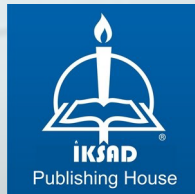


ALTERNATİF BİR KAYNAK OLARAK TÜRKİYE'DE HİDROJEN ENERJİSİ

Fatih KILIÇ
Doç. Dr. Muhammed ORAL

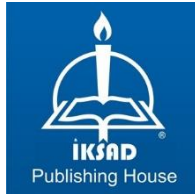


**ALTERNATİF BİR KAYNAK OLARAK TÜRKİYE'DE
HİDROJEN ENERJİSİ**

Fatih KILIÇ

Doç. Dr. Muhammed ORAL

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10429043>



Copyright © 2023 by iksad publishing house

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law.

Institution of Economic Development and Social Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TURKEY TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules. The first degree responsibility of the works in the book belongs to the authors.

Iksad Publications – 2023©

ISBN: 978-625-367-526-4

Cover Design: İbrahim KAYA

Cover Photo: Nasa, Source: URL 19

December / 2023

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

ÖNSÖZ

“Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye’de Hidrojen Enerjisi” adlı bu çalışma, Doç. Dr. Muhammed ORAL danışmanlığında hazırlanmış ve 25/08/2023 tarihinde savunularak başarılı olmuş “Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye’de Hidrojen Enerjisi” adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Enerji, tüm ülkeler için refahı, kalkınmayı ve istikrarı beraberinde getirmektedir. Küreselleşme ve teknolojinin gelişimi ile enerjiye olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Enerji talebinin artması ile fosil yakıtlara talep de artmaktadır. Ancak bu durum çevresel sorunları ve enerji güvenliği endişelerini beraberinde getirmektedir. 1970’li yıllarda yaşanan enerji krizleri ile hem çevresel sorunlara hem de sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelik arayış artmıştır.

Bu çalışma “Alternatif Bir Kaynak Olarak Türkiye’de Hidrojen Enerjisi” başlığı altında 21. yüzyılın enerji kaynağı olarak değerlendirilen hidrojen enerjisinin Türkiye için rolünü ve potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Türkiye’nin enerji güvenliğini sağlaması, sürdürülebilir, çevreci bir enerji stratejisi oluşturmasına imkân verecektir.

Araştırmanın tüm sürecinde hiçbir zaman yardımını esirgemeyen her zaman yol gösteren danışman hocam sayın Doç. Dr. Muhammed ORAL’a teşekkür ederim. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim süresince hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Fatih AYDIN’a, Prof. Dr. Ünal ÖZDEMİR’e, Prof. Dr. Osman ÇEPNİ’ye ve Karabük Üniversitesi Coğrafya Bölümünde tüm emeği geçen değerli hocalarıma çok teşekkür ederim. Sabrından ve desteklerinden ötürü canım aileme teşekkür ederim. Desteğini her zaman yanımda hissettiğim lisans, yüksek lisans arkadaşım Kübra METİN’e teşekkür ederim. Ve son olarak Cumhuriyetimizin 100. Yılında bize bu ülkeyi emanet eden Gazi Mustafa KEMAL ATATÜRK’e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR.....	v
GİRİŞ	1
ARAŞTIRMANIN AMACI VE ÖNEMİ	3
ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ.....	5
1. BÖLÜM.....	6
1.1. Coğrafya ve Enerji Coğrafyası	6
1.2. Enerji Güvenliği Kavramı	9
1.3. Fosil Yakıtlar ve Geleceği	16
1.3.1.Kömür	17
1.3.2.Petrol	21
1.3.3.Doğalgaz.....	23
1.4. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Geleceği.....	25
1.4.1.Hidrolik Enerji	26
1.4.2.Güneş ve Rüzgâr Enerjisi	28
1.4.3. Jeotermal Enerji.....	29
1.4.4.Biyokütle Enerjisi.....	30
2. BÖLÜM.....	31
2.1. Bir Kaynak Olarak Hidrojen Enerjisi	31
2.2. Hidrojenin Üretimi, Depolanması ve Taşınması	36
2.2.1.Hidrojenin Üretimi.....	37
2.2.2.Hidrojenin Depolanması.....	45
2.2.3.Hidrojenin Taşınması.....	48
2.3.Hidrojenin Renkleri	51
2.4.Yakıt Pilleri.....	52
2.5.Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi Uygulamaları.....	54
2.6.Dünya Enerji Politikalarında Hidrojen Enerjisi.....	63
2.7.Türkiye’de Hidrojen Enerjisi.....	69
2.8.Karadeniz’de Hidrojen Sülfür.....	72
2.9.Bozcaada Hidrojen Tesisi	74
2.10.Güney Marmara Hidrojen Vadisi	75
2.11.Türkiye Kalkınma Planlarında Hidrojen Enerjisi.....	75

3. BÖLÜM.....	77
3.1. Bulgular.....	77
SONUÇ.....	90
KAYNAKÇA	95
HARİTALAR LİSTESİ.....	104
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	105
EKLER.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	108

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CO₂	: Karbondioksit
EIA	: U.S. Energy Information Administration/ ABD Enerji Enformasyon İdaresi
GW	: Gigawatt
GWEC	: Global Wind Energy Council/Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi
H₂	: Hidrojen
IEA	: International Energy Agency/Uluslararası Enerji Ajansı
IRENA	: International Renewable Energy Agency/ Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
KW	: Kilowatt
MW	: Megawatt
NATO	: North Atlantic Treaty Organization/ Kuzey Atlantik Anlaşması Örgütü
OPEC	: Organization of the Petroleum Exporting Countries/ Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü
SSCB	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TW	: Terawatt

GİRİŞ

Enerji 21. yüzyılda toplumun yapısını etkileyecek en önemli faktördür. Enerji kaynaklarının mevcudiyeti ve maliyeti, yaşam kalitesini, ulusal ekonomilerin sürekliliği, çevrenin korunması ve uluslararası ilişkilerde yakından ilişkilidir (Fanchi, 2005, s. 171). Sürdürülebilir bir ekonomi için enerji önemli bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Fakat enerji ihtiyacını karşılamak amacı ile fosil kaynakların kullanılması çevresel problemlere yol açmaktadır. Ayrıca fosil kaynaklara olan bağımlılık arttıkça yükselen enerji fiyatları özellikle gelişmekte olan ülkelerin üzerinde ekonomik olarak baskı oluşmakta ve enerji güvenliğini tehdit etmektedir.

Enerji refah bir toplum oluşturmanın anahtarıdır. Toplumun gelişmiş hale getirebilmek için enerjiye ihtiyaç vardır, bu yüzden ülkeler enerji kaynaklarına ve kaynakları yönetebilme kabiliyetine sahip olmak istemektedirler. Buradan yola çıkarak enerjinin dünya siyasetini belirleyici bir rol oynadığını söyleyebilmekteyiz. Yaşanan ve yaşanabilecek siyasi, askeri, ekonomik, sosyal gerilimler sonucu enerjiye erişmek zorlaşabilmektedir. Bu sorunlar enerji güvenliği kavramını ortaya çıkarmıştır. Enerji güvenliği ülkelerin enerji politikaları ve dış politikaları açısından stratejik öneme sahiptir.

1973 yılında yaşanan Yom-Kippur (Arap-İsrail) Savaşı'nda ABD'nin İsrail'e olan yardımı ve İsrail'e destek olan ülkelere karşı cevaben petrol üreten Arap ülkeleri OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries/Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü) ve OAPEC (Organization of Arab Petroleum Exporting Countries/ Petrol İhraç Eden Arap Ülkeleri Örgütü) petrol ambargosu uygulamıştır. Petrol bir hammadde olmasına rağmen siyasi çatışmalar için bir silah olarak kullanılmıştır. Ambargodan önce bir varil petrol 2,90 dolar üzerinden işlem görmekteydi bu fiyat 1974 başında ise 11,65 dolara kadar yükselmiştir (Hayes, 2022). Ambargo 1974 yılının başında kaldırılmıştır fakat fosil enerji kaynaklarını hiç bitmeyecek gibi algılayan batılı ülkeler için ambargo büyük bir şoktu. Fosil yakıtlar dışında pek fazla alternatifi bulunmayan enerji ithalatçısı ülkeler kaynaklarını çeşitlendirmeyi hedeflemişlerdir. Bu yüzden ki 1973 petrol krizi yenilenebilir enerji kaynakları için bir dönüm noktası haline gelmiştir.

Bu doğrultuda yenilenebilir enerji kaynakları içerisine dahil edebileceğimiz hidrojen enerjisine ilgi son yıllarda artmıştır. Yenilenebilir

kaynaklar ile üretilecek hidrojen dünyanın enerji sorununa katkıda bulunacaktır.

ARAŞTIRMANIN AMACI VE ÖNEMİ

Bu çalışmanın amacı, küresel enerji politikalarında stratejik hale gelen ve yenilenebilir enerjiler içinde yer alan hidrojen enerjisinin elektrik üretiminde, ulaşımda, sanayide, tarımda, konutlarda kullanımına yönelik alabileceği rolü dünyada ve Türkiye’de analiz etmektir. Dünyada büyük bir hızla yenilenebilir enerjilere geçiş söz konusudur. Bu sebeple yeşil enerjiler olarak adlandırılan yenilenebilir kaynaklar tüm ülkeler için stratejik kaynaklara dönüşmüşlerdir. Türkiye’de doğrudan hidrojen enerjisine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Enerji alan yazınında hidrojen enerjisine “21. Yüzyılın Enerji Kaynağı” misyonu yüklenmekte dolayısıyla hidrojen enerjisi her sektörde geleceğin enerji kaynağı olarak addedilmektedir. Küresel Enerji politikalarında dikkat çeken ve odaklanılan iki konu vardır bunlardan biri fosil yakıt kullanımının azaltılması bir diğeri ise küresel iklim değişimine yönelik önlemlerin alınmasıdır. Buna göre bu iki sonuç birbiriyle örtüşmektedir. Bu bağlamda küresel enerji politikalarında temiz enerjilerin kullanımının artırılmasına yönelik politikaların geliştirildiği ve büyük yatırımların yapıldığı görülmektedir.

Bu kapsamda enerji talebi her yıl artan Türkiye’nin de küresel iklim değişimi, fosil yakıt kullanımının azaltılması, temiz enerjiye geçiş gibi amaçları bulunmaktadır. Küresel bazda düşünüldüğünde Türkiye bu konuda en fazla yatırım ülkelerden biridir. Bu kapsamda karbon nötr 2050 ve Paris İklim Anlaşmasının Türkiye’nin bu hedefleri gerçekleştirmesinde önemli bir motivasyon kaynağı olduğu görülmektedir. Bununla beraber Türkiye’nin hidrojen enerjisine yönelik politikalarının ve uygulamalarının gelişmiş dünyanın gerisinde kaldığı görülmektedir. Önemli hidrojen rezervlerine sahip Türkiye bu konuda proaktif bir politika izlemelidir. Hidrojen enerjisi diğer yenilenebilir enerjilerden daha yüksek verim sağlayan bir enerji kaynağıdır. Bu yüzden hidrojen enerjisini Türkiye’nin enerji portföyünde güçlü şekilde yer alması gerekmektedir. Buna göre çalışma son dönem küresel enerji politikalarında olduğu gibi Türkiye içinde stratejik bir kaynak olabilecek hidrojen enerjisini günümüz ve gelecek ölçeğinde fırsatlar ve riskler bağlamında analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Coğrafya alanında konuyla ilgili daha önce yapılmış herhangi bir tez çalışması bulunmamaktadır. Dolayısıyla söz konusu çalışmanın enerji coğrafyasına kuramsal ve metodolojik katkı sunacağı düşünülmektedir

ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ

Araştırmada veri toplamak amacı ile yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Yarı yapılandırılmış görüşme gerçekleştirilirken araştırmacı, önceden hazırlamış olduğu soruların dışına çıkmadan katılımcılara sorularını yöneltir. Fakat katılımcıların vermiş olduğu cevaplara göre görüşme yapılan kişilerin bakış açılarını ve derinlemesine olan bilgilerin ortaya çıkarmak amacıyla ek sorular sorulabilmektedir (Kılınç vd.,2017). Bu çalışmada nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Araştırma bir durum çalışmasıdır (case study). Araştırmada nitelikli ve derinlemesine olan bilgilerin sektördeki ve akademideki kişilerden alınacağı düşünülmüştür. Bundan dolayı örneklem yöntemlerinden olan ölçüt örneklem yöntemi uygulanmıştır. Çalışma grubunun seçiminde kullanılan ölçüt uzman ve üst düzey olmaktadır. Bu doğrultuda toplam 9 yetkili ile görüşülmüştür.

Doküman analizi sonucunda bir araştırma sorusu olarak ortaya çıkan küresel ve ulusal ölçekte hidrojen enerjisinin görünümü ve geleceği hususunda yarı yapılandırılmış görüşmeler bir kişi ile doğrudan diğerleri ile ise çevrimiçi tekniğiyle görüşmeler yapılmıştır. Çalışma grubunda bir akademisyen geriye kalan sekiz kişi ise sektör çalışanlarıdır. Araştırmaya dahil olan katılımcılar “K” harfi ile kodlanmıştır. Katılımcılarla önceden belirlenen yer ve saatte görüşmeler gerçekleşmiş ve görüşmeye başlamadan önce araştırmanın amacı tekrar edilmiştir. Görüşmeler yaklaşık 25-30 dakika arasında sürmüştür. Görüşmede katılımcıların yanıtları ses kaydına alınmıştır. Sonrasında ses kayıtları deşifre edilerek temalar oluşturulmuştur.

Ayrıca enerji sektöründe önde gelen ulusal ve uluslararası (TÜİK, EİGM, TEİAŞ, IEA, EIA, IRENA, SHELL, BP) çeşitli kuruluşların verilerinden yararlanılmıştır. Elde edilen veriler ikincil veriler kapsamındadır. Bu doğrultuda söz konusu kuruluşların verilerinden yararlanılarak Excel üzerinden grafikler ve ArcGIS 10.4.1 programına entegre edilen veriler ile haritalar oluşturulmuştur.

