98

2020 yılında Türkiye enerji tüketiminde petrol ve doğalgazın payı %55,7, kömürün %27,7'dir (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, 2022, s. 44). Enerjide bağımlılık kısmına gelindiğinde ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Nisan 2017 tarihli duyurusu sonrası yapılan çalışmalar ile 2018 ve 2019'da bağımlılık bir miktar düşüyse de 2020'de yeniden artmıştır (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı,

2022, s. 44). Bağımlılık oranları 2000'lerin başından itibaren %70'ler ortalamasında seyretmiştir.



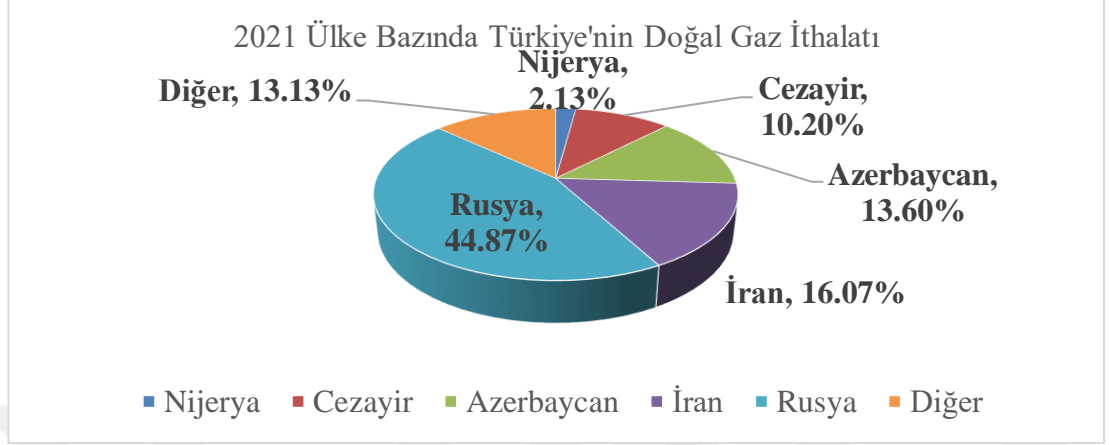
Şekil 12: Türkiye Enerji Talebinin Dışa Bağımlılık Oranı, 1990-2020

Kaynak bazında bakıldığında ise 2021'de petrolde ithalat bağımlılığı %92.8, doğalgazda ise bu oran %99.3'dür (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, 2022, s. 45). Petrolde 2020 yılında 40.502.790 Ton olan ithalat miktarı 2021 itibariyle 44.342.390 Ton olmuştur. Yıllık artış %9,48 iken, ham petrol özelinde de %6,98 oranında bir artış görülmüştür (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2022, s. 10).

Sektörel anlamda ise en büyük enerji tüketicisi sektör 2020 yılı için %37 ile sanayi, %27 ile ulaşım, %20 ile ev içi kullanım ve %17 ise hizmetler sektörleridir. Sanayi içinde ise çelik ve çimento sanayi en önde gelmektedir. Bu sektörlerde Türkiye küresel anlamda ilk onda yer almaktadır. Bu sektörleri petrokimya, rafineri, makine, gıda, tekstil gibi endüstri alanları takip etmektedir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 3).

Türkiye'nin kentleşme oranı her sene %2 oranında artmaktadır. Bu da yeni yapılaşma anlamına gelmektedir. İnşaat sanayi 2018 itibariyle reel gayri safi yurtiçi büyümesinin %6.6'sını gerçekleştirmektedir. Ülkede yapı stokuna ortalama yıllık 100 bin yeni yapı eklenmektedir. 2018 yılı toplam enerji tüketiminin üçte birine yakını binaların ve binalardaki suyun ısıtılması için kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının buradaki payı %12 civarındadır. Elektriğin payı %30'dur. Bu arada Türkiye'deki elektrik talebinin yaklaşık yarısı, başta hidroelektrik olmak üzere yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 26).

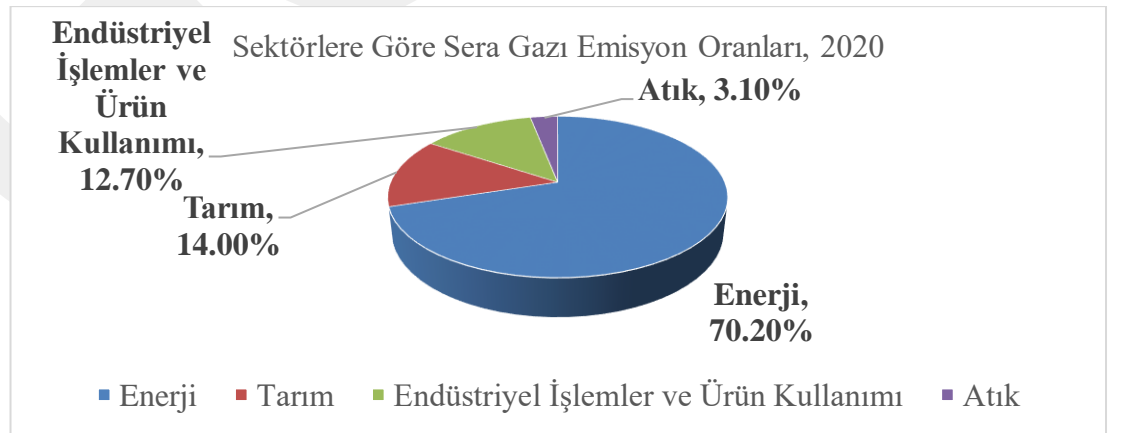
Öte yandan TÜİK 2020-2021 yılı verilerine göre doğal gaz ithalat payında Rusya Federasyonu'nun ağırlığının çok arttığı gözlemlenmektedir. Mayıs 2021 verilerine göre Rusya'nın doğal gaz ithalatında payı %44,87 oranındadır.



Şekil 13: Türkiye Ülke Bazında Doğal Gaz İthalatı, 2021
(T.C.Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2022, s. 12)

Net ithalatçı olup bu kadar ağır bağımlılık bir ülkenin siyasi, ekonomik kararlarında ithalat yapılan ülke lehine kararlara yol açabilir. Bu asimetrik ilişki nedeniyle Rusya Türkiye'ye kendi lehine bir karar alabilir yahut bir kararı değiştirebilir. Bu sebeple Türkiye hem petrol ve gaz arama çalışmalarına önem vermekte hem de enerji verimliliği konusunda adımlar atmaktadır.

6.3. Türkiye'de Fosil Yakıtlara Bağımlılığın Çevresel Etkisi

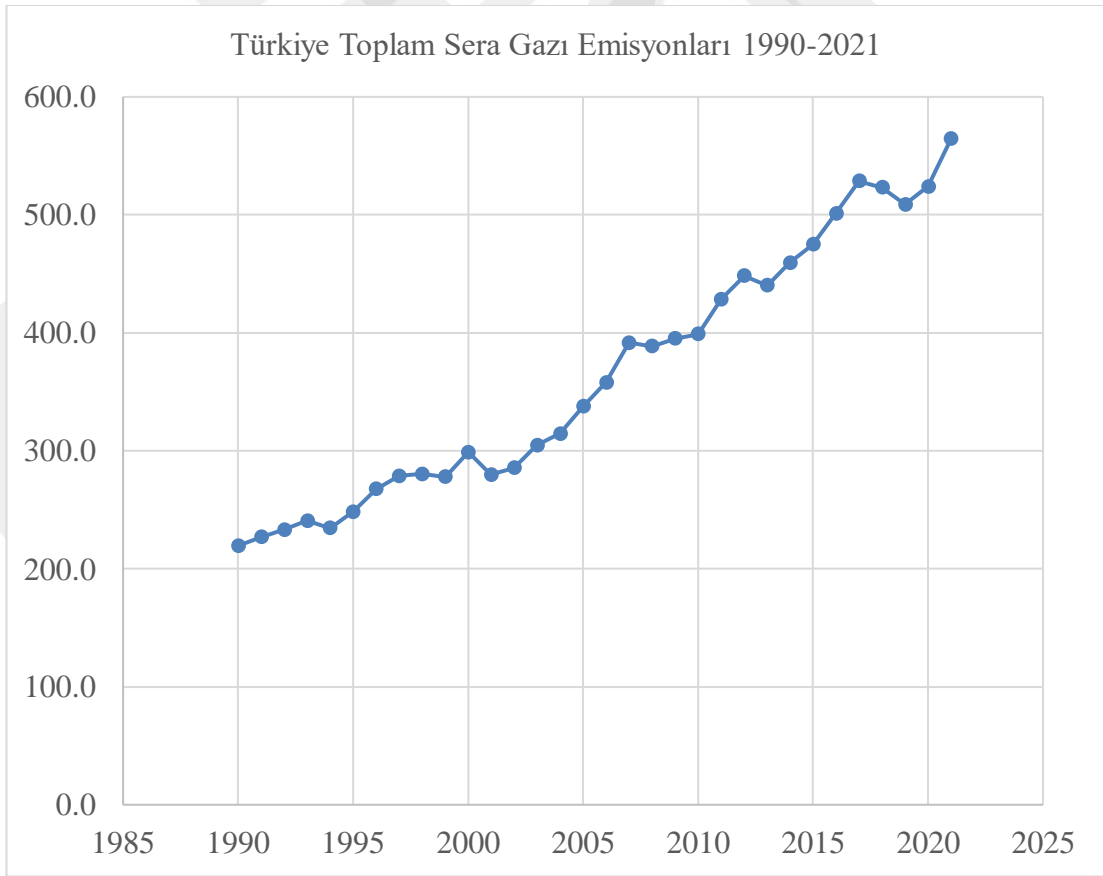


Şekil 14: Sektörlere Göre Sera Gazı Emisyon Oranları, 2020
(Türkiye İstatistik Kurumu, (2022)

Fosil yakıtlara bağımlılığın ekonomik olduğu kadar çevresel etkileri de önemli boyuttadır. TÜİK 2020 yılı verilerine göre Türkiye'nin sera gazı emisyonlarında en büyük pay %70.2'lik oranla enerji sektörüne aittir. Bu da tamamen fosil yakıt kullanımı kaynaklıdır. TÜİK Sera gazı verilerine göre 1990-2020 yılları arasında emisyonların artış hızı düşmekte ancak düzenli artış sürmektedir. Bu durum Türkiye'nin ekosistemi açısından bir tehdittir. Ayrıca kişi başı sera gazı emisyonlarının da sürekli bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir.