1. BÖLÜM

1.1. Coğrafya ve Enerji Coğrafyası

İnsan, var oluşundan bu yana içindeki keşfetme dürtüsü ile hareket etmektedir. Yaşadıkları mağaralara dış dünyada gördüklerini çizen ve daha da ilerisini merak eden insanoğlu ilerleyen süreçte okyanusları geçecek gemileri inşa etmiştir. Coğrafi Keşifleri de başlatan insanın merak dürtüsü coğrafya biliminin doğuşuna sebebiyet vermiştir. Coğrafyanın akademik olarak üniversitelerde ders olarak okutulması için ise 19. yüzyıla kadar beklemesi gerekecektir. İnsan-mekân ilişkisini ortaya çıkartan coğrafya, zamanla birbirinden farklı düşünceler ile farklı paradigmlar oluşturmuştur. Bu paradigmlar sayesinde ise coğrafya bugün ki konumuna gelmiştir.

Modern coğrafya bilimi yer adları ezberletme dışına çıkmış ve insanın yaşamış olduğu mekânı daha iyi tanınmasına yardımcı olan bir bilim dalına dönüşmüştür. Bilim esasında ispatlanabilir ve pragmatiktir. Beşerî ve İktisadi/Ekonomik Coğrafya toplumu yakından ilgilendiren tüm konuları coğrafi bir bakış açısı ile ele almaktadır.

Beşerî ve İktisadi/Ekonomik Coğrafya da insan-çevre ilişkisinde çevreyi değiştirip kontrolü elinde bulunduran güç insandır. İnsan mekân ilişkisinin coğrafi bakış açısı ile etkileşimini inceleyen coğrafyanın bir alt disiplindir. İnsan, mekânı kültürel, ekonomik, sosyal davranışlarına göre şekillendirirken tutum içerisinde. Bu tutum ve davranışları ortaya çıkarırken insan, mekânı analiz ederek anlamlandırmaktadır; bu da beşerî ve iktisadi/ekonomik coğrafyayı fiziki coğrafyadan ayıran önemli bir etkidir.

Ülkelerin güvenlik politikalarında ve gelecek için oluşturacakları stratejilerinde coğrafya büyük önem arz etmektedir. Bir ülkenin bulunduğu coğrafi konum, demografik yapıları, ekonomik, askeri ve siyasi güçleri o ülkenin jeopolitik¹ özelliklerine ışık tutmaktadır.

¹ Devletlerin yaşamış olduğu coğrafyada beşerî ve fiziki unsurların üretmiş olduğu politikaları inceleyen bir bilim dalıdır. Jeopolitik, statik ve dinamik unsurlardan oluşmaktadır. Dinamik unsurlar (kültürel, siyasal, yapısal, askeri, ekonomik) şartlara göre sürekli değişim sağlamaktadır. Jeopolitiğin statik unsurlarından biri olan coğrafi konum ile jeopolitik konum arasında farklar vardır. Jeopolitik konum, coğrafi konumu kapsamaktadır. Coğrafi konum ülke sınırları değişmediği sürece değişim olmamaktadır. Fakat jeopolitik konum da sadece ülke sınırları ile sınırlı değildir. Bir ülkenin ekonomik, askeri, nüfus, siyasi güç gibi etkenler ile jeopolitik konum önemi artmakta veya azalmaktadır.

Devletlerin üzerinde bulunmuş olduğu coğrafya, savaş zamanında askeri mücadeleleri belirlerken, barış zamanında ise elinde bulundurduğu stratejik, jeopolitik konumunu belirlemektedir. Fiziki anlamda coğrafya stabil olduğundan dolayı ulusal politikaların çerçevesinin belirlenmesinde en temel unsur olarak yer almaktadır. Ülkelerin başında bulunan hükümetler sürekli olarak değişse de ülkelerin sınırlarını oluşturan sıra dağlar değişmemektedir (Spykman, 2020, s. 122).

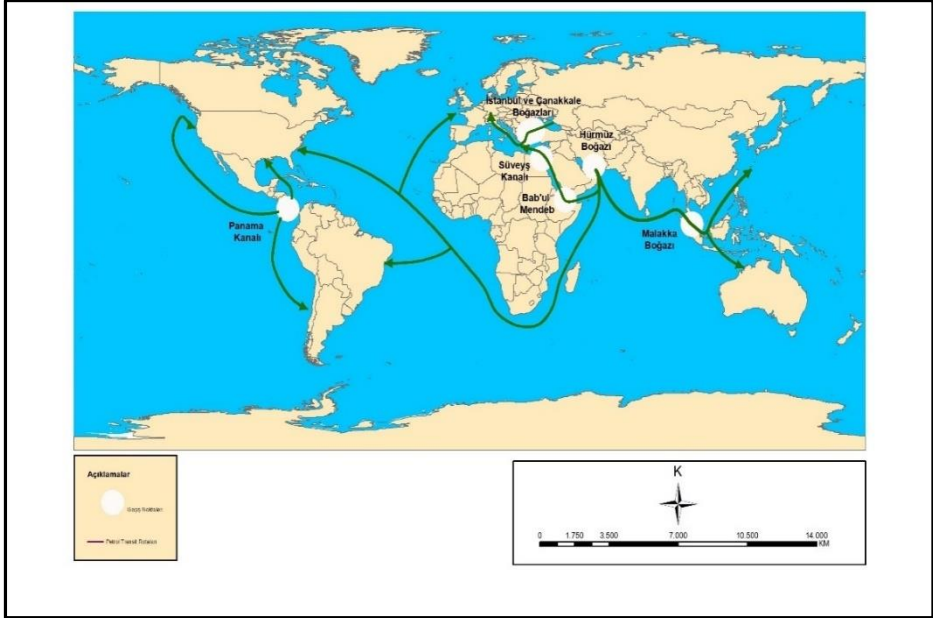
Ülkelerin ulusal güvenliğini ve gücünü oluşturan iki ana unsur yer almaktadır. Birincisi ülkelerin coğrafi gücüdür, değişmeyen bir unsur olarak karşımıza çıkan coğrafi güç, coğrafi konumu, coğrafi bütünlüğü ve sahanın coğrafi özelliklerini kapsamaktadır. İkinci unsur ise beşerî gücüdür, değişen bir unsur olan beşerî güç içerisinde kültür, sosyal, ekonomik ve askeri faaliyetleri kapsamaktadır (İlhan, 2003, s. 92).

Coğrafya siyasi ve askeri pratikler bütünü ile sıkı sıkıya bağlı stratejik bilgileri bir araya toplayabilen bilim dalıdır. Fiziki ve beşerî/iktisadi özellikleri ile mekânı metodik olarak tanımlaması ve devlet aygıtını bir güç olarak organize edebilmektedir (Lacoste, 2020, s. 50). Beşerî/İktisadi Coğrafyanın bir alt disiplini olan “Enerji Coğrafyası” ise ülkelerin jeopolitik, stratejik² ve jeoekonomik unsurlarında büyük etki oluşturmaktadır. Siyasi coğrafyadan bağımsız olarak ele alınan bu alt bilim dalı dünya siyaseti ve ekonomik durumunu etkileyen enerji kaynaklarının dağılımını ve bu dağılımın yaratmış olduğu siyasi ve ekonomik etkileri jeopolitik bağlamda incelemektedir.

Enerji coğrafyası, enerji kaynağının bulunduğu kaynak coğrafyası, üretilen kaynağın ulaşımı ve arz coğrafyalarını siyasi, ekonomik, insan-çevre üzerinden inceleyen bir disiplindir. Geçmiş, günümüz ve geleceğe dair ışık tutan enerji coğrafyası dünyada oluşan gelişmelerden dolayı sürekli değişim halindedir. Enerji kaynaklarının asimetric dağılışı, sınırlı olması ayrıca gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacının sürekli artışı küresel jeopolitik dengeler üzerinde baskı oluşturmaktadır. Dünya üzerinde yaşanan çatışmalar, savaşlar ve yapılan anlaşmalar üzerinde enerjinin rolü büyüktür.

² Geçmişte askeri literatürde siyasi iktidarın amaçlamış olduğu hedefleri gerçekleştirmek için askeri kuvvetleri kullanma sanatı anlamına gelse de günümüzde hem siyasi hem askeri hem de sosyal kültürel hayatta kullanılmaya başlayan strateji kavramı toplumsal olan olaylardan bireysel olaylara evrimleşmiştir.

Bu nedenle enerji coğrafyası tüm dünyayı etkilemektedir. Enerji coğrafyası kaynakların bulunduğu sahayı ve arz-talebin olduğu tüm sahaları etkilemektedir. Kaynak bölgesi olarak tanımlayabileceğimiz Orta Doğu ve Avrasya bölgeleri sanayi olarak gelişmiş ve iktisadi olarak güçlü olan Batı devletlerine hidrokarbon kaynaklar ihraç etmektedir. Bu nedenle kaynak coğrafyaları jeopolitik mücadelenin odağında bulunmaktadır.



Harita 1: Dünya enerji transit noktaları

Enerji coğrafyasında, kaynak coğrafyaları ve arz coğrafyaları dışında enerji taşımacılığının yapıldığı sahalar da büyük önem arz etmektedir. Günümüzde petrol ve doğalgaz taşımacılığı boru hatları ve deniz yolu ile yapılmaktadır. Önemli geçiş noktaları olan boğazlar ve kanallar (bkz. Harita 1) (Süveyş Kanalı, Panama Kanalı, Hürmüz Boğazı, Malakka Boğazı, Bab El Mendeb, İstanbul ve Çanakkale Boğazları) arz-talep ülkelerinin dış politikalarındaki siyasi ve iktisadi gücünü etkileyebilmektedir. Türkiye'nin bulunduğu coğrafi konum enerji için geçiş güzergâhındadır. Hem boru hatları hem de limanları ile petrol-doğalgaz üreticisi ve tüketicisi ülkeler için önemli bir jeopolitik konumdadır.

Enerji kaynaklarının bulunduğu sahalardaki jeolojik yapı da büyük oranda etkilidir. Petrol açısından bakıldığında rezervin en fazla bulunduğu ve üretim maliyetinin en düşük olduğu saha Orta Doğu'dur. Küresel bazda dünyanın petrol rezervine sahip ülkesi Venezuela'dır. Ancak Orinoco bölgesinde kumul yataklarında petrol çıkarımı güç ve maliyetlidir. İkinci sırada yer alan Suudi Arabistan'da ise çöl kumullarının altındaki yataklarda kolay ve çok daha az maliyetle çıkartabilmektedir. Açık denizlerde petrol çıkarımı ise maliyetleri daha da arttırmaktadır. Dolayısıyla enerji ekonomisi, enerjinin güvenliği ve ortaya koyduğu küresel etkiyle iç içe geçmiştir.

Dünyada bulunan herhangi enerji kaynak bölgesinde ortaya çıkan ekonomik veya sosyal sorunlar çevre ülkeler dışında küreselleşmiş tüm dünyayı etkilemektedir. Bunun sonucunda da kaynak sahaları arz sahalarına karşı enerji kaynaklarını siyasi ve ekonomik bir güç olarak kullanabilmekte ve uluslararası sorunların derinleşmesine, kutuplaşmaların artmasına neden olabilmektedir (Oral, 2017, s. 4).

1.2. Enerji Güvenliği Kavramı

Güvenlik kavramı bireysel, ulusal ve uluslararası bir tehdide karşı alınabilecek önlemler veya tehdidin ortadan kalkması anlamına gelmektedir. Güvenlik kavramının kapsamı tarihsel süreçlerde olan olaylara bağlı olarak genişlemektedir. Ekonomik, teknolojik, askeri ve sosyo-kültürel gelişmeler güvenlik kavramının sürekli değişimine neden olmaktadır.

Enerji güvenliği kavramı, enerji sorunlarının ve küresel iklim değişiminin tartışıldığı her konuda yer almaktadır. Enerji güvenliği kavramı genel manada, enerji kaynaklarına engelsiz erişimi veya planlı olarak kesintilere uğramamayı, sınırlı sayıdaki kaynaklara bağlı kalmamayı ve sınırlı coğrafi bölgelerde bulunan enerji kaynaklarına bağlı/bağımlı olmadan erişebilmeyi ifade etmektedir (Chester, 2010, s. 887).

Enerji güvenliği kavramının kurum, kuruluş ve kişilerin görüşlerine göre tanımı değişebilmektedir. IEA'ya göre enerji güvenliği, makul fiyata ve kesintisiz olarak kullanılması olarak tanımlamaktadır. Ayrıca enerjinin sürdürülebilir, çevreci ve arz-talep dengesinde oluşabilecek ani dalgalanmalara karşı tepkiyi de kapsamaktadır (URL 1). Dünya Bankasına göre ise ülkelerin sürdürülebilir ekonomi için enerji kaynaklarının uygun bir fiyatla elde edilmesi olarak tanımlamıştır. Bunun sonucunda ise istikrarlı bir

ekonominin doğacağını, yoksulluğun azaltılarak refah bir yaşama ulaşılabileceğini hedeflemektedir (The World Bank Group, 2005). NATO'nun enerji güvenliği tanımıysa, üye ülkelerin toplum güvenliği ve askeri operasyonların güvenliği açısından bakılmaktadır (URL 2).

Devletler tarafından enerji politikaları oluşturulurken enerji güvenliği odakta yer alır. Bazı yük santrallerin yakıtı olan kömür, petrol, doğalgaz ve uranyum enerji güvenliği açısından önem arz etmektedir. Söz konusu kaynaklara dayalı olan bazı yük olarak adlandırılan yıl boyu kesintisiz enerji temini sağlarlar.

Enerji güvenli temel anlamda 4 ana unsur üzerine kurulmuştur, İngilizce karşılığı 4A olarak ifade edilen unsurlar şunlardır; enerji kaynağının mevcut olması (Availability), ulaşılabilirliği (Accessibility), ekonomik olması (Affordability) ve sürdürülebilir olması (Acceptability) (Erdal, 2011, s. 10). Şekil 1'de 4A kavramı şematik halde görülmektedir.



Şekil 1: Enerji güvenliğinde 4A kavramı

Sanayi Devriminden günümüze kadar olan süreçte enerji kaynakları insanlık için büyük önem arz etmiştir. Enerji kaynaklarına rahat erişim, düşük maliyetli enerji kaynağı ve sürekliliği konusunda devletler sürekli tedirginlik içerisinde olmuşlardır. Bunun sonucunda da enerji güvenliği kavramı ortaya çıkmıştır.

Hegemon bir devlet olabilmek için küresel enerji kaynaklarını yönetmek arasında ayrılmaz bir bağ mevcuttur. Kömür Çağı olarak adlandırılan 19. yüzyılda İngiltere hegemon bir devlettir. Ülkesinde bulunan bol kömür rezervleri ve bu sayede elde etmiş olduğu düşük maliyetli kömürle Sanayi Devrimi'ni başlatmıştır. 1945 sonrasında ise ABD yeni dünya düzenini petrol üzerine kurulması sebebiyle hegemon devlet unvanı ABD'ye geçmiştir (Ediger, 2007).

Enerji kaynakları sadece sayısal büyüklük olarak algılansa da enerji-politika ilişkisinden dolayı vektördür. Vektörel olmasının sebebi ise politika yapıcılarının tercihleridir. Ülkelerin oluşturmuş olduğu politikalarda olduğu gibi, ülkelerin enerji sistemi tercihlere göre şekil almaktadır. Ülkeler sahip olduğu kaynakları ve ithal ettiği kaynakları arasında denge kurmaktadır, bu denge ile üretilen enerji politik-ekonomik tercihlere bağlı olarak korunur. Yapılan tercihler ile ülkenin enerjiye olan bağımlılığı, karşılıklı bağımlılık, arz güvenliği gibi sorunları veya ülkenin kalkınmasını zaman içerisinde şekillendirir (Demir, 2010, s. 58).

Enerji güvenliği kavramı ilk olarak I. Dünya Savaşı'nın arifesinde ortaya çıkartılmış bir kavramdır. İngiliz Donanmasının başında olan Winston Churchill, gemilere güç veren kaynağın kömürden petrole evrilmesini istemekteydi. Bu sayede savaş zamanında İngiliz Donanması Alman Donanmasına karşı daha hızla hareket ederek üstünlük sağlayacaktı. Güvenli olan Galler bölgesi kömürü yerine bilinmezliği olan İran petrolünü seçen Churchill enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesine önem vermiştir (Yergin, 2006, s. 69). İngiltere İran sahasının ve gelecekte Orta Doğu'nun petrol kaynaklarına bağımlı hale gelecektir bu da ülke açısından enerji güvenliği problemini ortaya çıkartacaktır. I. Dünya Savaşı sonrasında enerji güvenliği askeri amaçları ve siyasi amaçları gerçekleştirmek için önemli hale gelmiştir.

II. Dünya Savaşı sırasında da büyük çekişmelere neden olan enerji kaynakları, iki dünya savaşının sonrasında bile etkisi günden güne büyümekteydi. Soğuk Savaş Döneminde artan enerji güvenliği endişeleri en şiddetli zamanlarını yaşamaktaydı. Döneme büyük damgasını vuran 1967 yılında yaşanan Altı Gün Savaşları ile OPEC ülkelerinin batıya petrol ihracatını durdurması ve 1973 yılında yaşanan Yom-Kippur Savaşı ile yine Batı ülkelerine petrol ambargosu uygulamış fiyatları ise dört katına çıkartmıştır. Enerji kaynaklarının dış politikada ve küresel ekonomide bir

silah haline dönüştürülmesi bu iki gerilimle de kalmamıştır (Sevim , 2012, s. 4383). İkinci petrol krizi olarak adlandırılan enerji krizi başlangıcı İran'da yaşanan İran İslam Devrimi ile başlamıştır. 1978'de başlayıp 1979 yılında İran Şahı Muhammed Rıza Pehlevi indirilerek Ayetullah Humeyni liderliğinde, teokratik bir anlayışla devrim gerçekleşmiştir. Yaşanan bu gelişmeler ışığında İran petroleri millileştirilmiştir. ABD ve İngiltere'nin İran petroleri üzerindeki etkisine son verilmiştir. 1980-1988 yıllarında Irak-İran arasında gerçekleşen savaş ise enerji güvenliğinde gerilimi tırmandırmıştır.

1990'lı yılların başında SSCB'nin çöküşü ile iki kutuplu dünya sona ermiştir. Bu olayın arkasından gelişen Körfez Savaşı, 11 Eylül saldırısı, 2003 yılında ABD'nin Irak'ı işgali ve 2011 yılında Tunus'ta başlayan Arap Baharı Orta Doğu bölgesini etkileyen en önemli gelişmeler olmuştur (Altunışık, 2013, s. 73). Yaşanan bu olaylar hem bölgesel hem de küresel çapta dünyayı etkilemiştir, özellikle Arap Baharı hala bölgeyi etkilemeye devam etmektedir. Dünya ham petrol rezervinin %48'i ve doğalgaz rezervinin %40'ı Orta Doğu bölgesinde bulunmaktadır. Yaşanan bu gelişmeler ışığında kaynak sahalarında yaşanan istikrarsızlıklar enerji güvenliği üzerinde tehdit oluşturmaktadır (Doğan, 2021, s. 137).

Ülkelerin enerji güvenliğine olan kaygısı sadece petrol ile sınırlı değildir. Doğalgaz modern manada ilk kullanıma sunulduğunda küresel çapta kullanımı yoktu daha bölgesel olarak kullanılmaktaydı. Fakat uzun mesafeli boru hatlarının inşa edilmesi ve doğalgazın sıvılaştırılması (LNG) ile arz-talep ülkeleri arasındaki ticareti geliştirdi (Yergin, 2014, s. 294).

21. yüzyılda enerji güvenliğinde değişimler yaşanmıştır. Sadece tüketici ülkelerin değil ayrıca arz ülkeleri ve enerji geçiş sahaları için de önemli bir kavramdır. Tüketim yapan ülkeler kaynak ülkelerini çeşitlendirdiği gibi arz ülkeleri de talep eden ülkeleri çeşitlendirmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan büyük teknolojik gelişmeler ile maden sektörü de büyük önem kazanmaktadır. Enerji teknolojilerinin üretimini mümkün kılan ve stratejik madenler olarak bilinen bakır, lityum, kobalt, nikel, manganez, çinko ve nadir toprak elementleri de enerji güvenliği açısından önemlidir.

Enerjide dışa bağımlı olan ülkeler, kaynak ülkeleri tarafından tehdide uğrayabilmektedir. Kaynak ülkeleri tarafından dış politika aracı olarak kullanılabilen enerji kaynakları, enerji kaynağından yoksun ülkeleri dış politikada baskıladığı durumlar söz konusu olmuştur. 2022 Şubat ayında

başlayan Ukrayna-Rusya Savaşında AB tarafından yaptırımlara uğrayan Rusya, enerjiyi dış politikada bir araç olarak kullanan ülkelerin en belirgin örneğidir.

Sanayi sektörü gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yüksek tüketim oranına sahiptir. Fakat enerji kaynakları konusunda dışa bağımlı olan ülkelerin ekonomileri için en ufak enerji krizlerinde bile ülke ekonomisinde ve ülke içindeki enflasyon oranında büyük sonuçlar doğurabilmektedir. Yine bağlantılı olarak ülkenin dış ticaret açığında ve cari açıkta makas genişlemektedir (URL 3).

Bağlantılı olarak ülkeler ulusal enerji güvenliği açısından enerji kaynaklarını çeşitlendirme yollarına gitmektedirler. 1970'li yıllarda başlayan enerji krizleri yüzünden batılı ülkeler öncülüğünde alternatif enerji kaynakları bulunması amacı ile çalışmalar yürütülmektedir. Geldiğimiz noktada ise alternatif kaynak olarak ön plana çıkan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi kaynaklarında hem teknolojik anlamda büyük ilerlemeler kaydedilmiş, hem de bu enerji kaynaklarından enerji üretimi maliyetinde büyük düşüşler yaşanmıştır.

Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesinin arkasında üç sebep yatmaktadır. Birincisi petrol ve doğalgaza olan bağımlılığı ortadan kaldırmak, ikincisi fosil yakıtların emisyonlarından dolayı küresel iklim değişimi ve çevreye olan zararı, üçüncüsü ise hem teknolojik maliyet hem de üretim-tüketim zinciri açısından ucuz ve sınırsız bir enerji kaynağı olmalarından ileri gelmektedir.

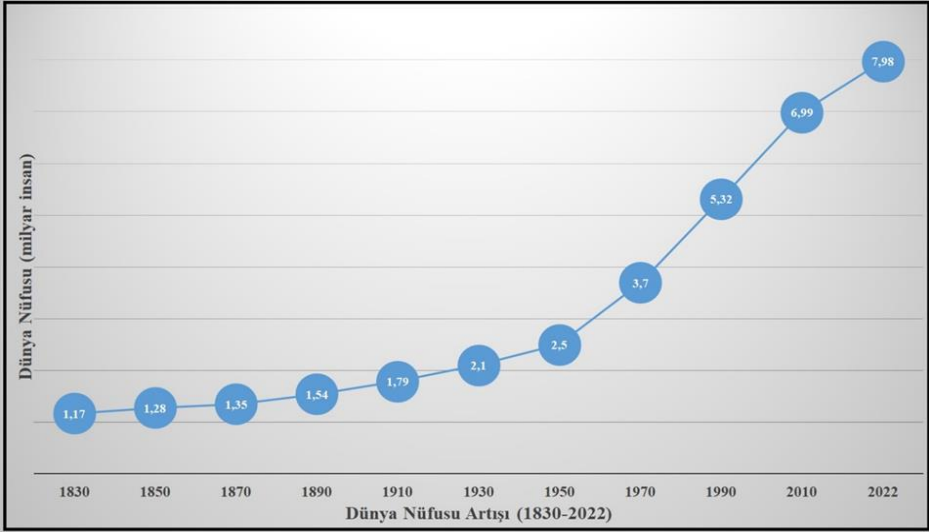
Konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan kaynakların dışında ülkelerin yaymış olduğu sera gazı emisyonlarını azaltan, enerji kaynağı ithalatını azaltarak cari açığı düşüren bir diğer gelişme ise enerji verimliliği konusudur. Enerji verimliliği esasen aynı işi gerçekleştirmek için birim enerjiyle daha çok iş yapma kabiliyeti demektir, diğer bir deyişle tasarruf anlamındadır. Enerji verimliliğinde en önemli nokta ise hizmet kalitesini düşürmeden tüketilen enerjiyi düşürmektir. Bunun mümkün olması için ise bilimsel gelişmeler ve enerji verimliliği teknolojileri arasında doğru orantı bulunması gerekmektedir.

Daniel Yergin, enerji verimliliğini yeni bir enerji kaynağı olarak görüyor. Daha önceleri gelişmekte olan ülkeler, refaha ulaşmak için enerji verimliliğini bir tuzak olarak görüyorlardı. Ancak verimlilik ile ortaya çıkan

enerji ithalatındaki tasarruflar ve sonrasında gelişen ekonomik büyüme, bu ülkeleri enerji verimliliğinin gerekliliğini ortaya çıkardı. Ülkelerin kararını sadece ekonomik büyümeler değil, enerji verimliliği sayesinde çevresel ve iklimsel değişimler üzerindeki olumlu etkisi de etkili oldu. Bu nedenlerden dolayı küresel çapta enerji verimliliği büyük önem arz etmektedir. (Yergin, 2011, s. 1179).

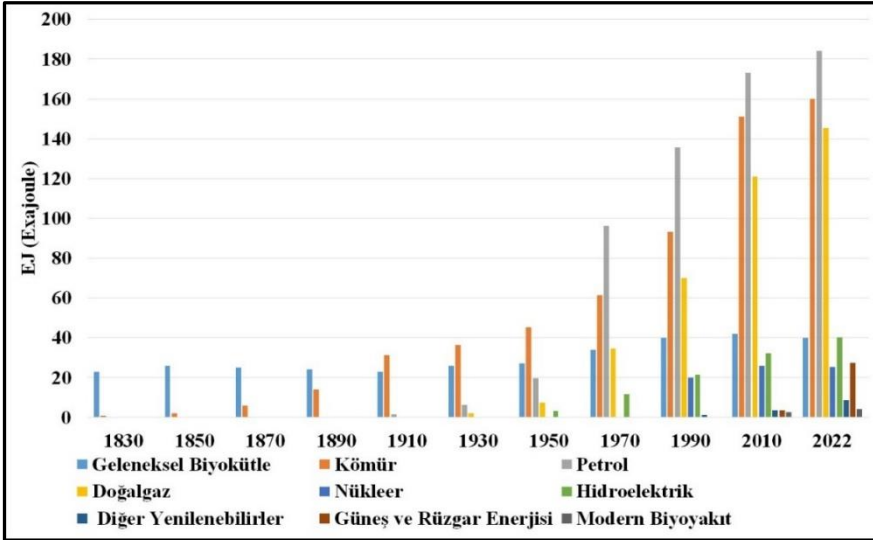
Diğer yandan ülkelerin enerji tüketimi ile ilişkili olarak ekonomik büyüme, toplum refahı ve gelişmişlik düzeyleri arasında ayrılmaz bir ilişki mevcuttur. Ekonomik büyümelerin itici gücü olarak enerji ön plandadır. Gelişmiş ülkeler olarak adlandırılan ülkelerde enerji tüketimi yaşam standartları nedeniyle yüksektir. Modern dünya ve geri kalmış dünyaya bakıldığında ise bu fark çok net bir şekilde anlaşılmaktadır. Gelişmekte olan ülkeler ise büyümekte olan ekonomileri sayesinde modern dünyanın oluşturmuş olduğu refahı yakalamak için çalışmaktadırlar.

Nüfus ve enerji tüketimi arasında da doğrudan bir ilişki mevcuttur. Genel olarak bir ülkede nüfus arttığında enerji tüketiminde de artış mevcuttur. Fakat ülkelerin enerji tüketimindeki artışı sağlayan sadece nüfusun artışı değildir, enerji tüketimini etkileyen birden çok faktör bulunmaktadır. Bir ülkenin ekonomik olarak büyümesi, üretim faaliyetlerinin yoğunluğu, üretim çeşitliliği ve enerji verimliliğine duyulan önem enerji tüketimini etkilemektedir.