Tablo 6: Türkiye Sera Gazı Emisyon Miktarları, 1990-2020
(Milyon Ton Karbondioksit Eşdeğeri)

Yıllar	1990	2000	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	1990-2020 Değişim %	2019-2020 Değişim %
Toplam Emisyon	219,70	299,00	398,70	474,50	500,80	528,30	524,00	508,10	523,90	138,40%	3,1%



Şekil 15: Türkiye Toplam Sera Gazı Emisyonları
(Türkiye İstatistik Kurumu, (2022))

Sera gazı emisyonlarında Türkiye 2018 yılı itibariyle dünyada en fazla salınım yapan 20.ülke konumundadır. 1990-2013 yılları arasında emisyonlar 2 misli artmıştır. 2015 yılı itibariyle küresel sera gazı emisyonlarının %0.83'ü Türkiye tarafından gerçekleştirilmektedir (Timperley, (2018).

Türkiye'nin enerji güvenliği ve ekonomik güvenlik dışında da çevre güvenliği açısından da yenilenebilir, çevre dostu kaynaklardan üretimde bulunması bir zorunluluktur. Bu farkındalık sebebiyle Nisan 2016'de imzalanan Paris İklim Anlaşması Cumhurbaşkanlığı Kararı ile 7 Ekim 2021'de onaylanmıştır (T.C.Dış İşleri Bakanlığı, (2023). Ayrıca Avrupa Yeşil Mutabakatı ile uyum doğrultusunda 16 Temmuz 2021'de Yeşil Mutabakat Eylem Planı yayınlanmıştır (T.C.Ticaret Bakanlığı, (2021). Tüm bu çalışmalar Türkiye'nin sıfır emisyon ekonomisi yolunda adımlar attığını ve yenilerini atmaya hazır olduğunu göstermektedir. Bu hedef doğrultusunda ekonomi, enerji ve iklim politikaları geliştirilmektedir.

6.4. Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli

Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları anlamında dünyanın şanslı ülkelerinden birisidir. Avrupa'nın en fazla güneş alan ülkesi olmasının yanı sıra gerek rüzgar, gerek hidroelektrik gerekse jeotermalde önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye için Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, 2021-2026 yıllarını kapsayan projeksiyonda yenilenebilir kaynaklarda hidroelektrikten rüzgar enerjisi ve güneş pillerine bir kayış olacağını ve ülkenin yenilenebilir kapasitesinin yaklaşık %80'ini bu iki kaynaktan sağlanacağını öngörmüştür (International Energy Agency, 2021, s. 62).

Özellikle 2017 sonrası düşük yağışlar ve kuraklık sebebiyle Türkiye gelişmiş hidroelektrik potansiyelini yeterince kullanamamaktadır, buna karşın hidroelektrik dışındaki yenilenebilir kaynaklarda 2017 sonrası kullanım iki misline çıkmıştır. Hidroelektrik gücünde yalnızca 2021 yılında %6 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir. Buna karşın güneş ve rüzgar enerjisi kullanımının toplam enerji üretimi içindeki payı 2020 yılında %11.7 iken 2021'de %13.6'ya ulaşmıştır. Her ne kadar ülkenin yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi hızlı şekilde artıyor olsa da ülkenin enerji ihtiyacının tamamının bu şekilde karşılanması şu an mümkün görünmemektedir (Alparslan, Turkey Electricity Review 2022, 2022, s. 1).

Türkiye için 2021 yılında üretilen toplam elektrik miktarının %36'sı yenilenebilir kaynaklardan karşılanmıştır, 2020'de bu oran %42 idi (Acar, ve diğerleri, 2022, s. 13). 2022 yılında ise elektrik üretiminin %39.4'lük kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. En büyük pay %20,6 ile hidroelektriğin iken, %10.8'i rüzgar, %4.7'si güneş ve %3.3'ü jeotermalden elde edilmiştir (T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2023). Özellikle 2010 sonrası yenilenebilir enerjide rüzgar ve güneşin payı artmıştır. Bu tarihe kadar yenilenebilir enerjide çok büyük ağırlık hidroelektrikte iken 2021 sonunda hidroelektrik dışındaki yenilenebilir kaynakların payı %23'e ulaşmıştır (Acar, ve diğerleri, 2022, s. 19).

Yenilenebilir kaynaklar açısından en önemli sorun mevsimsellik sorunudur. Hidroelektrikte kuraklık dönemlerinde, yağışın azalığı dönemlerde, güneş enerjisinde havanın karardığı ve güneşlenmenin az olduğu dönemlerde, rüzgarda esintinin olmadığı veya uygun düzeyde olmadığı dönemlerde üretim durmaktadır. Öte yandan üretimin olduğu zamanlarda bunların depolanması bir başka problemidir.

6.5. Türkiye'nin Temiz Hidrojen Potansiyeli

Türkiye'nin elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payı azımsanmayacak düzeyde olmakla beraber, toplam enerji üretiminde elektriğin payı %20 düzeyindedir (Güllü, ve diğerleri, 2023, s. 9). Sanayide, hane halkı tüketiminde ve ulaşımda fosil yakıtların payı halen çok yüksektir. Bu sebeple bu alanlarda temiz, sürdürülebilir kaynakların devreye girmesi daha da önem kazanmaktadır.

2020 yılı verilerine göre Türkiye'nin nihai enerji tüketiminin, %27.6'sı katı yakıtlardan, %28.7'si petrol ve türevlerinden, %27'si doğalgazdan ve %16.7'si yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2022).

Paris iklim anlaşmasını onaylanmasının ardından Türkiye 2053'de sıfır emisyon hedefi doğrultusunda enerji dönüşümünün çerçevesini belirlemiştir. Yeşil hidrojen bu hedef doğrultusunda hem enerjide ithal bağımlılığı azaltacak hem de ihracat potansiyeli taşıyan önemli bir seçenektir (Sağsen, (2021).

Hidrojen konusunda Türkiye'de bazı akademisyenlerin veya enerji firmalarının münferit çalışmaları olsa da devlet düzeyinde aktif çalışmalar ancak 15

Ocak 2020’de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın “Hidrojen Arama Konferansı” sonrası başlamıştır (Bektaş, Hakyemez, Yanık, & Yıldızca, 2021, s. 21). Bu konferansta, Enerji Bakanı Fatih Dönmez enerjinin depolanması konusu üzerinde dururken, doğal gaz hattına hidrojen enjeksiyonu konusuna da değinmiştir (Bektaş, Hakyemez, Yanık, & Yıldızca, 2021, s. 21).

Türkiye’de 2020 yılı boyunca yeşil hidrojenin doğal gaz sistemine karışımı konusunda %5 ile %20 arasında değişen oranlarda karışım laboratuvar ortamında test edilmiştir. 2021 yılında ise İzmir sanayi bölgesinde gaz şebekesine karışım gerçek anlamda test edilmiştir. Keza Nisan 2021’de Türkiye Gaz Dağıtıcıları Birliği Gazbir Konya’ya bir temiz bir hidrojen merkezi kurup şebekeye karışım denemeleri yapmıştır (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 1). Yapılan testlerde %5 ile %20 arası karışımlar başarılı şekilde test edilmiştir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 18). Düşük oranlı karışımlarda sıkıntı yaşanmamakta ancak özellikle %20 üzeri bir enjeksiyon durumunda altyapıda bazı güncellemeler ve yatırımlar yapılması gerekmektedir (Gazbir-Gazmer Uluslararası İlişkiler Komisyonu, 2020, s. 6). Ancak bu noktada belirtmek gerekir ki hidrojenin enerji içeriğinin doğal gaza göre daha az yoğun olması sebebiyle örneğin %15’lik bir karışım %5’lik bir sıfır karbon enerji yapısı oluşturabilmektedir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 18). Shura Enerji Dönüşümü Merkezi raporuna göre mevcut olan doğal gaz hatlarına %5’lik bir karışım dahi tek başına yıllık 2.5 milyar metreküp daha az gaz ithali ve dolayısıyla cari açıkta 0.6 milyar Dolar düşüklük anlamına gelmektedir (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 44).

Doğal gaz şebekesine hidrojen karışımı temiz hidrojen yolunda bir adımdır. Bunun yanı sıra mavi hidrojen denilen karbon tutucu teknolojiler de bu süreçte önemli bir aşama olacaktır. Mavi hidrojen hidrojen başta doğal gaz olmak üzere fosil yakıtlardan üretilir, bu süreçte oluşan karbon emisyonu tutulur ve depolanarak yeniden kullanıma sunulur. Kısa ve orta vadede bu uygulamaların orta uzun ve uzun vadede geçişi kolaylaştırması beklenmektedir. Bu noktada Türkiye’nin doğal gaz alanında net ithalatçı bir ülke olduğunun altını çizmek gerekmektedir. Karadeniz’de keşfedilen 58 milyar metreküplük rezervin yanı sıra 710 milyar metreküpe ulaşan bir potansiyelden bahsedilmektedir (BBC Türkçe, 2023). Ülkenin yıllık tüketiminin 59 milyar metreküp (T.C.Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2022, s. IV) olduğu düşünüldüğünde bu

potansiyel ülke için çok anlamlıdır. Tam bu noktada doğal gaz maliyetlerinin düşmesi ülkenin mavi hidrojen potansiyelinin de yüksek olmasına yol açabilir.

Hidrojenin doğal gaz sistemine karışımında Türkiye'nin bir diğer avantajı 150,000 km'lik boru hattı altyapısı (Avrupa'nın en uzun 6.doğal gaz dağıtım ağı) ile nüfusun %82'lik kısmına ulaşabilmesidir. Ülkenin hedefi 2030'a kadar %20'lik karışımın sistemde sağlanmasıdır (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 17).