Şekil 2: 1830-2022 yılları arasındaki dünya nüfus artışı
Kaynak: URL 4

Enerji, insanlığın hem sosyal hem de teknolojik anlamda ilerlemesi için vazgeçilmez bir role sahiptir. Dünya nüfusu, 2022 yılında 7.8 milyar olarak kaydedilmişken, 2050 yılına gelindiğinde bu sayının 9.7 milyara ulaşması tahmin edilmektedir. Bu nüfus artışının yaklaşık %65'i Afrika kıtasından gelirken, %25'ten fazlası Orta Doğu'dan kaynaklanacaktır. Gelişmiş ülkeler ise sadece %3'lük bir oranla bu artışa katkıda bulunacaklardır (URL 5).



Şekil 3: Dünya Enerji Tüketimi, (1830-2022)
Kaynak: BP, 2022 ve Smil, 2017

Küresel enerji tüketimi incelendiğinde 1830’lu yıllar ve öncesinde biyokütle-kömür ikilisi birincil enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Fakat 1900’lü yılların başından itibaren teknolojik gelişmeler, sanayinin gelişmesi ile insanoğlu daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuştur. Enerji kaynaklarının kısıtlı olması nedeni ile yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyan dünya enerji çeşitlendirmesine gitmek zorunda kalmıştır. Şekil 3’te görüldüğü üzere özellikle yaşanan petrol krizleri nedeni ile 1970 yılından itibaren farklı enerji kaynaklarından yararlanılmaya başlanmıştır.

1.3. Fosil Yakıtlar ve Geleceği

Genelde fosil yakıtlar olarak kullanılan kavram kömür, petrol, doğalgaz için kullanılmaktadır. Genel kullanımından farklı olarak da hidrokarbon kaynaklar, konvansiyonel (geleneksel) kaynaklar veya yenilenemeyen kaynaklar olarak adlandırılmaktadır.

Dünya birincil enerji tüketiminin yaklaşık %82’lik kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. %31’lik kısmı petrolden, %27’lik kısmı kömürden ve geriye kalan %24’lük kısım ise doğalgazdan karşılanmaktadır (BP, 2022). Her ne kadar alternatif kaynaklara yatırımlar son dönemlerde artmış olsa da fosil yakıtlardan olan üretim uzun yıllar boyunca devam edeceği tahmin edilmektedir. Elektrik üretiminde ise 2022 EMBER verilerine göre %63’lük kısım fosil yakıtlardan gerçekleşmiştir. Dünya elektrik üretiminde kömür diğer fosil yakıtlara nazaran daha ön plana çıkmaktadır. %37’lik oranla ön plana çıkan kömürün arkasından kısmen daha yeni olan doğalgaz %23’lük oranla gelmektedir. Petrol ile elektrik üretimi yaklaşık %3 oranına sahiptir.

Enerji günümüzde tüm sektörler için temel girdi haline gelmiştir. Sanayi Devrimi ile yaşanan kas gücünden makine gücüne geçiş ile enerjiye olan ihtiyaç insanlığın temel gereksinimi haline gelmiştir. Fakat fosil yakıtların sınırlı olması ve çevreye olan zararı nedeni ile tartışmalara neden olmaktadır. 1930’lu yıllarda yaşanan “Keynesyen Devrim” olarak nitelendirilen bu dönemde oluşturulan politikalar ile hızlı tüketim toplumsal refahın yapıtaşı olarak nitelendirilmekteydi. Günümüzde ise bu düşünce hız kesmeden devam etmektedir. Bu yüzden fazla tüketim nedeniyle daha fazla üretime ihtiyaç duyulmakta, üretim içinse daha fazla enerji tüketimi gerekmektedir. Bu zincirin sonunda ise atmosfere fazla miktarda karbon

emisyonu salınmaktadır. Sonuç olarak ilerleyen bu süreç çevreye büyük zararlar vermektedir ve/veya vermeye devam edecektir (Çoban ve Şahbaz Kılınc, 2016, s. 590).

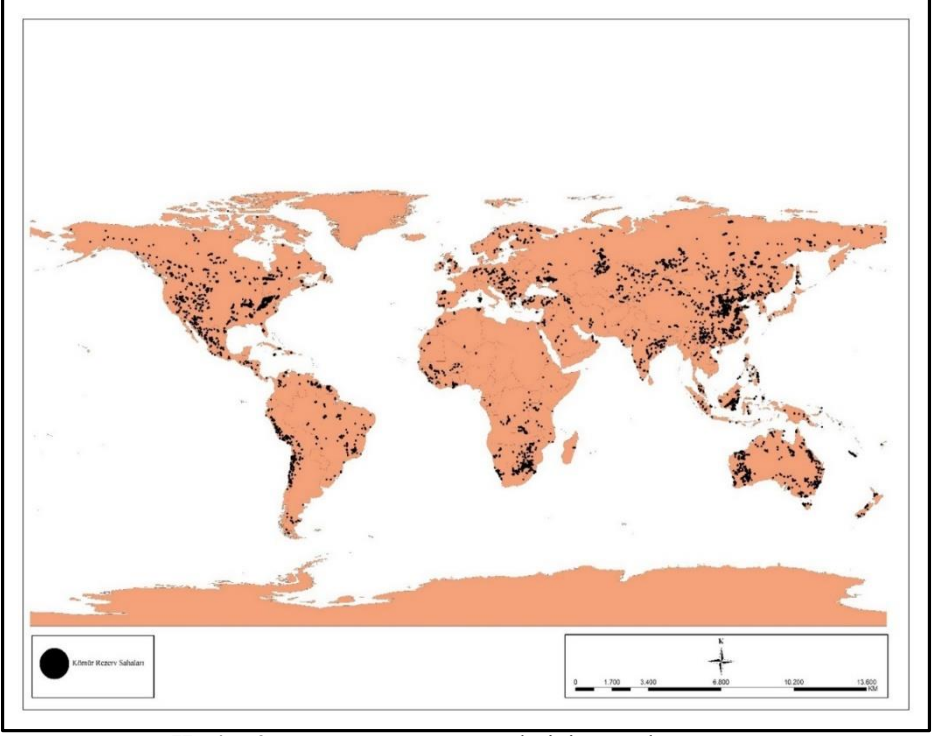
Sanayi Devrimi ile ortaya çıkan buhar gücünün keşfi ile buharlı gemi ve lokomotifler ulaşım sektörüne çağ atlatmıştır. Haberleşmenin gelişmesi, ulaşımın kolaylaşması ile küreselleşmeye başlayan dünya için enerji kaynaklarına ihtiyaç günden güne artmıştır. Fakat şunu da belirtmek gerekir enerji kaynakları Sanayi Devrimi öncesinde de kullanılmaktaydı. Tarihsel süreçte insanoğlu ısınmak, yemek pişirmek, çanak-çömlek yapmak veya savaşta kullanılan metallerin eritilmesi, şekillendirilmesi amacı ile enerjiden yararlanılmıştır.

1.3.1.Kömür

İlk endüstriyel yakıt olan kömürün kullanımı ile ilgili referanslar 3000 yıl önceye dayanan bir kömür madeninin keşfi ile Çin'de bulunmaktadır. MÖ 200 yıllarında Çinliler kömürü ısınmak ve ticari bir ürün olarak kullanmaya başlamıştır. Aynı zamanda kömür metalurji için vazgeçilmez bir kaynaktır. Büyük yakıt gereksinimi nedeni ile odun kullanan demirhane ve fırınlar Çin'in ormansızlaşmasına neden olabilecek kadar fazlaydı. Bu durumu engellemek amacı ile odundan kömüre bir enerji geçişi olmuştur (URL 6).

Kömür özünde bitkisel olup organik ve inorganik bileşenlerden oluşmuş olan tortul kayadır. Bataklıklarda bulunan bitki ve ağaç kalıntılarının üst üste birikmesi, milyonlarca yıl kimyasal ve fiziksel süreçlere maruz kalmasıyla meydana gelmektedir (TKİ, 2022, s. 2).

Kömürün asıl önem kazandığı devir, modern sanayinin gelişmeye başladığı devirdir. Atölye tipi sanayiden hem tüketimin hem de üretimin kitle halinde arttığı büyük sanayi tipine geçiş evresine denk gelmektedir. Bu geçiş sürecinden sonra kömür günümüzde de hala önemini devam ettirmektedir (Akova, 2016, s. 32). Karşılıklı olarak birbirini besleyen bu mekanizma enerji arzındaki artış ile ülkelerin iktisadi olarak büyümesini tetikledi. Bu büyüme sonucunda ise eğitim ve bilimsel araştırmayı kolaylaştırdı, tüm bu zincir halkasının sonunda ise yeni enerji kaynaklarının keşfedilmesine yardımcı oldu (Cipolla, 2021, s. 47).

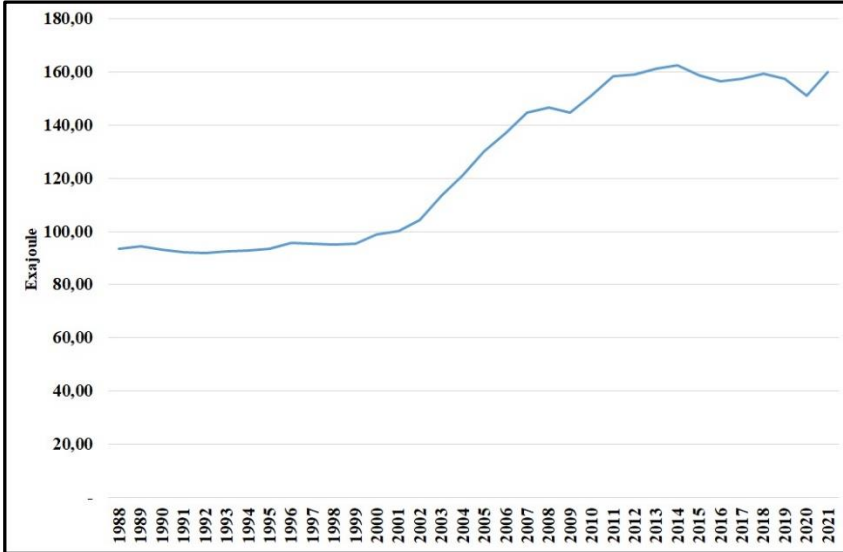


Harita 2: Dünya Kömür Rezervlerinin Dağılışı
Kaynak: BP, 2022

Kömür rezervlerinin coğrafi olarak dağılışı (Harita 2.) diğer fosil yakıtlara nazaran daha simetrik haldedir. Bu nedenle kaynak ülkelerinin enerji kaynağı talep eden ülkelere siyasi-politik bir güç olarak kullanımını engellemektedir. Talep ülkelerinin enerji güvenliği açısından tehditleri az da olsa azaltmaktadır. Fakat kömür kullanımının sonucu olarak hem çevreye hem de insan sağlığına ciddi tahribatlar oluşturmaktadır.

Günümüzde kömür ile çalışan termik santrallerde insana ve çevreye büyük tahribatlar yaratan zararlı emisyonlara yönelik temiz kömür teknolojileri kullanılmaktadır. Kömürün gazlaştırılması ve sıvılaştırılması ön plana çıkan teknolojiler arasında yer almaktadır (Sevim, 2019, s. 38). Ülkelerin, insan ve çevre güvenliği açısından büyük önem arz eden bu teknolojilerin uygulanabilmesi için ekonomik olması gerekmektedir. Fakat şu anda yüksek yatırım maliyetleri gerektirdiğinden dolayı küresel çapta ilgi çekmemektedir.

BP'nin 2022 yılında yayınlamış olduğu istatistiklere göre dünya üzerinde toplam 1.074,108 milyar ton kömür rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin yaklaşık 753.639 milyar tonu taşkömüründe oluşmaktadır, geri kalan 320.469 milyar ton ise linyit rezervlerinden oluşmaktadır. Dünyanın birçok bölgesinde kömür rezervi bulunmasına rağmen %65'lik kısmı dört ülkede bulunmaktadır. En fazla kömür rezervine sahip olan ülke ABD'dir ve bu ülke toplam rezervlerin %23.2'sini oluşturmaktadır. İkinci sırada, %15.1 pay ile Rusya yer almaktadır. Üçüncü sırada, toplam rezervlerin %14'ünü kapsayan Avustralya bulunmaktadır. Dördüncü sırada ise %13.3'lük bir paya sahip olan Çin yer almaktadır. Fakat Çin kömür üretiminde ve tüketiminde dünyada birinci sırada yer almaktadır. 2021 yılında dünyanın kömür tüketim ve üretiminin %50'sini Çin tek başına oluşturmaktadır. Son 35 yıllık verilere bakıldığında kömür tüketiminde artış iki katı olmuştur (Şekil 4). Kömür tüketimindeki bu artışın en büyük sebebi ise Çin ekonomisinin 1980'lerden beri sürekli büyümesidir. Çünkü Çin'de Mao'nun ölümünden bir süre sonra devlet başkanı olan Deng Xiaoping ekonomik reform başlatmış bu sayede Çin ekonomisi atağa geçmiştir. Çin ve geriye kalan Asya-Pasifik ülkelerinde elektrik enerji üretiminde büyük çoğunlukla kömür kullanılmasından dolayı bu büyük artış gerçekleşmiştir.