Doğal gaz şebekesine karışım konusunda %50'lere varan denemeler yapılmıştır. Ancak yeni yatırım ve dönüşüm gerektirmeden bir karışım şu ana kadar %20'ye varan orana kadar karışımında mümkün görünmektedir. Türkiye'nin oldukça gelişkin ve görece yeni doğal gaz altyapısı, bunların depolandığı tuz mağaralarının ve yapay depoların varlığı yeşil hidrojen konusunda yüksek yatırım yapılmadan adımlar atılmasını sağlayacaktır. Burada göz ardı edilmemesi gereken bir başka unsur temiz hidrojen üretimi sırasında temiz su kaynaklarının tüketilmemesidir. Yeşil hidrojen üretiminde kilogram başına 15 litre su gereksinimi doğmaktadır (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 60). Deniz suyunun tuzdan arındırılması sonrası elektrolizi kısa dönemde maliyeti artırsa da bu konudaki inovasyonlar ve teknolojik gelişimler orta ve uzun vadede maliyeti düşürerek temiz su kaynaklarının tüketilmesini önüne geçecektir. Bu sebeple yeşil hidrojen üretiminde ülkenin sahil kesimleri daha uygun seçenek olacaktır.

6.6. Türkiye'nin Temiz Hidrojenin Kullanım Alanları ve Sektörel Bazda Temiz Hidrojen

Temiz hidrojenin kullanım alanlarına baktığımızda kimya ve petro kimya, demir-çelik ve çimento sektörleri öne çıkmaktadır. Teknolojik gelişmeler ile hidrojenin kullanım seçenekleri de genişleyebilir. Bu noktada yeşil hidrojenin özellikle elektrifikasyonun çok kullanılmadığı ev hanesi enerji tüketimi, imalat sanayi ve ulaşım gibi alanlarda öne çıkması beklenmektedir. Türkiye'nin küresel anlamda öne çıktığı çelik ve çimento sektörlerinde yeşil hidrojen faydalı olabilecektir. Demir çelik üretiminde 1000 derece üzeri sıcaklıkların gerekliliği bu alanda yenilenebilir enerjinin kullanımının önüne geçmektedir ancak yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojen ile bu sıcaklıklar sağlanabilmekte ve bu şekilde bu tesislerin karbon emisyonları %80-%95 arasında azaltılabilmektedir (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s.

13). Ayrıca yine hidrojen her geçen gün önemi artan tarım sektöründe, dolayısıyla gıda güvenliğinde de önemli rol oynamaktadır. Gübrenin ana maddesi olan amonyağın temelinde hidrojen yer almaktadır (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 12).

6.6.1. Sanayi

Sanayide fosil yakıt kullanımı yoğundur ve bu alanın karbon nötr hale dönüşmesi diğer alanlara göre daha zordur. Sanayi sektörünün 2020 yılı itibariyle yıllık 36,26 milyon ton eşdeğer petrol düzeyinde bir enerji tüketimi bulunmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2023). Türkiye'nin toplam enerji tüketiminde payı ise %39 gibi ciddi orandadır (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 39).

Türkiye demir çelik sektöründe dünyanın en büyük sekizinci ithalatçısı durumundadır ve bu alanda ticaret hacmi en fazla AB ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca demir çelik tesislerinin yoğun olduğu İskenderun, İzmir gibi coğrafyalar aynı zamanda ülkenin en yüksek güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli olan bölgeleridir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 16). Demir çelik sektörü üretimde yüksek sıcaklık ihtiyacı olan bir sektördür ve bu kömür ve doğalgazdan elde edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları henüz bunu karşılayabilecek teknolojiye sahip değildir. Ancak karbon yakalama teknolojisi, yani mavi hidrojen ile başlatılacak bir süreç dahi bu sektördeki emisyonları üçte bir oranında azaltabilmektedir. Türkiye'de demir çelik sektörü nispi anlamda yeni ve gelişmiş teknolojiler kullanmaktadır. Benzer ihtiyaçları olan seramik, çimento gibi sektörlerdeki teknoloji daha az gelişmiş olarak değerlendirilebilir. Bu sektörlerde de yüksek sıcaklık seviyelerinin gerekliliği yoğun enerji, yoğun elektrik tüketimine yol açmaktadır. Yeşil hidrojen burada alternatif olabilir (Euronews, (2023). Burada en önemli avantajlardan birisi temiz hidrojenin depolanıp, nakledilebilmesidir. Elbette bunlar için uygun altyapı ve tedarik zinciri kurulumu gereklidir. Bu ancak uzun vadede gerçekleştirilebilir (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 30).

Demir-çelik ve çimento gibi sektörlerde çevre dostu teknolojilere geçiş, yeşil hidrojen dönüşümü başlangıç kurulumu anlamında maliyetli olacak ve bu da otomatik olarak ürüne yansıtılarak ülkenin rekabet gücünü azaltabilir. Ancak Avrupa Karbon Sınırı Ayarlama Mekanizması Türkiye'ye karbon vergisi ödeme yerine, bu alana

yatırım yapma anlamında bir teşvik mekanizması getirebilir. Bu konuda AB ile yapılan çerçeve belirlenmelidir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 16). Her durumda Türkiye en önemli ticari partneri Avrupa Yeşil Mutabakatı sonrası ticareti sürdürebilmek için bu alanda çevre dostu yatırımlar yapmak mecburiyetindedir.

Hidrojenin kullanımı aslında Türkiye için yeni bir teknoloji değildir. Kimya, petro kimya ve rafineri sektöründe hali hazırda kullanılmaktadır ancak burada kullanılan hidrojen fosil yakıtlarla sağlanmaktadır. Bu bağlamda yeşil hidrojenin sanayi alanına adaptasyonu çok zorlu bir süreç gerektirmeyebilir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 15).

6.6.2. Ulaştırma/Nakliye

Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin %25'inden fazlası 2018 yılı itibariyle ulaştırma sektörü kaynaklıdır. Petrol ürünleri enerji ihtiyacının %99 üzerinde bir payını karşılamaktadır, bu da bu sektörü ülkenin en büyük petrol tüketicisi sektörü haline getirmektedir (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 25). Yolcu taşımacılığında 2021 itibariyle karayolunun payı %92.7, demiryolunun %0.6, havayolunun payı %6.3 ve deniz yolunu payı ise %0.38 olmuştur. Yük taşımacılığında ise yine 2021 itibariyle karayolunun payı %89.9, deniz yolunun %6, demiryolunun %4 oranındadır (Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2023). İstatistiklerden de görüldüğü üzere Türkiye'de gerek yolcu gerek yük taşımacılığında karayolları çok büyük ağırlığa sahiptir. Bu hem ithal bağımlılık ve cari açık anlamında, hem de çevresel etki anlamında ülkeye olumsuz etki göstermektedir.

Kişisel kullanım anlamında otomobillerin elektrifikasyonu tezin yazım tarihi itibariyle tüm dünyada hızlı şekilde ilerlemektedir. Ancak toplu taşıma, ağır taşıt nakliyesi, uzun mesafe nakliye gibi alanlarda ilerleme görece oldukça düşüktür. Karayolu nakliyesi yıllık 23.5 Mt karbon emisyonuna yol açmaktadır. Ağır karayolu taşımacılığında düzel yakıtların yerini yeşil hidrojenin alması mümkündür (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 43). Bu hem yakıtta ithal talebini azaltacak, enerji ve ekonomik güvenliğe katkı yapacak hem de çevre dostu bir alternatif olacaktır. Öte yandan elektrikli araçlar yaygınlaşıyor olsa dahi üretimlerinde kullanılan nikel ve kobalt gibi elementlerin kolay bulunmaması, sağlanmasında zorluklar ve şarj edilme süresinin uzunluğu bu alanda da yeşil hidrojen teknolojisine yer açmaktadır. Özellikle

Asya'da hidrojen yakıtlı araçların kısa sürede dolun ve uzun mesafe avantajı sebebiyle yaygınlaştığı görülmektedir (Geraldine, (2022)).

Türkiye'de önümüzdeki yıllarda toplu taşımacılıkta da hidrojenli araçların kullanılması söz konusudur. Türk otomotiv şirketi Karsan e-Ata isimli hidrojen yakıtlı otobüsü üretmektedir. Firmanın bülteninde bu otobüsün kendi sınıfında 500 km kapasiteyi aşan mesafe ile en uzun menzile sahip araç olduğu gibi 7 dk'dan kısa sürede dolabilmesi gibi önemli bir avantaja sahip olduğu belirtiliyor (Karsan, (2022)).

Öte yandan Türkiye'nin en büyük enerji firmalarından ve rafineri şirketlerinden olan Türkiye Petrol Rafineleri A.Ş.(Tüpraş) ise 24 Kasım 2021'de 2050 yılında karbon sıfır olma taahhüdünü açıklamıştır. Burada en önemli unsurlardan birisi ise yeşil hidrojen olarak belirlenmiştir. Burada yeşil hidrojen "sürdürülebilir havacılık yakıtı" olarak öne çıkmaktadır. Yapılan basın açıklamasında yenilenebilir enerji üretimi konusundaki faaliyetler açıklanırken tesislerde hali hazırda hidrojen üretimi yapıldığı, 2025 yılı itibariyle yeşil hidrojen üretimine başlanacağı ve kademeli olarak bu sürecin 2040'a kadar süreceği, 2040 yılında hidrojen üretimi kaynaklı emisyonların sıfırlanacağı belirtilmektedir. Üretilen yeşil hidrojenin lojistik, ağır taşımacılık ve havacılık alanında kullanılacağı üzerinde durulmaktadır (Tüpraş, (2021)).

6.6.3. Binalar

Türkiye hızla kentleşen bir ülke olarak yapı stokunu da büyütmektedir. Yıllık yeni inşaat oranı %4'ü geçen bir düzeydedir ve yıllık ortalama 100.000 yeni yapı yapılmaktadır. Bu stokun içerisinde konutlar, kamu binaları ve ticarethaneler yer almakta ve tüm bunlar 2017 yılı itibariyle ülkenin toplam enerji tüketiminde %32.3'lük bir kısımdan sorumlu durumdadır (Kabakçı, 2019, s. 6). Konutların enerji talebi toplam binaların enerji talebinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bunların yarısından fazlasının sebebi ise binaların ve suyun ısıtılması kaynaklıdır. Soğutma/iklimlendirme henüz Türkiye'de yoğun kullanıma sahip olmadığı için enerji tüketimindeki payı yüksek değildir. Bu noktada enerji verimliliği de öne çıkmaktadır. Binalarda kullanılan enerjinin 2018 yılı itibariyle yalnızca %12'lik kısmı yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanmıştır (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 24).

2018 yılı itibariyle binalarda enerji tüketiminde elektriğin payı %30 civarındadır. Bu pay kamu binaları ve ticarethanelerde %44 iken, konutlarda %21'dir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından yapılan elektrik üretimi de hesaba katılığında binalarda yenilenebilir kaynaklardan enerji tüketimi toplamı %21'e ulaşmaktadır (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 24).

Ülkede doğal gaz ağının yaygınlaşması sonrası binalarda doğal gaz yaygın kullanılmaktadır. Doğal gaz tüketiminde 2019 itibariyle %33'lük pay ile binalar en yüksek oranı temsil etmektedir. Kömür de binalarda halen yoğun olarak kullanılmaktadır. 2015 sonu itibariyle ısınma için tüketilen 8.2 milyon ton eşdeğer kömürün ilginç şekilde üçte ikisi kamu binalar ve ticarethanelerde kullanılmış ve bunun %95'den fazla bir kısmı ithal edilmiştir (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 25).

Gerek doğal gazın gerekse kömürün ithal ağırlık olduğu düşünüldüğünde yeşil hidrojen önemli bir alternatif olmaktadır. Hidrojen üretiminin belirli merkezler dışında, daha yaygın şekilde yapılabilmesi, lokal üretime olanak vermesi bu bağlamda ülke çapında yaygınlık sağlayabilecektir. Yeşil hidrojenin doğal gaz sistemlerine gelecektir. Mavi hidrojen veya yeşil hidrojenden üretilen metan yapıların ve yapılardaki suyun ısıtılmasında kullanılabilir. Birleşik Krallıkta H21 Leeds City Gate ve H21 Network Innovation Competition projeleri ve kıta Avrupa'sında STORE&GO projesi bu kullanımlara örneklerdir (Saygın, Gencer, & Sanlı, 2021, s. 32,33). Gazbir ve Gazmer'in Konya'da yaptığı karışım %5, %10, %15 ve %20 oranlarda konutlarda başarılı şekilde test edilmiştir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 18)

6.7. Türkiye'nin Yeşil Hidrojen İhracat Potansiyeli

Türkiye AB'nin en önemli ticaret ilişkisi olan ülkelerden birisidir. Özellikle Rusya-Ukrayna savaşı sonrası AB'nin enerji arzı güvenliği konusunda kaygıları artmış ve alternatif yollar üretme yoluna gitmişlerdir. Türkiye bu bağlamda yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli ile gerek doğrudan gerekse yeşil hidrojen aracılığı ile ihracatçı bir pozisyona gelebilir. Güneş ve rüzgar enerjisi alanında teknolojik ilerlemeler sonrası verimin artışı ve maliyetin düşmesi ile üretimin artması beklenmektedir. Bu da üretim fazlasının depolanması konusunu gündeme getirmektedir. Yeşil hidrojen bu konuda çok iyi bir çözümdür. Hali hazırda Türkiye

5.4 bcm kapasiteye ulaşan bir doğal gaz tuz depolama kapasitesine sahiptir (Kazak, (2018).

IRENA net hidrojen veya amonyak ithalatçısı olabilecek ülkeler arasında Türkiye'yi de göstermektedir (International Renewable Energy Agency, 2022, s. 238). AB'nin 2030 yılına kadar Fit for 55 anlaşması kapsamında 5.6 Mt ve REPowerEu mekanizması kapsamında ise 15 milyon ton daha yeşil hidrojen ihtiyacı olacağı öngörülmektedir. Bunun 10 Mt'luk kısmının ithal edilmesi gündemdedir. Bu durumda Türkiye hem bulunduğu konum, hem yoğun ticari ilişkiler hem yenilenebilir enerjideki uygun maliyetler ve yüksek kalite sebebiyle en önemli seçeneklerden birisi durumundadır (Çağatay, (2022). Ortadoğu ve Kuzey Afrika Bölgesi (ODKA-İngilizce tabirle MENA bölgesi) Türkiye'nin rakibi durumundadır.

Türkiye'nin Yunanistan ve Bulgaristan üzerinden AB'ne ulaşan Trans Avrupa Boru Hattı Projesi (TAP) üzerinden hidrojen ihracatı yapması mümkündür (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 18). TAP üzerinden Türkiye'nin ürettiği hidrojen iletebileceği gibi Azerbaycan ve Doğu Akdeniz'de üretilebilen hidrojenin nakli de mümkündür. Bu sebeple TAP üzerinden %20'lik karışımın altyapısı konusunda çalışmalar devam etmektedir (Rzayeva & Lambert, 2021, s. 19). Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı Projesi (TANAP) üzerinden aktarılan hidrojen TAP'a bağlanarak iletebilir. TANAP yetkililerinin açıklamalarına göre altyapısal değişim olmadan %20'lik karışım mümkün görünmektedir. Bu durumda %20'lik karışım ile yıllık 0.2 Mt yeşil hidrojen ihracatının boru hatları üzerinden yapılabilmesi anlamında gelmektedir. Türkiye'nin gaz dağıtım şebekesinde 95,000 km polietilen ve 15,000 km çelik boru hattı yer almaktadır (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 62). Çelik boru hatlarında hidrojen karışımı belli oranlara kadar mümkün olabilmekte ancak polietilen karışımda çok daha olumlu sonuçlar vermektedir. Bu anlamda da uzun dönemde yapılabilecek yatırımlarla daha yüksek oranlı karışımlar ve dolayısıyla daha fazla ihracat kapasitesi mümkün olabilir.

Ayrıca yeşil hidrojenin amonyağa dönüştürülmesi ile deniz yollarıyla, tankerler üzerinden ihracat da bir başka yöntemdir. Türkiye'nin coğrafi avantajı bu noktada maliyet avantajına da yol açacaktır. Uluslararası Enerji Ajansı 2050 yılında temiz hidrojenin %30 civarında bir oranının amonyak ve sentetik hidrokarbon yakıtlar halinde bulunacağı öngörüsünde bulunmaktadır. Ajansın aynı raporu 2050 yılında

denizcilik sektöründe amonyağın tüketim payının %46, havacılık sektöründe ise sentetik hidrojen tabanlı yakıtların payının %33 olacağı, demiryollarında ise hidrojenin elektrik ile beraber toplamda %100'lük paya ulaşacağını öngörmektedir (International Energy Agency, 2021, s. 138).

Shura Enerji Dönüşüm Merkezi hesaplamalarına göre Türkiye'nin yenilenebilir enerjideki olası kapasitesi ile 2050 yılında kg başına 1.5-1.72 Dolar maliyetle yeşil hidrojen ve ton başına 300 Dolar maliyetle amonyak üretilebilecektir (Colak, Aksoy, & Sanlı, 2021, s. 63).

6.8. Türkiye'de Yeşil Hidrojen Konusunda Güncel Gelişmeler

Güney Marmara Kalkınma Ajansı koordinatörlüğünde uluslararası ortaklığı da olan 16 kuruluşun katılımıyla Türkiye'nin İlk Yeşil Hidrojen Projesi 31 Ocak 2023'de duyuruldu. Projenin bütçesinin 36.8 milyon Euro olması bekleniyor, AB projeye 8 milyon Euro hibede bulunma konusunda onay vermiştir. Bu tesiste sadece yeşil hidrojen değil hidrojenin katı ve sıvı türevleri, ayrıca metanol ve amonyak gibi maddeler de temiz üretim, yeşil üretim yöntemleri ile üretilecektir. Yıllık minimum 500 ton yeşil hidrojen çıktısı hedeflenen tesisin üretimi Kale Seramik, Şişecam ve Etimaden tesislerinde kullanılmasının yanı sıra uzun vadede ihracata da söz konusu olması hedeflenmektedir (T.C.Güney Marmara Kalkınma Ajansı, (2023).

Mart 2022'de halka arz olan ve ülkenin önemli yenilenebilir enerji firmalarından olan Smart Güneş Enerjisi yeşil hidrojen alanında 10 milyon TL sermayeli bir firma kurma kararı aldığını açıklamıştır. Firmanın pay senetlerinin halka arz tarihinde tezin yazım tarihine kadar olan süreçte (Nisan 2023) fiyatını %400 oranında artırmıştır (Bloomberg HT, (2022). Bir başka yenilenebilir enerji şirketi olan YEO Teknoloji firması da yeşil hidrojen alanında Almanya'da Yeo Hidrojen isimli bir iştirak kurduğunu duyurmuştur (Petrotürk, (2023).

T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" 19 Ocak 2023'de yayınlandı. Bakanlık Nisan 2017 tarihli enerji arz güvenliği ve enerji politikaları duyurusuna atıf yaparak, hidrojenin Türkiye enerji arzı güvenliğinde, sürdürülebilir kalkınmada ve çevresel güvenlikte hidrojeni öncelikli alanlardan birisi olarak gördüğünü ifade etmiştir. Rapora göre Türkiye yeşil

hidrojen üretim maliyetini 2035 yılında kilogram başına 2.4 Dolar, 2053 yılında 1.2 Dolar altına düşürmeyi, kurulu elektrolizör kapasitesini ise 2030'da 2 GW'a, 2035'de 5 GW'a ve 2050'de 70 GW'a çıkarmayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda mevzuatta gerekli değişikliklerin yapılacağı, depolamada, teknoloji, ar-ge ve ticari işbirliklerinde destek ve teşvik mekanizmalarının çalıştırılacağını, gerekli insan kaynağı konusunda da her türlü desteğin verileceği belirtilmektedir. Burada kritik olan bir konu da tüm çalışmaların yerli kaynaklarla sağlanacağı, yerli teknoloji kullanımı ve ülke içinde uygun insan kaynağı yetiştirilmesi ve temini üzerinde ısrarla durulmaktadır (T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Türkiye enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşıladığı doğal gaz ve petrol kaynakları anlamında ithalat yapmak zorunda olan bir ülkedir. Kömürde potansiyeli olmasına karşın kalitenin düşüklüğü sebebiyle istenilen verim elde edilememektedir. Yenilenebilir kaynaklarda önemli bir potansiyel olmasına karşın kullanım açısından henüz istenilen seviyeye gelinememiştir. Enerji verimliliği konusunda da alınması gereken ciddi bir mesafe bulunmaktadır. Bu durum ülkenin ekonomisine de yük getirmektedir ve cari açığa yol açmaktadır. Artan enerji fiyatları sebebiyle Temmuz 2022’de Türkiye’nin ticaret açığı tarihin en yüksek seviyesine, Ocak-Temmuz toplamında 62 Milyar Dolara ulaşmıştır (Alparslan, Energy Independence Only Comes with Clean, 2022, s. 13). Türkiye’nin enerji politikasının hedefi enerji arz güvenliğini sağlama yolunda kaynakları ve ithalatçıları çeşitlendirmektir.