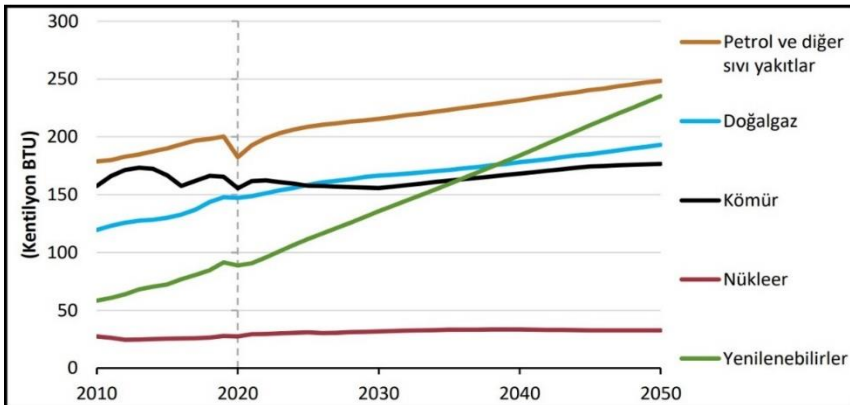


Şekil 4: Dünya Kömür Tüketimi (1988-2021)

Kaynak: BP, 2022

Covid-19 pandemisi nedeni ile 2020 yılında kömür tüketiminde ciddi düşüşler yaşanmıştır. Fakat pandemi sonrasında tüm hammaddelerde olduğu gibi enerji hammaddeleri girdilerinde de büyük oranda artışlar yaşanmıştır. Pandemi sonrasında artan tüketim artışları nedeni ile enerji kaynakları fiyatları yükselişe geçmiştir. 24 Şubat 2022 yılında başlayan Ukrayna-Rusya Savaşı ise dünya enerji kaynakları fiyatlarını rekora ulaştırmıştır. Dünya, pandemi ve ardından başlayan savaşla 1970 yılından bu zamana kadar yaşanan en büyük enerji krizi ile yüzleşmektedir. Küreselleşen ekonomi ise enerji krizi nedeni ile ağır darbeler almaktadır, ülkelerin enflasyon oranını yükseltmekte ve ekonomik olarak büyümelerini geriletmektedir. Birçok gelişmiş ülke (özellikle Avrupa) her ne kadar iklim taahhütlerinde kömür kullanımını net sıfıra indireceklerini söylemiş olsalar da Rusya'ya uygulanan yaptırımlar sonucu doğalgaza erişimde sorunlar çıkmaktadır. Bu nedenle kömüre olan bağımlılıktan kurtulamamaktadır. Kömür iklime büyük zararlar verse de yerli kömür kaynaklarına sahip olan ülkeler enerji güvenlikleri açısından kömürü kullanmaya devam edecektir.

ABD Enerji Ajansı (EIA) tarafından oluşturulan 2050 projeksiyonuna göre dünya birincil enerji talebinde 2020 yılında kömür ikinci sırada yer almaktadır. 2050 yılına gelindiğinde ise bu sıralamanın petrol, yenilenebilir ve doğalgazın ardından dördüncü sırada yer alacağı tahmin edilmektedir (Şekil 5.). Dünya ne kadar kömüre olan bağımlılıktan vazgeçmeye çalışsa da yaşanan siyasi, askeri, ekonomik ve sosyal olaylar bu durumu zorlaştırmaktadır.



Şekil 5: 2020-2050 Yılları Arasında Kaynaklara Göre Birincil Enerji Arzı Tahmini
Kaynak: EIA, 2021

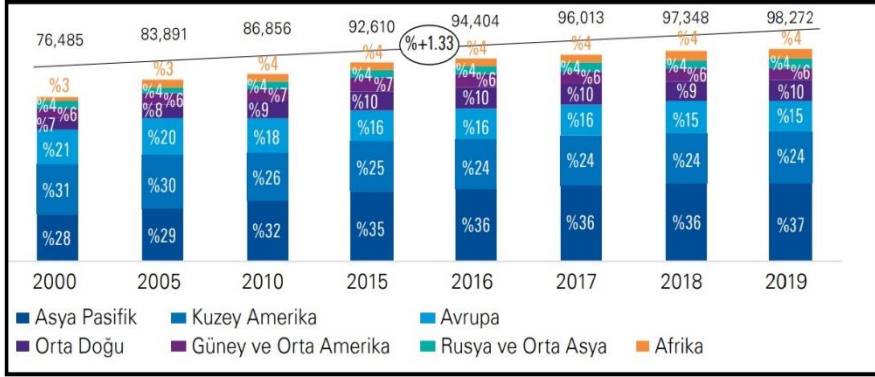
1.3.2.Petrol

Petrol, milyonlarca jeolojik zaman gerektiren ve bunun yanında fiziksel-kimyasal süreçlerin de etkili olduğu kayaların içerisinde sıvı halde bulunan hidrokarbonlar olarak tanımlanmaktadır. Hidrojen ve karbon bileşimlerinden oluşan petrol içerisinde az miktarda da olsa nitrojen, oksijen ve kükürt bulunmaktadır. Latince petrol kavramı “petro” (taş) ve “oleum” (taş) kelimelerinden türeyen kaya yağı olarak anılmaktadır (TPAO, 2007, s. 13).

Petrol önemini teknolojik yetersizliklerden dolayı asıl olarak 20. yüzyılda kazanmaya başlamıştır. Neredeyse tüm sektörler için vazgeçilmez stratejik bir kaynak olan petrolün ilk üretimi 1860 yılında ABD Pensilvanya’da evlerin aydınlatılması amacı ile gazyağı olarak kullanılmaya başlamıştır. 1900 yılında içten yanmalı motorlar ve ardından 1910 yılında içten patlamalı motorların icadı ile küresel enerji jeopolitiğinde büyük önem arz etmeye başlamıştır. 19. yüzyılın en önemli girdisi olan kömürden sonra 20. yüzyıla petrol damgasını vurmuştur, günümüzde de küresel enerji jeopolitiğini etkilemeye devam etmektedir. (Doğanay ve Coşkun, 2020, s. 89).

Petrolün öneminin artmasında otomotiv sektörü öncü olurken petrokimya sektörü ortaya çıkması ile önemi daha da artmıştır. Petrol modern toplumun ayrılmaz bir parçası olan plastik, gübre, ambalaj, tıbbi ekipman vb. ürünlerin üretiminde hammadde olarak öne çıkmaktadır. Petrolün uluslararası arenada jeopolitik ve ekonomik değerlerin belirleyicisi olmaya ve küresel enerji politikalarında petrole dayalı politikalar izleneceği tahmin edilmektedir.

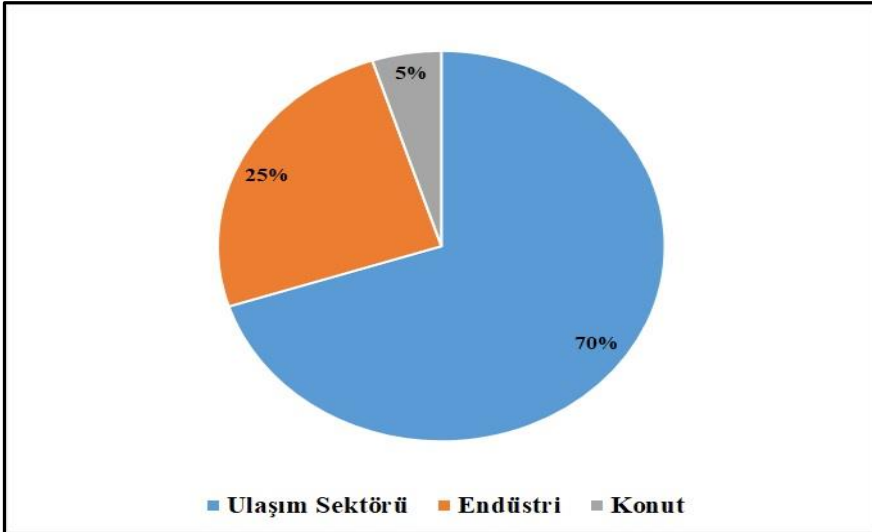
Petrol yenilemez bir kaynaktır, 2022 verilerine bakıldığında dünyada günlük 97 milyon varil petrol talep edilmektedir. Talep artışı ilerleyen yıllarda daha fazla artacağı tahmin edilmektedir, bu sebeple petrol üretiminde de doruk noktasına ulaşılabilecektir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin ekonomileri hızla büyümektedir, toplumsal refahın yükseldiği ülkelerde otomobil kullanımının artışı ve fabrikaların büyümesi ile petrole ihtiyaç günden güne daha fazla artacaktır.



Şekil 6: Dünya Petrol Tüketiminin Sektörel Dağılımı

Kaynak: IEA, 2021

Dünya’da tüketilen petrolün %70’i (Şekil 6.) akaryakıt olarak ulaşım sektörü tarafından tüketilmektedir. Dünya petrol tüketimi; ülkeler bazında değerlendirildiğinde ABD ön plana çıkmaktadır fakat gün geçtikte ekonomik olarak büyüme sağlayan Çin ise ikinci sırada petrole bağımlı olma yolunda ilerlemektedir. Ulaşım sektöründeki artışın sebebi artan refah seviyesidir. Hızlı gelişim gösteren ülkelerin ekonomilerinde yeni keşfedilen refah imkânları genel olarak otomobil sahibi olma ile başlamaktadır (Gautier, 2011, s. 100).



Şekil 7: 2000-2019 yılları arasındaki petrol talep artışı

Kaynak: KPGM, 202, s. 9

Şekil 7'de görüleceği üzere son 30 yıldaki küresel petrol talebi incelendiğinde istikrarlı bir artış mevcuttur. Fakat 2019 yılının sonunda başlayan Covid-19 pandemisi 2020 yılında büyük düşüslere sebep olmuştur. Avrupa ve Kuzey Amerika'da petrole talep düşerken Asya Pasifik bölgesinde özellikle Çin özelinde artışa geçmiştir.

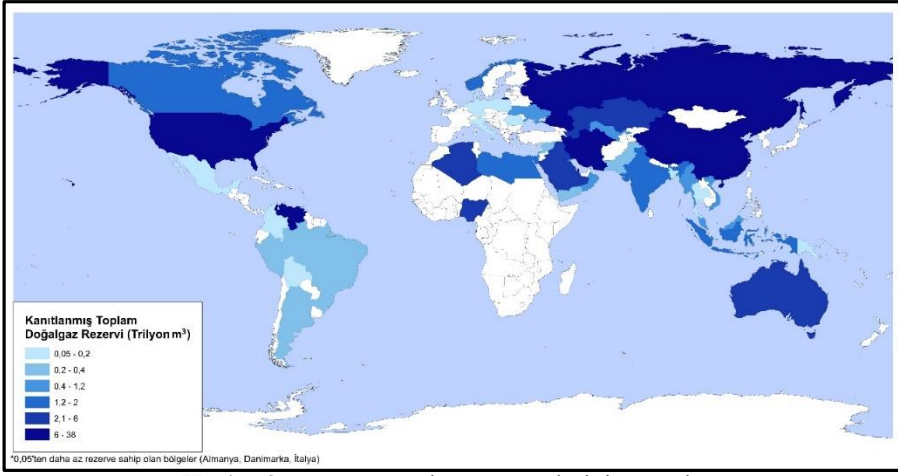
OPEC'in hazırlamış olduğu "World Oil Outlook 2022" raporuna göre 2027 yılına gelindiğinde günümüze kıyasla petrol talebinin günlük 10 milyon varil artış ile toplam talebin 107 milyon varile ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu talebin büyük çoğunluğu ise OECD ülkeleri dışında gelmesi beklenmektedir (OPEC, 2022, s. 7). Asya Pasifik bölgesinin 2050 yılına kadar küresel büyümenin üçte ikisini oluşturması beklenmektedir. Avrupa'da yaşanan teknolojik gelişmeler (verimlilik artışı, elektrikli otomobiller) sayesinde petrol talebinin 2050 yılına kadar %35 azalması tahmin edilmektedir (URL 5).

1.3.3.Doğalgaz

Bir diğer hidrokarbon kaynağı olan doğalgaz yer altında gözenekli kayaların arasında sıkışmış olarak veya petrol yataklarının bulunduğu sahada gaz halinde bulunur. Dolayısıyla petrolle aynı yatakta bulunabildiği gibi bağımsız olarak da bulunabilir. Doğalgaz %80-%95 oranında metandan oluşmaktadır. Doğalgazın oluşumu petrol ve kömürde olduğu gibi organik maddelerin (bitki, hayvan) yüksek ısı ve basınç altında kalması ile oluşmaktadır. Doğalgaz petrol ve kömüre nazaran en temiz fosil yakıt olarak kabul edilmiştir. Bunun nedeni ise doğalgaz yakıldığında Tera Joule (TJ) başına 56,1 ton CO₂ yayarken, petrol 73,3 ton, kömür ise 94,6 ton CO₂ yaymaktadır. Bu yönüyle bakıldığında doğalgaz kömüre göre %60, petrole göre ise %25 daha az atmosferi kirletmektedir (Aydın, 2020, s. 129).

1970'li yıllarda yaşanan enerji krizleri dünyada enerji kullanım alışkanlıklarında değişimlere neden olmuştur. Enerji krizinin yaşanmış olduğu 1973 yılında doğalgazın birincil enerji tüketimindeki payı %17'di düzeyindeydi. 2021 yılında ise bu yüzdelik %24'e çıkmıştır. 2022 yılında doğalgazdan elektrik üretimi %23'lük bir paya sahiptir. Doğalgaz boru hatlarının inşası ve doğalgazın sıvılaştırma (LNG) teknolojilerinin geliştirilmesi ile doğalgaza olan talep artmıştır.

BP 2022 istatistiklerine göre, 2020 yılında dünyada toplam 188,1 trilyon metreküp doğalgaz rezervi bulunmaktadır. Mevcut üretim yılda 4 trilyon metreküpe oranlandığında neredeyse 50 yıllık kanıtlanmış doğalgaz rezervi bulunmaktadır. Bu rezervlerin coğrafi olarak dağılımına bakıldığında zaman birinci sırada %40'lık oranla Orta Doğu'da bulunmaktadır, ikinci sırada Avrasya bölgesi, üçüncü sırada ise Asya-Pasifik gelmektedir (BP, 2022).



Harita 3: Dünya Doğalgaz Rezervlerinin Dağılışı
Kaynak: BP, 2022

Küresel doğalgaz talebi iki önemli etken altında toplanmaktadır. Birincisi gelişmekte olan ülkelerin ekonomik büyümelerinden dolayı ortaya çıkan yüksek orandaki talep, ikinci ise gelişmiş ülkelerin öncülüğünde olan düşük karbonlu enerji politikalarına geçiştir. Bu iki önemli etken doğalgazın geleceği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Özellikle Asya-Pasifik bölgesinde doğalgaza talep 2030 yılına kadar artmaya devam edecektir (BP, 2023, s. 49). Bununla birlikte küresel doğalgaz talebindeki artışın en önemli sebeplerinden biri olan LNG piyasasının sürekli büyümesidir.