Türkiye gerek Nisan 2017’de Enerji politikaları ve enerji güvenliğinde aldığı kararlar ile gerekse Paris İklim Anlaşmasını Ekim 2021’de onaylaması ile gerekse de Temmuz 2021’de duyurulan Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile çevre dostu enerji kaynakları konusunda adımlarını hızlandırmıştır. Türkiye, imzaladığı anlaşmalar ve ilgili mevzuat uyarınca, ancak en önemlisi kendi ihtiyacı doğrultusunda, bir enerji dönüşümüne gitmek ve bu dönüşümü iklim dostu şekilde yapmak zorundadır. Bu çerçevede kısa, orta ve uzun vadeli hedefler belirlenmiştir ve bu hedeflere uygun çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Yeşil hidrojen bu noktada enerjide önemli katkı yapabilecek bir enerji taşıyıcısıdır. Özellikle 2020 yılından itibaren gerek kamuda, gerek enerji sektöründe, gerekse toplumda yeşil hidrojen konusunda farkındalık hızla artmaktadır. Burada üzerinde durulması gereken en önemli konulardan birisi yeşil hidrojen üretiminin baştan sona tüm süreçlerde yerel kaynaklarla gerçekleştirilmesidir. Ocak 2023’de “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası”nın yayınlanması yeşil hidrojenin enerji dönüşümü sürecinin bir parçası olmasının yolunu açmıştır.

Yeşil hidrojen konusunda Türkiye’nin kendi enerji güvenliğine katkı sağlaması ötesinde Avrupa’ya ihracat yapma potansiyeli de bir diğer olumlu yönüdür. Yeşil hidrojen konusunda AB-Türkiye ticareti ekonomik kazanımlar dışında, karşılıklı bir bağımlılık yaratarak politik iletişimi de güçlendirebilecek bir unsur olabilir (Erdoğan, Eröz, & Grigoriadis, 2022, s. 3). Yeşil hidrojendeki ihracat potansiyeli, Türkiye’nin

Avrupa'nın enerji arzı güvenliğinde hali hazırdaki pozisyonunu güçlendirerek ülkenin jeopolitik önemine de katkı yapacaktır (Sağsen, (2021). UEA tahminlerine göre 2050 yılına kadar Avrupa'nın 50 milyar metreküp doğal gaz eşleniği talep ile en büyük yeşil hidrojen ithalatçısı olacağı öngörülmektedir (International Energy Agency, 2023, s. 396). Doğal gaz boru hatları ile Avrupa'ya hali hazırda nakil yapabilen Türkiye, doğal gaza yeşil hidrojen karışımı denemelerinde de olumlu sonuç alması sayesinde var olan boru hatları üzerinden yeşil hidrojeni iletebilir. Mevcut doğal gaz boru hatlarının hidrojene uygun hale getirilmesi yeni hidrojen boru hattı inşasına nazaran %10-%25 daha uygun maliyetlidir (Alvera, 2021, s. 133). Bu noktada ülkenin bir başka şansı var olan boru hatlarının ağırlığının polietilen boru hatları olmasıdır. Bu tip hatlarda teorik olarak %100'e kadar karışım mümkündür. Yeşil hidrojenin sıvı halde amonyak veya metanol olarak deniz yoluyla taşınması da bir diğer alternatiftir. Özellikle sanayi kollarında sıvı versiyonlarının kullanımı daha kolaydır. Hatta ulaşım sektörünün kendisinde yakıt olarak da amonyak, metanol kullanımı mümkündür. Türkiye bu bağlamda da büyük limanları ve yetişmiş insan kaynağı ile avantajlı bir durumdadır.

Hidrojenin doğal gaz boru hatlarına karışımı Türkiye açısından yeşil hidrojen dönüşümünde ilk basamak olabilir. Hem maliyet anlamında hem de kısa vadede sonuç alma yolunda bu adım ile dönüşüme başlanabilir. Hidrojenin enerji içeriğinin düşük olması sebebiyle karışımdaki oranın yüksekliği önem kazanmaktadır. İlk aşamada %5-%10 arası karışımla başlatılacak süreç sonrasında %20'ye kadar ulaşabilecektir. Türkiye'de doğal gaz talebi en çok kış aylarında artmaktadır. Bu mevsimde güneşlenme miktarının en düşük düzeyde olması sebebiyle, yazın üretilen temiz hidrojenin depolanabilmesi önem kazanmaktadır. Yazın üretilen fazla kışın kullanılabilir (Çolak, Aksoy, & Sanlı, Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi, 2021, s. 24). Türkiye günlük ortalama 4-12 saat arası kullanım süresi ile Avrupa'nın en güneşli ülkesi olarak bu alanda önemli bir avantaja sahiptir (Dincer, Javani, & Karayel, Türkiye için Hidrojen Çiftliği Konsepti Raporu, 2021, s. 13).

Mavi hidrojen, maliyet anlamında geçişi kolaylaştırarak dönüşümde ikinci basamakta yer alabilir. Özellikle de yüksek ölçekli uygulamalarda maliyet daha da düşebilir. Mevcut durumda gri hidrojen kilogram başına 1.5 Euro, mavi hidrojen 2-3 Euro, yeşil hidrojen 3.5-6 Euro arasında bir fiyata sahiptir (Kovac, Paranos, &

Marcus, 2021, s. 10022). Elektroliz teknolojisindeki ilerleme ile son 10 yıllık süreçte maliyet %60 düşmüştür ve bu eğilimin devamı durumunda 2030'da maliyetin şu andaki maliyetin yarısı olacağı öngörülmektedir (Kovac, Paranos, & Marcus, 2021, s. 10022). Mavi hidrojen dediğimiz karbon yakalama teknolojisine bir örnek olan metanol hem kimya sektöründe hem de başta denizcilik olmak üzere ulaşım sektöründe hali hazırda kullanılmaktadır (International Energy Agency, 2021, s. 72). Karbon sıfır hedefi doğrultusunda bu yöntem kısa vadede faydalı olmakla beraber nihai çözüm yeşil amonyak olacaktır. Amonyak gerek sanayide, gerek ulaşımda gerekse gübre üretiminde çok önemli bir araç olabilir.

Üçüncü basamakta karbonsuzlaşması zor alanlar olan ve Türkiye'nin dünyada ön sıralarda yer aldığı demir/çelik, çimento ve petrokimya gibi alanlarda yeşil hidrojene geçiş yapılabilir. Petrokimyada hali hazırda hidrojen kullanılmaktadır, dolayısıyla hidrojenin yeşil hidrojen olarak bu alanlara adapte edilmesi genel dönüşümde de önemli katkı yapacaktır. Bu noktada Türkiye'nin en önemli petrokimya tesislerinin İzmir'de yer alması hem burada güneşlenme miktarı ve güneşlenme gün sayısı anlamında bir avantaj oluşturmakta hem de olası bir ihracat durumunda liman üzerinden nakil yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Hidrojenin düşük yoğunluklu olması sebebiyle depolanması durumunda daha büyük depolara ihtiyaç olacaktır. Türkiye'nin mevcut doğal gaz depoları, tuz mağaraları bu bağlamda katkı sunabilir ancak yeşil hidrojenin amonyak gibi sıvı halde tutulması depolanması ve taşınması anlamında da faydalı olabilir.

Almanya 2021 yılı itibarıyla enerjide %60 ithal bağımlısıdır (Alvera, 2021, s. 181). 19 Nisan 2023 tarihinde İstanbul'da Türkiye, Almanya temsilcileri yeşil hidrojen konusundaki işbirliği ve Türkiye'nin potansiyelini tartışmak üzere bir araya geldiler. Almanya adına Federal Ekonomi ve İklim Koruma Bakanlığı, Finansal Araçlar ve Hidrojen Girişimleri Daire Başkanı Dr.Christian Storost katılırken, Türkiye adına da Yeşil Hidrojen Derneği Başkanı Yusuf Günay ve diğer temsilcileri katıldılar. Burada karşılıklı bir kazanç olasılığı gözükmektedir. Türkiye, yeşil hidrojen konusunda ciddi bir potansiyele sahip iken, Almanya ise bu konuda en gelişmiş teknoloji ve insan kaynağına sahip ülke olarak dikkat çekmektedir. Bu toplantının benzerinin Berlin'de gerçekleştirilmesi düşünülmektedir (Dokso, (2023). Yeşil Hidrojen Derneği'nin bu çabalarının siyasi otorite tarafından mutlaka desteklenmesi gerekmektedir.

Almanya'nın AB içerisinde en önemli aktörlerden birisi olduğu göz önüne alındığında Almanya ile başlatılacak inisiyatif tüm AB'ye ihracat yapılması konusunda ve yeşil hidrojen alanında işbirliği yolunda ilk adımları teşkil edecektir.

Ülkede şehirleşmenin artması yeşil hidrojen anlamında olumlu bir durumdur. Çünkü bu sayede şehir dışı alanlarda güneş panelleri veya rüzgar santrallerinin kullanımını daha kolay ve daha yaygın olabilir.

Yeşil hidrojen konusunda atılabilecek adımlar:

- Ulusal strateji belirlenmiştir ancak bunun yerel idarelerle paylaşılması, bilgi aktarımı ve rehberlik yapılması, yerel ve küçük ölçekli üretimin desteklenmesi gerekmektedir.
- Doğal gaz hatları uzun vadede daha yoğun yeşil hidrojen içerikli iletim yapabilecek hale getirilebilmesi amacıyla güncellenmelidir.
- Siyasi karar vericiler yeşil hidrojene özel teşvik mekanizmaları, bilinirliği artırıcı mekanizmalar geliştirmelidirler. Özellikle kamuoyunda bilinirliğin, farkındalığın artırılması hem yeşil hidrojene olan talebi artıracak hem de bu alanda araştırma geliştirme faaliyetlerinde bulunacak firma ve/veya kişileri teşvik edecektir.
- Bankacılık sektöründe yeşil hidrojen özelinde kredi imkânları artırılmalı ve yeşil hidrojene uygun paketler geliştirilmelidir. Gerek yeşil hidrojen yatırımcılarına gerekse elektrolizör teknolojisi konusunda çalışabileceklere bu konuda finansman fırsatları yaratılmalıdır.
- Üniversitelerde yeşil hidrojen desteklenmeli, enerji veya yenilenebilir kaynak müfredatlarına yeşil hidrojen dâhil edilmelidir. İlk ve orta dereceli eğitimde ise gerek yenilenebilir enerji gerekse yeşil hidrojen ve iklim değişikliğini önleme konusunda bilinçlenme adımları atılmalıdır.
- Organize sanayi bölgelerinde ve limanlarda yeşil hidrojen bölgeleri oluşturulmalıdır. Bu bölgelerde sıvılaştırma ve sıvıdan gaza geri dönüşüme uygun altyapılar, hem ikmal alanları oluşturulmalıdır.
- Nakliye yapılacak birimlerde nakliye yapılacak taşıtların (gemi, tanker, uçak, tren ve ağır kara taşıtları) da hidrojenle çalışabilir hale getirilmesi teşvik edilmelidir.

- Yeşil hidrojen derneğinin önerisi olan hidrojen çiftlikleri yerel olarak oluşturulmalı ve kendi buldukları bölgenin enerji ihtiyacının karşılanmasında görev almalıdır. Yerel üretimin yaygınlaşması sonrası uzun vadede bu üretimler bir ağ haline getirilebilir. Bu ağ sayesinde arz fazlası ve talep fazlası olan bölgeler arası alışveriş sağlanabilir.
- Hidrojen çiftliklerinin olduğu bölgelerde gübre üretimi desteklenmelidir.
- Gerekli mevzuat hazırlanmalı ve bu mevzuat uluslararası mevzuat ile uyumlu hale getirilmelidir. Hatta yeşil hidrojen için uluslararası mevzuatın da tam anlamıyla var olmadığı düşünüldüğünde Türkiye'nin büyük potansiyeli de göz önüne alınarak küresel çerçevenin oluşumuna da katkı verilmelidir.
- Vergi teşvik mekanizmaları ile yeşil hidrojen desteklenmelidir.
- Yeşil Hidrojen Derneği gibi sivil toplum kuruluşlarının çalışmaları desteklenmeli, uluslararası ve ikili işbirlikleri sağlanmalıdır. Özellikle yeşil hidrojenin taşınmasında, deniz rotalarının oluşumu ve boru hatları ile nakil konusunda standartlar ve hukuksal çerçeveler belirlenmelidir.
- Gerek nakliye kolaylığı gerekse depolama kolaylığı açısından yeşil hidrojenin amonyak gibi sıvı türevleri öncelikli olarak tercih edilmelidir.
- Özellikle demir çelik sanayi gibi hali hazırda hidrojen kullanan ancak bunu fosil yakıtlardan elde eden alanlarda yeşil dönüşüm konusunda destekleyici mekanizmalar, teşvik edici yöntemler ortaya çıkarılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abe, J., Popoola, A., Ajenifuja, E., & Popoola, O. (2019). Hydrogen Energy, Economy and Storage-Review and Recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*(44), 15072-15086.
- Acar, A., Güllü, A. B., Sarı, A. C., Aksoy, H., Taranto, Y., & Çolak, E. (2022). *Türkiye Enerji Dönüşümü Görünümü 2021*. İstanbul: Shura Enerji Dönüşüm Merkezi.
- Adolf, D., Balzer, D. H., Dr.Jurgen, L., Schabla, D.-I., Fishedick, P., Amold, D., . . . Schüwer, D.-I. (2017). *Energy of the Future, Sustainable Mobility through Fuel Cells and Hydrogen*. Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH.
- Alparslan, U. (2022). *Energy Independence Only Comes with Clean*. Ember.
- Alparslan, U. (2022). *Turkey Electricity Review 2022*. Ember.
- Alvera, M. (2021). *The Hydrogen Revolution, A Blue Print for the Future of Clean Energy*. New York: Basic Books Hachette Book Group.
- Aslan, Ö. (2007). Hidrojen Ekonomisine Doğru. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(11), 283-298.
- B.W.Ang, W. T. (2015, February). Energy security:Definitions, dimensionsandindexes . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 42, 1077-1093.
- Barnett, J. (2003, April). Security and Climate Change. *Global Enviromental Change*, 13(1), 7-17.
- BBC News Türkçe. (2022, Ağustos 24). *BBC News Türkçe*. BBC Türkçe: [https://www.bbc.com/turkce/articles/cq5vne99p45o], (Son Erişim Tarihi: 02 Şubat 2023)
- BBC Türkçe. (2023, Ocak 7). *Erdoğan, Karadeniz'de keşfedilen gaz rezervinin 710 milyar metreküpe ulaştığını açıkladı: 'Piyasa değeri 1 trilyon dolar'*. BBC Türkçe: [https://www.bbc.com/turkce/articles/clkx07prld4o], (Son Erişim Tarihi: 01 Mayıs 2023)
- Bektaş, B., Hakyemez, C., Yanık, D. Ö., & Yıldızca, O. (2021). *Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu*. İstanbul: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş.
- Bilgin, P. (2012). Enerji Güvenliğinin Ekonomi Politikası ve Türk Dış Politikası. R. Kalaycı, & E. Efeğil içinde, *Dış Politika Teorileri Bağlamında Türk Dış Politikasının Analizi Cilt 1* (s. 225-249). Ankara: Nobel Yayıncılık.
- Bloomberg HT. (2022, Kasım 8). *Bloomberg HT/Smart Güneş, yeşil hidrojen şirketi kuracak*. Bloomberg HT: [https://www.bloomberght.com/smart-gunes-yesil-hidrojen-sirketi-kuracak-2318788], (Son Erişim Tarihi: 16 Mayıs 2023)

- Bojek, P. (2022, September). *International Energy Agency/Reports/Hydroelectricity*. International Energy Agency: [<https://www.iea.org/reports/hydroelectricity>], (Son Erişim Tarihi: 23 Nisan 2023)
- Boudellal, M. (2018). *Power to Gas*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter GmbH.
- Chai, W. S., Bao, Y., Jin, P., Tang, G., & Zhou, L. (2021, May 28). A Review on Amonia, Ammonia-Hydrogen and Ammonia-Methane Fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, s. 16.
- Chen, A. (2022, October 22). *CNN/Inventing Tomorrow/The world's first hydrogen-powered haul truck could help clean up the mining industry*. The Cable News Network(CNN): [<https://edition.cnn.com/2022/10/06/world/hydrogen-mining-truck-first-mode-anglo-american-climate-spc-intl/index.html>], (Son Erişim Tarihi: 05 Mayıs 2023)
- Colak, E., Aksoy, H., & Sanlı, B. (2021). *Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi*. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi Enerji Politikaları Araştırma Merkezi.
- Çağatay, G. (2022, Mart 23). *Anadolu Ajansı/Ekonomi/Yeşil Hat*. Anadolu Ajansı: [<https://www.aa.com.tr/tr/cevre/turkiye-abnin-yesil-hidrojen-ihtiyacini-karsilamada-avantajli-durumda/2543104>], (Son Erişim Tarihi: 06 Mayıs 2023)
- Çelikpala, M. (2014, Kış). Enerji Güvenliği: NATO'nun Yeni Tehdit Algısı. *Uluslararası İlişkiler*, 10(40), 75-99.
- Çolak, E., Aksoy, H., & Sanlı, B. (2021). *Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyelinin Teknik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi*. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi.
- Dincer, I., Eroglu, I., & Ozturk, M. (2021). *Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası*. İstanbul: Hidrojen Teknolojileri Derneği.
- Dincer, I., Javani, N., & Karayel, G. K. (2021). *Türkiye için Hidrojen Çiftliği Konsepti Raporu*. İstanbul: Hidrojen Teknolojileri Derneği.
- Dokso, A. (2023, April 19). *Energy News/Germany – Turkey Collaboration To Boost Green Hydrogen Sector*. Energy News: [<https://energynews.biz/germany-turkey-collaboration-to-boost-green-hydrogen-sector/>], (Son Erişim Tarihi: 19 Mayıs 2023)
- Edenhofer, O., Madrugá, R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., . . . Von Stechow, C. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change* (s. 246). Cambridge University Press.