Doğalgaz üretimi küresel çapta 2021 yılında 4036 milyar m³ olarak gerçekleşmiştir. 2050 yılına kadar ise yıllık %1,1 artış ile 5460 milyar m³ doğalgaz üretimi tahmin edilmektedir. Orta Doğu bu büyümeye en fazla katkı sağlayarak birinci sırada yer alacaktır, ikinci sırada ise Afrika ve Kuzey Amerika takip edecektir (GECF, 2022, s. 65).

1.4. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Geleceği

Yenilenebilir enerji kaynakları olarak adlandırılan kaynaklar şunlardır; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, dalga enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi ve 21. yüzyılın enerji kaynağı olarak adlandırılan hidrojen enerjisidir.

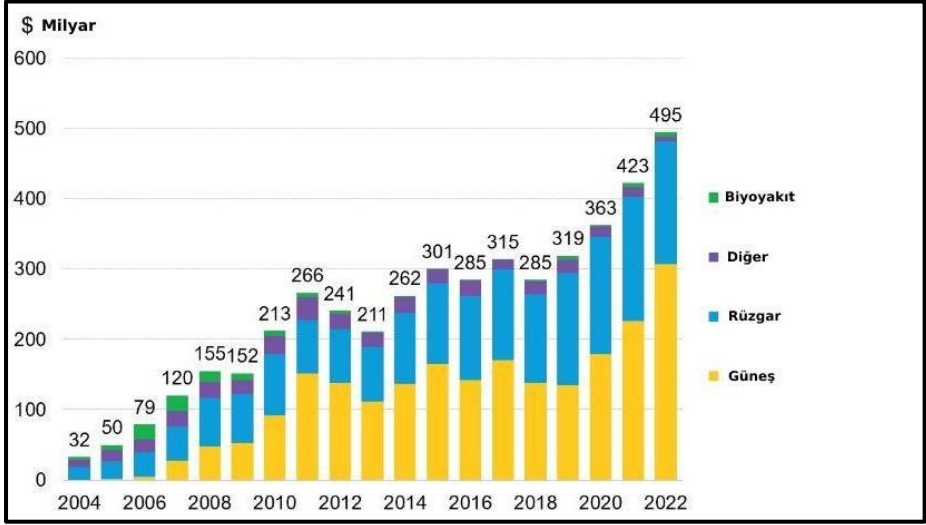
Her ne kadar fosil yakıt kullanımı artmış olsa da yenilenebilir enerji teknolojik yatırımlar ile maliyet açısından fosil yakıtlarla rekabet edebilecek hale gelmiştir. Özellikle rüzgâr ve güneş enerjisine olan yatırımlar ciddi oranda artmaya başlamıştır. Bu sayede atmosfere CO₂ gazının salınımında azalma amaçlanmaktadır.

Yaşanan enerji krizlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve teknolojilerinin gelişiminde büyük katkısı olmuştur. Bunun dışında ise gelişmiş ülkelerde çevre bilincinin ortaya çıkması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artmıştır. Tükenmeyen, sürdürülebilir, çevreyi, atmosferi ve insan sağlığı olumsuz yönden etkilemeyen yenilenebilir enerji kaynakları insanlığın geleceğinin anahtarı olarak görülmektedir.

Gelecek için sıfır emisyon politikaları üreten gelişmiş ülkeler için yenilenebilir enerji kaynakları büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda 2050 yılına kadar fosil yakıtlardan atmosfere yayılan emisyonları neredeyse sıfıra düşürmek için hedefler oluşturulmuştur. Bu talebin karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji teknolojilerinin ilerlemesi, maliyetlerin tamamının düşmesi ve depolama teknolojilerinin daha hızlı geliştirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerjinin avantajları olması yanında dezavantajı da bulunmaktadır, kesintili (baz yük olmaması) üretim yapması nedeni ile enerjiye 7/24 erişimde sorunlar oluşturmaktadır. Depolama teknolojileri geliştirildiğinde bu sorun tamamen olmasa da çözüme kavuşacaktır.

Yenilenebilir enerjiye yatırım hızla devam etmektedir. Yaşanan pandemi, jeopolitik gelişmeler, enerji krizi yenilenebilir enerji yatırımlarını engellemedi ve 2022 yılında küresel çapta yenilenebilir enerjiye 495 milyar dolar (Şekil 8) yatırım yapıldı. Yatırımlarda en fazla paya sahip olan güneş enerjisi yıllık %36'lık artış ile 308 milyar dolara yükselmiştir. Ülke bazında ise Çin güneş enerjisine 164 milyar dolar ve rüzgâr enerjisine 109 milyar dolar yatırım yaparak %55'lik pay ile dünyada birinci sırada yer almaktadır. ABD ise 50 milyar dolar ile küresel pazarda ikinci sırada yer almıştır. AB güçlü güneş enerjisi yatırımlarına rağmen 2021 yılına göre %10'luk düşüş

yaşayarak 39 milyar dolar yatırım yapmıştır (URL 7). 2022 yılında yapılan bu yatırımlar her ne kadar zirveye çıksa da sıfır emisyon hedefleri için geride kalmaktadır. Bu bağlamda küresel iklim değişimi her geçen yıl etkisini daha da artırmaktadır.



Şekil 8: 2004-2022 yılları arası yenilenebilir enerjiye olan yatırım

Kaynak: URL 7

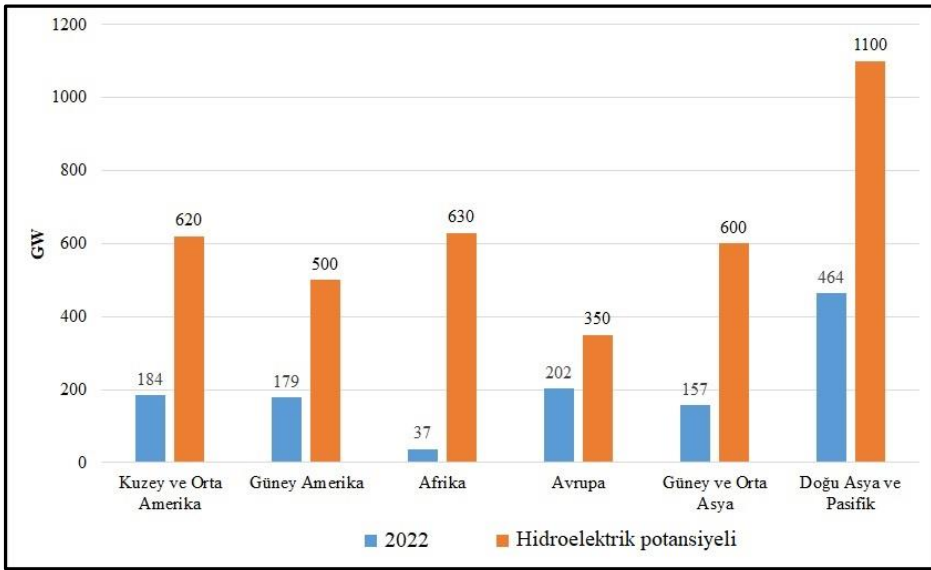
Yenilenebilir enerji maliyetleri 2010-2020 yılları arasında hızla düşüş yaşamıştır. Güneş enerjisinden elektrik üretimindeki maliyet %85 ve karadeniz rüzgâr enerjisi maliyetlerinde ise %56-%48'lik bir düşüş yaşanmıştır. Düşüşe geçen maliyet fiyatları küresel çapta enerji ihtiyacı açısından bir fırsata dönüşmüştür. Eğer gerekli yatırımlar daha hızlı şekilde faaliyete geçirilirse 2030 yılında yenilenebilir enerjiden üretilen elektriğin payı %65'e çıkması tahmin edilmektedir, yatırımlar devam ettiğinde ise 2050 yılında bu oranın %90'a ulaşması tahmin edilmektedir. Bu sayede 2050 yılında neredeyse karbondan arınmış bir dünya bizi beklemektedir (UN, 2022).

1.4.1.Hidrolik Enerji

Su tüm canlılar için vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır, bunun yanında ise modern dünyada yine vazgeçilmez bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Suyun akışında olan potansiyel enerjinin kinetik enerjiye evrilmesi ve mekanik enerji sayesinde elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu sayede ise yenilenebilir, sıfır karbonsuz bir enerji türüne sahip olunmaktadır. Beyaz

kömür olarak da adlandırılan bu enerji kaynağı akarsu ve kanalların oluşturduğu hareketli sular üzerinde elde edilmektedir. Ayrıca yapay olarak havuzlarda biriktirilen su yani barajlar da biriktirilen suyun belirli yüksekliklerden aşağı düşmesiyle de elektrik enerjisi üretilmektedir.

Hidrolik enerji 2022 yılında küresel elektriğin %16'sını karşılamıştır. Ayrıca 2022 yılında toplam 37 GW'lık kapasite eklenmiştir, bu kapasitenin 21 GW'ı Çin'e aittir. 2021 yılı itibarıyla hidrolik enerji kurulu kapasitesi 1397 GW yükselmiştir. Çin'in toplam hidrolik enerji kurulu kapasitesi 415 GW'dır, ciddi yatırımlar yapan Çin küresel kurulu kapasitede birinci sırada yer almaktadır. İkinci sırada ise Çin'in kurulu kapasitesinin üç katı aşağısında bulunan Brezilya (112 GW) yer almaktadır. Sırasıyla ABD (102 GW), Kanada (83 GW) ve Rusya (56 GW) listeyi takip etmektedir (IHA, 2022).



Şekil 9: Bölgelere göre 2022 yılı ve tam kapasite potansiyel kurulu güç miktarı

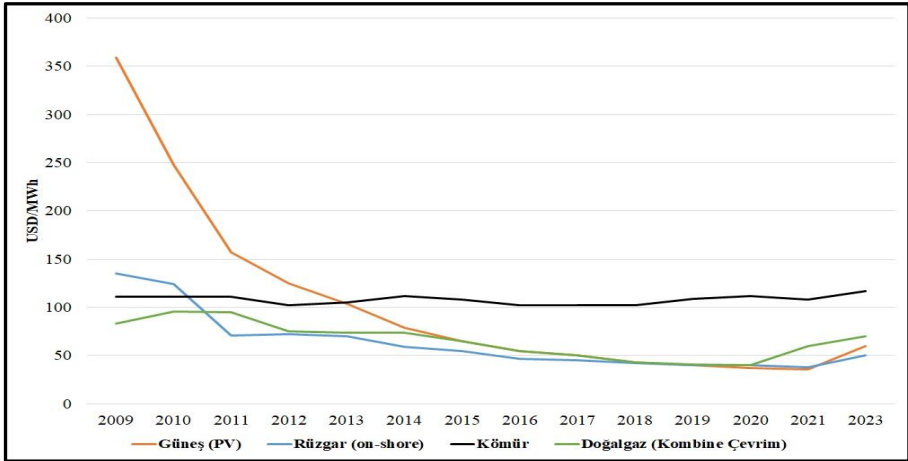
Kaynak: IHA, 2022

Elektriğe erişimin kısıtlı olduğu bölgelerde hidroelektrik potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 9 incelendiğinde özellikle Afrika kıtası ön plana çıkmaktadır. 630 GW potansiyeli bulunmasına rağmen 37 GW'lık bir kurulu güce sahiptir. Bu büyük potansiyel değerlendirildiğinde Afrika'da bulunan ülkeler için hem ekonomik hem de sosyo-kültürel açıdan ilerleme sağlayacaktır.

1.4.2.Güneş ve Rüzgâr Enerjisi

2021 yılında dünyada toplam elektrik üretimi 28.466 TWh olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılında 27.036 TWh olarak gerçekleşen elektrik üretimi 2020 yılında COVID pandemisi nedeni ile 26.889 TWh gerilemiştir. Fakat pandeminin etkisinin azalması ile 2021 yılında %6,2'lik bir oranla yükselişe geçmiştir (BP, 2022). 2022 yılında ise 29.186 TWh elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Yenilenebilir enerjinin öncüsü olan güneş enerjisinden, 2021 yılında 1059 TWh'lık üretim gerçekleşirken 2022 yılında ise bu miktar %24 artarak 1322 TWh'lık elektrik üretimi gerçekleşmiştir. 2021 yılında toplam güneş enerjisi kurulu gücü 861 GW iken 2022 yılında 1053 GW yükselmiştir. Güneş ve rüzgâr kurulu gücüne 2022'de toplam 266 GW dâhil edilmiştir, kapasite ilavesinin ise %72'sini güneş enerjisi oluşturmaktadır (Energy Institute, 2023)

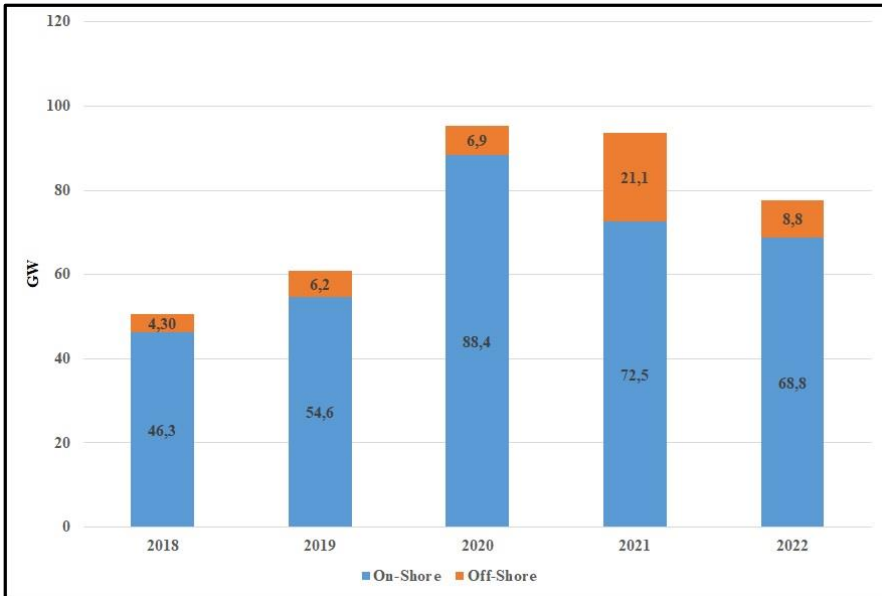
Şekil 10'da görüleceği üzere 2009 yılında günümüze kadar güneş ve rüzgâr enerjisinde USD/MWh önemli bir maliyet düşüşü gerçekleşmiştir. Bu son on yıldaki düşüş fosil yakıtlar ile büyük bir rekabet etme ortamı yaratmıştır. Fakat tedarikte yaşanan sıkıntılar, COVID-19'un 2022 devam eden etkileri ve 2022 Şubat ayında başlayan Rusya-Ukrayna Savaşı sebebi ile güneş enerjisinden elektrik üretimi 2021 yılında 36 USD/MWh 'den 2023 yılında 60 USD/MWh'ye yükselmiştir.