- Ellaban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014, July 11). Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and Their Enabling Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, s. 17.
- Ember. (2022, 07 27). [https://ember-climate.org/countries-and-regions/countries/turkey], (Son Erişim Tarihi: 06 Mayıs 2023)
- Erdoğan, E., Eröz, M., & Grigoriadis, T. N. (2022). *The Political Economy of the Green Hydrogen Transition*. İstanbul: Istanbul Policy Center, Sabancı University, Stiftung Mercator Initiative.
- Euronews. (2021, 10 25). *Euronews*. 03 04, 2022 tarihinde [https://tr.euronews.com/2021/10/25/japonya-s-f-r-karbon-emisyonu-hedefine-ulasmak-icin-yesil-hidrojene-yat-r-m-yap-yor], (Son Erişim Tarihi: 11 Mart 2023)
- Euronews*. (2022, Ağustos 25). Ağustos 25, 2022 tarihinde Euronews: [https://tr.euronews.com/2022/08/25/dunyanin-ilk-hidrojen-yolcu-trenleri-bugun-almanyada-sefere-cikiyor?utm_medium=Social&utm_source=Twitter&s=03#Echobox=1661418360], (Son Erişim Tarihi: 11 Mart 2023)
- Euronews. (2023, Ocak 27). *Euronews/Dünya/Almanya*. Euronews: [https://tr.euronews.com/2023/01/27/almanya-2030da-avustralyadan-yesil-hidrojen-almak-istiyor], (Son Erişim Tarihi: 11 Mart 2023)
- European Commission. (2020). *A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*. Brussels: European Commission.
- European Hydrogen Backbone. (2023, April 15). *European Hydrogen Backbone*. European Hydrogen Backbone: [https://ehb.eu/], (Son Erişim Tarihi: 23 Mart 2023)
- Gazbir-Gazmer Uluslararası İlişkiler Komisyonu. (2020). *Doğal Gaz Sistemlerinde Hidrojene Geçiş: Avrupa Örneği*. Gazbir-Gazmer.
- Geraldine, H. (2022, Eylül 21). *Euronews/Mobilite/Yol ayrımı: Hidrojen yakıtlı araçlar elektrikli araçlara alternatif olabilir mi?* Euronews: [https://tr.euronews.com/next/2022/09/21/yol-ayrimi-hidrojen-yakitli-araclar-elektrikli-araclara-alternatif-olabilir-mi], (Son Erişim Tarihi: 11 Mart 2023)
- Göksal, S. (2022, August 29). *Synergy-Bilkent Energy Policy Research Center*. Turkey's Green Hydrogen Potential and Strategy - Sarper Göksal: [https://www.bilkentepc.com/post/turkey-s-green-hydrogen-potential-and-strategy-sarper-g%C3%B6ksal], (Son Erişim Tarihi: 12 Mart 2023)
- Güllü, A. B., Aksoy, H., Serhadlıoğlu, S., Taranto, Y., Çalışkan, R. Y., De Vita, A., . . . Dinçel, G. (2023). *Net Sıfır 2053: Türkiye Elektrik Sektörü için Yol Haritası*. İstanbul: Shura Enerji Dönüşüm Merkezi.

- Güney, T. (2019). Renewable Energy, non-renewable Energy and Sustainable Development. *International Journal of Sustainable Development&World Ecology*, 26(5), 389-397.
- Haghighi, S. S. (2007). *Energy Security The External Legal Relations of the European Union with Major Oil and Gas Supplying Countries*. Oxford and Portland, Oregon: Hart Publishing.
- Hatipoğlu, E. (2019, Kasım). "Enerji Güvenliği", *Güvenlik Yazıları Serisi, No.44*. Mart 18, 2022 tarihinde TRGÜVENLİK PORTALI: [https://trguvenlikportali.com/wp-content/uploads/2019/12/EnerjiGuvenligi_EmreHatipoglu_v.1.pdf], (Son Erişim Tarihi: 05 Şubat 2023)
- Iberdrola. (2023, April 8). *Iberdrola/About us/what we do/green hydrogen/green methanol*. Iberdrola: [<https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/green-hydrogen/green-methanol/>], (Son Erişim Tarihi: 07 Mayıs 2023)
- IICEC. (2021, December 2). Hydrogen Trains Run for the first time in France. *IICEC Energy market Newsletter*(23).
- International Energy Agency. (2019, June). *The Future of Hydrogen, Seizing Today's Opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2021, 10 November). *Data and Statistics*. International Energy Agency: [<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer/>], (Son Erişim Tarihi: 18 Mart 2023)
- International Energy Agency. (2021, April). *Global Enerji İncelemesi 2021*. Haziran 10, 2022 tarihinde International Energy Agency: [<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions/>], (Son Erişim Tarihi: 18 Mart 2023)
- International Energy Agency. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. International Energy Agency. IEA Publications.
- International Energy Agency. (2021). *Key World Energy Statistics/2021 Final Consumption*. Paris: International Energy Agency. International Energy Agency: [<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption/>], (Son Erişim Tarihi: 19 Mart 2023)
- International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050, A Road Map for the Global Energy Sector*. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2021, December). *Renewables 2021, Analysis and Forecast to 2026*. International Energy Agency.

- International Energy Agency. (2021). *Turkey 2021 Energy Policy Review*. France: IEA Publications.
- International Energy Agency. (2022). *Global Hydrogen Review 2022*. International Energy Agency Publications.
- International Energy Agency. (2022, May). *International Energy Agency/Energy Balances*. Haziran 11, 2022 tarihinde International Energy Agency: [<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>], (Son Erişim Tarihi: 19 Mart 2023)
- International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency, Paris.
- International Energy Agency Geothermal. (2022). *IEA Geothermal Annual Report*. IEA Geothermal.
- International Renewable Energy Agency. (2022, February 22). *International Renewable Energy Agency/Energy-Transition/Hydropwer*. International Renewable Energy Agency: [<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydropower>], (Son Erişim Tarihi: 25 Mart 2023)
- International Renewable Energy Agency. (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1,5 C Pathway*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency. (2023, March 31). *International Renewable Energy Agency/Energy Transition/Geothermal Energy*. International Renewable Energy Agency: [<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy>], (Son Erişim Tarihi: 26 Mart 2023)
- International Renewable Energy Agency. (2023, April 7). *International Renewable Energy Agency/Energy-Transition/Bioenergy and biofuels*. International Renewable Energy Agency: [<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Bioenergy-and-biofuels>], (Son Erişim Tarihi: 25 Mart 2023)
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Scaling Up Investments in Ocean Energy Technologies*. International Renewable Energy Agency&Ocean Energy Europe.
- Kabakçı, O. K. (2019). *Binalarda Enerji Verimliliği*. Ankara: T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Karsan. (2022, Eylül 20). *Karsan/Basın Odası/karsan-hidrojen-cagini-baslatiyor*. Karsan: [<https://www.karsan.com/tr/basin-odasi/guncel-haberler/karsan-hidrojen-cagini-baslatiyor>], (Son Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2023)
- Kaypak, Ş. (2012). Güvenlikte Yeni Bir Boyut; Çevresel Güvenlik. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(8), 1-22.

- Kazak, T. (2018, Şubat 11). *Anadolu Ajansı/Türkiye/Konutların doğalgazının yarısı Tuz Gölü'nde depolanacak*. Anadolu Ajansı: [https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/konutlarin-dogalgazinin-yarisi-tuz-golunde-depolanacak/1060082], (Son Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2023)
- Kibaroglu, M. (2004, Ocak 15-16). Dünya ve Türkiye'deki Enerji ve Su Kaynaklarının Ulusal ve Uluslararası Güvenliğe Etkileri. İstanbul, Türkiye.
- Kovac, A., Paranos, M., & Marcius, D. (2021). Hydrogen in energy Transition: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 10016-10035.
- Kurtoğlu, D. (2014, Kasım). Sürdürülebilir Büyüme için Sürdürülebilir Enerji: Hidrojen. *Elektrik Mühendisliği*, 63.
- Macrotrends. (2023, March). *Crude Oil Price History Chart*. Macrotrends: [https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart], (Son Erişim Tarihi: 28 Mart 2023)
- Mazzetti, M., Wong, E., & Entous, A. (2022, October 25). *New York Times*. Kasım 8, 2022 tarihinde [https://www.nytimes.com/2022/10/25/us/politics/us-saudi-oil-deal.html], (Son Erişim Tarihi: 18 Şubat 2023)
- McKinsey&Company. (2022). *Global Energy Perspective 2022*.
- Melikoglu, M. (2018, January 15). Current Status and Future of Ocean Energy Sources: A Global Review. *Ocean Engineering*.
- Morawski, A. W., Cmielewska, K., Ekiert, E., Kusiak-Nejman, E., Pelech, I., Staciwa, P., . . . Narkiewicz, U. (2022, May 24). Effective Green Ammonia Synthesis from Gaseous Nitrogen and CO₂ Saturated-Water Vapour Utilizing a Novel Photocatalytic Reactor. *Chemical Engineering Journal*, s. 10.
- Myllyvirta, L. (2020, 02 19). *Carbon Brief/Coronavirus Analysis*. 04 26, 2022 tarihinde Carbon Brief: [https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-has-temporarily-reduced-chinas-co2-emissions-by-a-quarter], (Son Erişim Tarihi: 05 Mart 2023)
- Nasdaq. (2023, April 18). *Nasdaq Natural Gas Historical Data*. Nasdaq: Stock Market, Data Updates, Reports&News: [https://www.nasdaq.com/market-activity/commodities/ng:nmx/historical], (Son Erişim Tarihi: 04 Mart 2023)
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2015, September 28). A Comparative Overview of Hydrogen Production Processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, s. 598-610.
- Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2021, December 31). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition-A Technological and Geopolitical Perspective. *Hydrogen Economy: Challenges and Opportunities*.

- OEC World. (2023, Nisan 10). *OEC World/Ammonia*. OEC World: [https://oec.world/en/profile/hs/ammonia#:~:text=Historical%20Data&text=In%202021%2C%20the%20top%20exporters,%2C%20and%20Belgium%20(%24412M)], (Son Erişim Tarihi: 22 Nisan 2023)
- Owusu, P. A., & Sarkodie, S. A. (2016, Nisan 4). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 1-14.
- Ozdemir, Z. O., & Mutlubaş, H. (2019, Temmuz 31). Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, s. 16-34.
- Özdemir, Z. Ö., & Mutlubaş, H. (2019, Temmuz 31). Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 2((1)), 16-34.
- Özdemir, Z. Ö., & Mutlubaş, H. (2019, Temmuz 31). Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, s. 16-34.
- Petrotürk. (2023, Ocak 25). *Petrotürk/Yenilenebilir Enerji Haberleri/Yeşil Hidrojen Geleceğin Enerjisi Olacak*. Petrotürk: [https://www.petroturk.com/yenilenebilir-enerji-haberleri/yesil-hidrojen-gelecegin-enerjisi-olacak], (Son Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2023)
- Ratnakar, R. R., Gupta, N., Zhang, K., Casimir, V., Fesmire, J., Dindoruk, B., & Balakotaiah, V. (2021, July 9). Hydrogen Supply Chain and Challenges in Largescale LH2 Storage and Transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24149-24168.
- Reid, W. V., Ali, M. K., & Field, C. B. (2020, January). The Future of Bioenergy. *Global Change Biology*.
- Reinsch, W. A. (2021, April 13). *Hydrogen: The Key to Decarbonizing the Global Shipping Industry?* Center For Strategic&International Studies: [https://www.csis.org/analysis/hydrogen-key-decarbonizing-global-shipping-industry], (Son Erişim Tarihi: 18 Mayıs 2023)
- Rzayeva, G., & Lambert, M. (2021, Nowmber). What Role for Hydrogen in Turkey's Energy Future? *The Oxford Institute for Energy Studies*, s. 1-20.
- Sağsen, D. (2021, Kasım 29). *Anadolu Ajansı/Analiz/Yeşil Hidrojen Enerjisi ve Türkiye'nin Potansiyeli*. Anadolu Ajansı: [https://www.aa.com.tr/tr/analiz/yesil-hidrojen-enerjisi-ve-turkiye-nin-potansiyeli/2433441], (Son Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023)
- Saygın, D., Gencer, E., & Sanlı, B. (2021). *Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları*. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi.