Şekil 10: 2009-2023 Yılları arasında elektrik üretiminin kaynaklara göre maliyeti

Kaynak: Lazard LTD, 2023

Global Wind Energy Council verilerine göre (GWEC) 2022 yılında 77,6 GW yeni rüzgâr enerjisi kapasitesi eklenerek 906 GW'a yükselmiştir. 2021 yılına göre %9'luk bir büyüme gerçekleşmiştir. Ayrıca 2022 yılında eklenen kurulu gücün %88'i on-shore santrallerde gerçekleşmiştir. Yine aynı kuruluşun tahminlerine göre 2023-2027 arasında toplam kurulu gücün 1586'a yükselmesi tahmin edilmektedir. Bu tahmine göre 5 yıllık periyotta her yıl 136 GW yeni kurulu güç demektir (GWEC, 2023). Eğer bu tahminler ile ülkelerin rüzgâr enerjisiyle ilgili politikaları ve uygulamaları uyuşacak olursa 2050 yılında geldiğimizde dünyada rüzgâr enerjisi toplam kurulu gücü neredeyse 5000 GW ulaşacaktır.



Şekil 11: 2018-2022 yılları arasında karada ve denizde eklenen kurulu güç miktarı
Kaynak: GWEC, 2023

1.4.3. Jeotermal Enerji

Temiz ve güvenilir olan jeotermal enerji, ısı ve elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli yer tutmaktadır. Özellikle 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için jeotermal enerji vazgeçilmezdir. Jeotermal kaynaklar özellikle volkanik aktivitelerin yaşandığı bölgelerde ve deprem kuşaklarının olduğu bölgelerde bulunmaktadır.

2022 yılında toplam jeotermal enerjisi elektrik kurulu gücü 16.127 MW yükselmiştir. 2021 yılına kıyasla 286 MW artış yaşanmıştır. Jeotermal kurulu gücünde ilk on ülke ise şöyledir; ABD (3794 MW), Endonezya (2356 MW), Filipinler (1935 MW), Türkiye (1682 MW), Yeni Zelanda (1037 MW), Meksika (962 MW), Kenya (944 MW), İtalya (944 MW), İzlanda (754 MW), Japonya (621 MW) (URL 8).

1.4.4.Biyokütle Enerjisi

Fosilleşmemiş organik (bitkisel ve hayvansal) atıklarından meydana gelen biyokütle enerjisi, enerji elde edilirken üç ana kısımda sınıflandırılmaktadır. Katı, sıvı ve gaz halinde olarak sınıflandırılmaktadır. Katı biyokütleyi insanlık, ateşi bulduğundan bu yana kullanmaktadır. Katı biyokütle enerji kaynakları odun, tezek, bitki atıkları olarak sıralanabilir. Sıvı ve gaz biyokütle ise son yüzyılda kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle katı biyokütleye geleneksel biyokütle, sıvı ve gaz biyokütleye ise modern biyokütle adı verilmektedir (Hatunoğlu, 2010, s. 9). Özellikle gelişmekte olan ülkelerin kırsal alanlarında ve geri kalmış ülkelerin genelinde ise geleneksel biyokütle kullanımı yaygındır.

2022 yılında elektrik üretiminde biyokütle enerjisinin payı %2,4 (672 TWh) olmuştur. Çin biyokütle enerjisinden 172 TWh elektrik üretirken ülkeler arasında en büyük üretici olmuştur. Ardından ise 57 TWh'lik üretim ile Brezilya takip etmektedir. Temiz elektrik enerjisine geçişte biyokütle enerjisine karbon yoğunluğundan dolayı sınırlı bir rol oynamaktadır. IEA Net Zero Emissions senaryosunda biyokütle enerjisinden elektrik üretimi 2030 yılında %4'lük bir paya sahiptir. Fakat Uluslararası İklim Değişikliği Paneli, biyokütleden elektrik üretiminin 2040 yılına kadar %2 sınırlandırılmasına dair öneride bulunmuştur (EMBER, 2023).

2. BÖLÜM

2.1. Bir Kaynak Olarak Hidrojen Enerjisi

Hidrojen elementi evrende en çok bulunan kokusuz, tatsız, renksiz, zehirsiz ve havadan 14 kat daha hafiftir. Hidrojen atmosfer basıncı altında 252.77°C'ta sıvı hale getirilip sıvı depolama da kullanılır. Hidrojen yakıldığında su buharı dışında kirletici bir salınımı yoktur, bunun için yenilenebilir kaynaklar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Evrenin %75'ini oluşturmasına rağmen hidrojen doğada saf halde bulunmamaktadır. Genel olarak oksijen ile bağ yaparak su formatında ve çeşitli karbon, hidrokarbonlarla birlikte bulunmaktadır.

Başka bir anlamla, saf H₂ elde edilebilmesi için üretilmesi gerekir. Doğalgaz, petrol ve kömür gibi doğadan doğrudan çıkarılamaz (Montgomery, 2014, s. 285). Hidrojen; petrol, doğalgaz, kömür ve alternatif/yenilenebilir enerji kaynakları gibi birincil enerji kaynağı değildir, hidrojen bir enerji taşıyıcısıdır³.

1500 yıllarının başında kimyager Paracelsus, sülfirik aside demir talaşı eklediğinde çıkan kabarcıkların yanıcı olduğunu keşfetti. 1671 yılında ise Robert Boyle da aynı gözlemi yaptı (fakat bu dönemde hidrojen olarak adlandırılmıyor). 1766'da Henry Cavendish bu kabarcıkların diğer gazlardan farklı olduğunu ve farklı bir element olduğunu ortaya çıkarmıştır. 1783 yılında Fransız kimyager Antonie Lavoisier, Cavendish'in buluşlarına dayanarak Yunanca *hidro* ve *genler* kelimelerinden türetilen *hidrojen* adını vermiştir, "su" ve "doğmak" anlamına gelmektedir (Zohuri, 2018, s. 6-10). 1838'de Alman kimyager Christian Friedrich Schoenbein hidrojen ve oksijen gazlarının birleşmesiyle su ve elektrik akımı üretebilen yakıt pili teknolojisinin ilk adımlarını atmıştır. 1845'te İngiliz bilim insanı Sir William Grove, Schoenbein keşfini geliştirerek "Yakıt Pili'nin Babası" unvanını aldı (URL 9). Ünlü Fransız yazar Jules Verne'nin 1875'te yazmış olduğu "Gizemli Ada" adlı eserinde hidrojenin geleceği hakkında kehanetlerde bulunmuştur, dünyada kömürün tükendiğinde insanların hidrojenden enerji üreteceği öngörüsünde bulunmuştur. Jules Verne Gizemli Ada kitabında hidrojenin öneminden şu şekilde bahsetmiştir:

³ Enerji taşıyıcısı, birincil enerji kaynaklarının (doğalgaz, petrol, kömür, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları) dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerji kaynaklarıdır. En yaygın enerji taşıyıcıları ısı ve elektriktir.

İnanıyorum ki suyu oluşturan hidrojen ve oksijen birlikte ya da ayrı ayrı kullanıldığında taş kömüründen daha kuvvetli bir ısı ve ışık kaynağı oluşturacak ve bir gün lokomotiflerin buhar kazanlarını yakmada ve buharlı gemilerin hareketini sağlamada kömür yerine bu gazların sıkıştırılmışı kullanılacaktır.

Hidrojenin 1920 ve 1930 yıllarda özellikle Almanya, İngiltere ve Kanada’da yakıt olarak kullanımına ilgisi artmıştır. Elektrolitik hidrojen enerjisi tesisleri üretiminde lider olan Kanadalı “*Electrolyser Corporation*” şirketinin macerası 20. yüzyılın başlarında başlamıştır. 1905 yılında Alexander T. Stuart, Toronto Üniversitesi’nde kimya ve mineraloji okurken hidrojen enerjisi ile ilgilenmeye başlamıştır (Hoffman, 2012, s. 29). Yakıt hücresinin mucidi olan William Grove’un eski öğrencisi Lash Miller (Toronto Üniversitesinde profesör olarak görev yapmaktaydı) ile Stuart elektrik şebekesine eklendiğinde yeni üretim kapasitesinden hidrojen ve oksijenin kojenerasyonu⁴ fikrini tasarladılar. Alexander T. Stuart 1913’te dünyanın önde gelen elektroliz sistemlerinden biri olan “Stuart Cell’i” icat etmiştir (URL 10).



Şekil 12: Alexander T. Stuart Tarafından İcat Edilen “Stuart Cell”.

Kaynak: URL 10

⁴ Kojenerasyon: üretilen enerjinin hem elektrik enerjisinden hem de ısı enerjisinden aynı sistemde beraberce üretilmesidir. Elektrik enerjisi üreten bir gaz tribünü veya motoru kullandığı enerjinin sadece %35-45 kadarını elektrik enerjisine çevirebilmektedir. Bu sistemin kojenerasyon sistemi ile üretilmesi halinde dışarıya atılacak ısı enerjisinin büyük bölümü de kullanılabilir bir enerjiye dönüştürülüp toplam enerji girdisi %85-95 oranlarına çıkartılabilir (URL 47).

1923 yılında genetikçi ve evrimsel biyolog olan John Burden Sanderson Haldane, Britanya'daki kömürden üretilen enerjinin tükeneceğini öngörerek, rüzgâr enerjisinden elektroliz yolu ile hidrojen üretmek için yel değirmeni ağı sistemini ve üretilen bu hidrojenin sıvılaştırılıp depolanabileceğini, hidrojenin geleceğin yakıtı olduğunu belirttiği bir konferans düzenledi (Haldane, 1925). Haldane'in bu çalışması hidrojene dayalı yenilenebilir enerji ekonomisinin sürdürülebilir enerji üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

1938 yılında Igor Skorkski Amerikan Elektrik Mühendisleri Enstitüsü'nde verdiği bir konferansta hidrojenin havacılık sektöründeki potansiyelinden bahsetmiştir. Sıvı hidrojenin yakıt olarak kullanılması ile uzun mesafelerin yakıt ikmali yapılmadan ekvator boyunca dünyanın dolaşımını mümkün kılacağından söz etmiştir (Hoffman, 2012, s. 32). Skorkski'nin bu konuşmasında anlaşıldığı üzere hidrojenin ucuz ve sürdürülebilir kaynak olduğunu anlamaktayız.

Igor Skorkski'nin konuşmasından tam 5 yıl sonra 1943 yılında ABD Hava Kuvvetleri ABD'nin uzay programına roket yakıtı olarak sıvı hidrojenin kullanılmasına ilişkin bir test programı başlattı (URL 11).

Hidrojenin enerji alanıyla ilgili çalışmalar ise Soğuk Savaş döneminde başlamıştır. Soğuk Savaş tarafları (ABD-SSCB) hidrojenin askeri gücünü de keşfetmiştir. 1953 yılında SSCB tarafından ilk hidrojen bombası denemesi yapılmıştır, bir yıl sonra ise ABD hidrojen bombası denemesini yapmıştır. Hidrojenin askeri yönü ile keşfedilen gücü enerji kaynağı olarak kullanılması için 1955 yılında her iki ülkenin çalışmaları ile başlatılmıştır (Oral, 2020, s. 1115-1156). 1958 yılında Amerika Birleşik Devletleri, National Aeronautics and Space Administration/Ülusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) kuruldu. NASA uzay programı roket tahrik ve yakıt hücreleri için yakıt olarak en çok sıvı hidrojeni kullanmaktadır (URL 10).

1959 yılına gelindiğinde ise Cambridge Üniversitesinden Francis T. Bacon ilk hidrojen-hava yakıt hücrelerini geliştirmiştir. Bu hücre ile 5 kw'lık bir kaynak makinesini çalıştırmıştır. Geliştirmiş olduğu bu yakıt hücrelerine ise "Bacon Pili" adını vermiştir (Kaya, vd., 2017, s. 2). 1970 yılında

Elektrokimyacı John O'M Bockris Jules Verne'nin kehanetinden yaklaşık 100 yıl sonra "hidrojen ekonomisi"⁵ terimini ortaya atmıştır.

ABD Hava Kuvvetlerinin 1943'te başlatmış olduğu uzay programında 1961 yılında nihayete erişilmiştir ve Sikorski'nin öngörülleri ile oluşturulan çalışmada sıvı hidrojenin Atlas roket motorunda kullanılması başarılı olmuştur (URL 11).

1973 petrol krizi ile sekteye uğrayan ve bunun sonucu arz sıkıntısı yaşayan ülkeler enerji için sadece petrole bağılı olmanın yanlışlığını fark ederek hidrojen enerjisi gibi alternatif kaynaklara önem vermeye başlamışlardır. Yaşanan bu kriz yenilenebilir enerji teknolojilerinin daha hızlı gelişimine öncü olmuştur.

1974'te Miami Üniversitesi'nden Prof. T. Nejat Veziroğlu öncülüğünde, hidrojen enerjisinin gücü ve geleceği hakkında düzenlenen bir konferans olan Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı'nı (THEME) düzenlendi. Bu konferansın sonrasında katılan bilim adamları ve mühendisler ile Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IAHE) kurulmuştur (Zohuri, 2018, s. 7).

1988'de Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği'nin (SSCB) Tupolev adlı havacılık ve savunma şirketi 164 yolcu kapasiteli TU-154B uçağına dayalı bir prototip olan TU-155 jetinin üç motorundan birini sıvı hidrojenle çalıştırılacak şekilde tasarlamışlardır (Zohuri, 2018, s. 7).