- Scipioni, A., Manzardo, A., & Ren, J. (Dü). (2017). *Hydrogen Economy, Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability*. London: Academic Press.
- Sheehan, M. (2005). *International Security: An Analytical Survey*. Boulder, Lynne Rienner Publishers.
- Şahin, S. (2006). Nükleer Hidrojen Üretimi. B. Görgün, & S. Alagöz içinde, *III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Bildiri Kitabı*.
- Şahin, Ü., Tör, O. B., Kat, B., Teimourzadeh, S., Demirkol, K., Künar, A., . . . Yeldan, E. (2021). *Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası, 2050'de Net Sıfır*. İstanbul Politikalar Merkezi. İstanbul: İstanbul Politikalar Merkezi.
- T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2022). *Petrol Piyasası 2021 Yılı Sektör Raporu*. Ankara: EPDK.
- T.C.Dış İşleri Bakanlığı. (2023, Şubat 22). *T.C.Dış İşleri Bakanlığı/Paris Anlaşması*. T.C.Dış İşleri Bakanlığı: [https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa#:~:text=Paris%20Anla%C5%9Fmas%C4%B1%207%20Ekim%202021,BM%20Sekretaryas%C4%B1'na%20tevdi%20edilmi%C5%9Ftir.], (Son Erişim Tarihi: 19 Mayıs 2023)
- T.C.Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2022). *Doğal Gaz Piyasası 2021 Yılı Sektör Raporu*. Ankara: T.C.Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.
- T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023, Ocak 19). *T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. Duyurular: [https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=20316], (Son Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2023)
- T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023, Nisan 17). *T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı/Bilgi Merkezi/Elektrik*. T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: [https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik], (Son Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023)
- T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası*. Ankara: T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- T.C.Güney Marmara Kalkınma Ajansı. (2023, Ocak 31). *T.C.Güney Marmara Kalkınma Ajansı/Haber/Türkiye'nin İlk Yeşil Hidrojen Vadisi Kuruluyor*. T.C.Güney Marmara Kalkınma Ajansı: [https://www.gmka.gov.tr/haber/turkiyenin-ilk-yesil-hidrojen-vadisi-kuruluyor], (Son Erişim Tarihi: 20 Nisan 2023)
- T.C.Ticaret Bakanlığı. (2021, Temmuz 16). *T.C.Ticaret Bakanlığı/Haberler/Yeşil Mutabakat Eylem Planı Yayınlandı*. T.C.Ticaret Bakanlığı: [https://ticaret.gov.tr/haberler/yesil-mutabakat-eylem-planı-yayimlandi], (Son Erişim Tarihi: 06 Şubat 2023)

- The International Renewable Agency. (2019). *Hydrogen-A Renewable Energy Perspective*. Abu Dhabi: The International Renewable Agency.
- The International Renewable Energy Agency. (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- The International Renewable Energy Agency. (2022, October 28). *The International Renewable Energy Agency/solar*. The International Renewable Energy Agency: [<https://www.irena.org/solar>], (Son Erişim Tarihi: 25 Mart 2023)
- The International Renewable Energy Agency. (2022, October 26). *The International Renewable Energy Agency/wind*. The International Renewable Energy Agency: [<https://www.irena.org/wind>], (Son Erişim Tarihi: 26 Mart 2023)
- The International Renewable Energy Agency. (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1,5 C Pathway*. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency.
- The World Bank. *Population Density*. The World Bank: [<https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST>], (Son Erişim Tarihi: 15 Nisan 2023)
- The World Bank. *Population Growth*. The World Bank: [<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>], (Son Erişim Tarihi: 15 Nisan 2023)
- The World Bank. *Urban Population*. The World Bank: [<https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>], (Son Erişim Tarihi: 15 Nisan 2023)
- The World Bank. *Population Total*. The World Bank: [<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>], (Son Erişim Tarihi: 23 Nisan 2023)
- The World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Timperley, J. (2018, May 03). *CarbonBrief Ülke Profilleri/Türkiye*. CarbonBrief Clean on Climate: [<https://www.carbonbrief.org/carbon-brief-profile-turkey/>], (Son Erişim Tarihi: 05 Mart 2023)
- Tutar, F., & Eren, M. V. (2011, Winter). Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye. *International Journal of Economic and Administrative Studies*(6).
- Tüpraş. (2021, Kasım 24). *Tüpraş/Basın Bülteni/Tüpraş 2050'de Karbon Nötr Hedefiyle Stratejik Dönüşüm Yolculuğunu Başlattı*. Tüpraş: [<https://www.tupras.com.tr/basin-bultenleri?detay=basin-bulteni-24112021>], (Son Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2023)

Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası. (Eylül 2022). *Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Ödemeler Dengesi İstatistikleri*.

Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023, Ocak 4). *Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı/Çevresel Göstergeler/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari*. Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: [https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789], (Son Erişim Tarihi: 08 Mart 2023)

Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022, Aralık 26). *Çevresel Göstergeler/Yakıta Göre Birincil Enerji Tüketimi*. Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: [https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/yakita-gore-birincil-enerji-tuketimi-i-85801#:~:text=2020%20y%C4%B1%C4%B1%20itibar%C4%B1yla%20AB%2D27,di%C4%9Fer%20kaynaklardan%20kar%C5%9F%C4%B1lanm%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1r%5Bi%5D.], (Son Erişim Tarihi: 08 Mart 2023)

Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023, Nisan 20). *Çevresel Göstergeler/Sektörlere Göre Toplam Enerji Tüketimi*. Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: [https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sectorlere-gore-toplam-enerji-tuketimi-i-85800], (Son Erişim Tarihi: 08 Mart 2023)

Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı. (2023, Nisan). *Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı*. Paris Anlaşması: [https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa#:~:text=Paris%20Anla%C5%9Fmas%C4%B1%207%20Eki m%202021,BM%20Sekretaryas%C4%B1'na%20tevdi%20edilmi%C5%9Ftir .], (Son Erişim Tarihi: 29 Nisan 2023)

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (tarih yok). *Türkiye'de Elektrik Üretimi*. 07 16, 2022 tarihinde Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: [https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik] (Son Erişim Tarihi: 09 Mart 2023)

Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2022). *Petrol Piyasası 2021 Yılı Sektör Raporu*. Ankara: EPDK.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2022, Mart 30). *Türkiye İstatistik Kurumu/Haber Bülteni/Sera Gazı Emisyon İstatistikleri*. Türkiye İstatistik Kurumu: [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862#:~:text=CH4%20emisyonlar%C4%B1n%C4%B1n%20%61'i,ve%20% C3%BCr% C3%BCn%20kullan%C4%B1m%C4%B1%20sekt%C3%B6r% C3%BCnden%20kaynakland%C4%B1.], (Son Erişim Tarihi: 12 Mart 2023)

Türkiye İstatistik Kurumu. (2023, Mart 31). *Türkiye İstatistik Kurumu/İstatistiksel Tablolar*. Türkiye İstatistik Kurumu: [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Subat-2023-49622], (Son Erişim Tarihi: 11 Mart 2023)

- Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı. (2022). *2021 Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu*. Türkiye Petrolleri A.O. Ankara: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı.
- Ullman, R. (1983). Redefining Security. *International Security*, 129-153.
- United Nations. (2022, October 28). *UN 2016 Affordable and Clean Energy: Why it Matters*. Haziran 22, 2022 tarihinde United Nations: [https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2016/08/7_Why-it-Matters_Goal-7_CleanEnergy_2p.pdf'], (Son Erişim Tarihi: 18 Şubat 2023)
- United Nations. (2022, October 28). *United Nations Climate Change*. 6 22, 2022 tarihinde United Nations-Yenilenebilir Enerji Nedir?: [https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy], (Son Erişim Tarihi: 19 Şubat 2023)
- United Nations. (2023, April 4). *United Nations/The Paris Agreement*. United Nations Climate Change: [https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement], (Son Erişim Tarihi: 19 Şubat 2023)
- US Energy Information Administration. (2023, April 12). *Petroleum and Other Liquids Data*. US Energy Information Administration: [https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=RB RTE&f=M], (Son Erişim Tarihi: 12 Nisan 2023)
- World Bank. (2022, October 28). *Dünya Bankası Karbon Dioksit Emisyonları 1990-2018*. Haziran 12, 2022 tarihinde World Bank: [https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?end=2018&start=1990&view=chart], (Son Erişim Tarihi: 05 Mart 2023)
- Worldometer. (2022, Ekim 28). *Worldometer World Population by Year*. Haziran 20, 2022 tarihinde Worldometer: [https://www.worldometers.info/world-population/world-population-by-year], (Son Erişim Tarihi: 04 Mart 2023)
- Wu, W.-P., Wu, K.-X., Zeng, W.-K., & Yang, P.-C. (2022, July 8). Optimization of Long Distance and Large Scale Transmission of Renewable Hydrogen in China: Pipelines vs. UHV. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58).
- Xie, X., Ni, C., Wang, B., Zhang, Y., Zhao, X., Liu, L., . . . Du, W. (2019, October 11). Recent Advances in Hydrogen Generation Processes via Hydrolysis of Mg-based Materials: A Short Review. *Journal of Alloys and Compounds*.
- Yergin, D. (2006, Mar. - Apr.). Ensuring Energy Security. *Foreign Affairs*, 85, 69-82.
- Yergin, D. (2011). *The Quest, Energy, Security, and The Remaking of the Modern World*. London: The Penguin Press.
- Yorucu, V., & Özay, M. (2018). *The Southern Energy Corridor: Turkey's Role in European Energy Security*. Cham: Springer International Publishing.