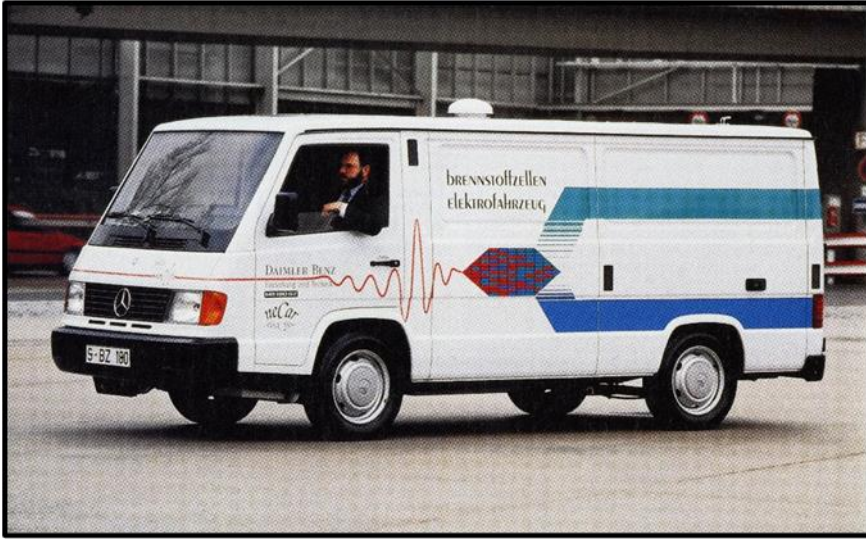


Şekil 13: Tupolev TU-155

Kaynak: URL 12

⁵ Enerji Ekonomisi: ekonominin, enerji kaynaklarının varlığını, üretimini ve kaynakların ekonomik faaliyetlerde kullanımını irdeleyen alt koludur. Enerji ekonomisi 1973 petrol krizinden sonra ağırlığı hissedilir oranda artmıştır. Hidrojen ekonomisi, hidrojen yoluyla enerjinin üretimi, depolanması, nakliyesi, elektrik veya ısı enerjisine dönüştürülmesi ve uygulanmasıdır.

13 Nisan 1994 tarihinde Daimler-Benz Almanya'nın Ulm kentinde başına düzenlediği bir etkinlikte Mercedes-Benz MB 100 minibüs modeli olan NECAR 1 (New Electric Car) yakıt hücreli aracını sergilemiştir. NECAR 1 dünyanın yakıt hücresi ile çalışan ilk aracıdır (URL 13).



Şekil 14: Daimler-Benz NECAR 1

Kaynak: URL 13

2000 yılına gelindiğinde ise yakıt hücresi üretiminde önde gelen firmalardan olan Ballard Power Systems, Detroit Otomobil Fuarında otomotiv sektörünün kullanımı için dünyanın ilk kullanıma hazır PEM⁶ (Proton-exchange membrane fuel cell) yakıt hücresini tanıttı (Hoffman, 2012, s. 51).

2003 yılına gelindiğinde ise ABD Başkanı George Bush, hidrojen ile çalışabilen yakıt hücrelerini ticarileştirmek için AR-GE çalışmalarına 10 yıl süresince 1,2 milyar dolar yatırım yapılacak bir girişimi açıkladı. Bu gelişmeye ek olarak, U.S. DOE (United States Department of Energy) sekreteri uluslararası iş birliği yoluyla hidrojen teknolojilerinin gelişmesini teşvik etmek için Ekonomide Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Uluslararası Ortaklığı (IPHE) kurmuştur (Sasaki, vd., 2015, s. 69).

⁶ PEM (Proton-exchange membrane fuel cell) yakıt hücreleri, yakıtta depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan ve verimli olacak bir şekilde elektrik enerjisine dönüştüren, yan ürün olarak ise fosil yakıtlardaki gibi kirlenici gaz değil su oluşturan, enerji tasarrufu ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma potansiyeli olan bir teknoloji (Karanfil, 2020).

2004 yılında dünyanın ilk yakıt hücresi denizaltısı Alman Donanması tarafından derin su denemelerine tabi tutulmaya başlamıştır (Zohuri, 2018, s. 9).

2023 yılında sıvı hidrojen yakıtlı ve pilotlu ilk gösteri uçağı olan “HY4” Slovenya’nın Maribor kentinde havalandı. Bu gelişme havacılık sektörünü karbondan arındırmak için önem arz etmektedir (URL 14).

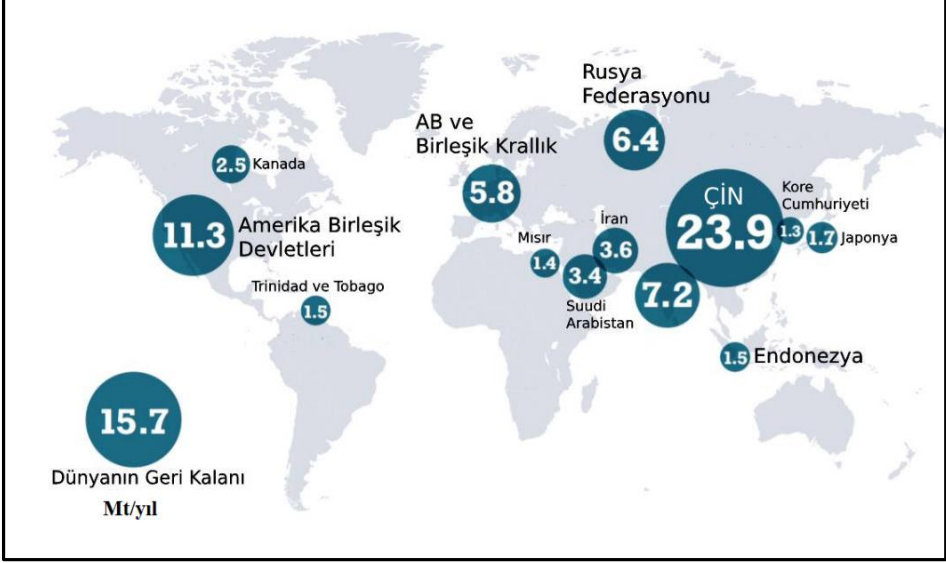


Şekil 15: Dünyanın ilk sıvı hidrojenle çalışan gösteri uçağı HY4

Kaynak: URL 15

2.2. Hidrojenin Üretimi, Depolanması ve Taşınması

Hidrojen fosil yakıtlarda olduğu gibi doğal yollarla oluşan bir yakıt çeşidi değildir, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak çeşitli hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıt türüdür. Hidrojen; su, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerjilerden üretilen elektriğin elektrolizde kullanımıyla elde edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) “Küresel Enerji İncelemesi 2021” raporuna göre 2020 yılında 90 milyon ton hidrojen üretimi yapılmıştır.



Harita 4: 2020 yılında tüketilen hidrojenin küresel ölçekte dağılımı
Kaynak: IRENA , 2022

Yukarıdaki haritada görüldüğü üzere 2020 yılında üretilen 90 mt hidrojene 23.9 mt talep ile birinci sırada yer alan ülke Çin olmuştur.

Hidrojen enerjisi 21. yüzyılın enerji kaynağı olacak ise önündeki en büyük sorunlardan bir tanesi hidrojenin depolanmasıdır. Sabit ve mobil taşıma uygulamaları ile hidrojen depolanabilir. Mobil taşıma uygulamalarında deponun hafif olması gerekir. Hidrojenin kullanılabilir ve güvenli bir şekilde depolanması gerekmektedir. Hidrojenin depolanabilmesi için gaz veya sıvı formunda olması gerekmektedir.

Üretilen hidrojen, boru hatları ve/veya tankerler ile taşınabilmektedir. Gelecek zamanlarda yapılan araştırmalar sonucu, mevcut doğalgaz boru hatlarının altyapısı değiştirilerek uygun maliyetler ile taşınması mümkün kılınacağı düşünülmektedir.

2.2.1.Hidrojenin Üretimi

Fosil yakıtların azalması, petrol krizleri ve fosil yakıtların emisyon salınımı nedeniyle insanoğlu alternatif kaynak arayışı içerine girmiştir. Güneş, rüzgâr, jeotermal, biyogaz, biyokütle gibi yenilenebilir enerjilere yönelen dünya temiz ve sürdürülebilir bir kaynak temin edebilmektedir. Fakat enerji arz-

talebi doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynakları elektrik üretiminde yeterli seviyede değildir, elektrik üretiminde fosil kaynaklar öne çıkmaktadır.

İkincil enerji kaynağı olan hidrojen, birincil enerji kaynakları kullanılarak üretilir. Ancak fosil yakıtların (petrol, kömür, doğalgaz) çevreye olan etkisi ve fosil yakıtların azalması nedeni ile yenilenebilir enerji kaynakları ile üretimi daha anlamlı olmaktadır.

Dünya Enerji Konseyinin (WEC) 2020 yılında yayınladığı “Uluslararası Hidrojen Stratejileri” raporuna göre 2050 yılında, yılda 270 milyon tonluk hidrojen üretimi yapılması planlanmaktadır. Fakat Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2021 yılında yayınladığı “Net Sıfır Emisyon 2050 Raporu” göre ise 2030 yılında hidrojen üretiminin 200 milyon ton olacağı, üretilen hidrojenin %70'nin düşük karbonlu (yenilenebilir kaynaklar ve CCUS⁷) teknolojiler kullanılarak üretilebileceğini, 2050 yılında ise hidrojen üretiminin 500 milyon tonun üzerine çıkacağı neredeyse tamamının düşük karbonlu teknolojiler ile üretilebileceğini belirtmiştir.

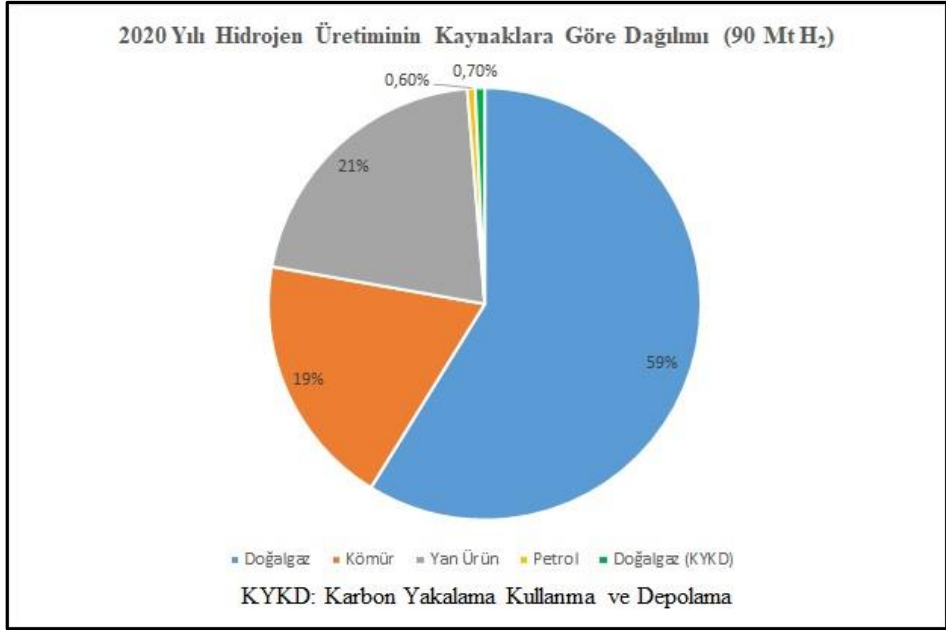
Hidrojen bileşikler halinde bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse su, hidrojen ve oksijenin birleşiminde oluşmaktadır. Fosil kaynaklarda ise petrol, doğalgaz ve kömürde bulunan karbonla bileşik halindedir. Hidrojen üretimindeki zorluk ise hidrojenin doğal bileşiklerinden ayrılmasıdır. Hidrojenin bileşiklerden ayrılması için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar aşağıda belirtildiği şekildedir.

2.2.1.1.Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

IEA verilerine göre, hidrojen üretiminin %80'e yakın bir kısmı doğalgazın buhar dönüşümü ve kömürün gazlaştırılması ile üretilmektedir. Geriye kalan payın neredeyse tamamı diğer ürünler için tasarlanmış tesislerde üretilen yan ürün hidrojenidir (Şekil 15). Karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri ise mevcut fosil yakıtlardan üretilen emisyonları azaltmak için kullanılabilecek bir yöntemdir. Şu anda KYKD (Karbon yakalama, kullanma ve depolama) hidrojen üretiminde az bir paya sahip olsa da yenilenebilir enerjiden daha az bir maliyete sahiptir. Bu durumda KYKD ilgi çekici bir konumdur, çünkü mevcut durumdaki üretim kapasitesinden

⁷ CCUS Carbon capture and storage (Karbon yakalama ve depolama)

kaynaklanan emisyonları iyileştirmeler yoluyla azaltılabilir bir duruma getirme potansiyeli bulunmaktadır (URL 16).



Şekil 16: 2020 Yılı Hidrojen Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı

Kaynak: URL 16

2.2.1.1.1. Kömürün Gazlaştırılması

Kömür insanlık tarihi için önemli kaynaklardan bir tanesidir, sanayi devriminin oluşmasında ve ilerlemesinde en önemli rolü oynamıştır. Modern dünyanın oluşmasındaki elzem bir kaynaktır. Diğer fosil kaynaklara nispeten çıkartma-taşıma maliyetleri açısından daha ekonomik olan ve rezervi bol olan kömür yakıt, kimyasal vb. üretmek için kullanılan bir hammaddedir. 2020 yılında yapılan hidrojen üretiminde %19'luk kısmı kömürün gazlaştırılması ile elde edilmiştir.

Gazlaştırma sürecinde kömür öğütülerek toz haline getirilir ve su ile karıştırılarak çamur halini alır. 900°C'ye kadar ısıtılır, yüksek ısı ve basınç altında gaz halinde dönüşür, su buharı ve oksijen kullanılarak gazlaştırıcı denilen ünitelerde H₂, CO₂ ve CO elde edilir (Yüksel, 2010, s. 36).

2.2.1.1.2. Doğalgaz Buhar Dönüşümü

2020 yılı içerisinde üretilen hidrojenin %59'luk kısmı doğalgaz ile üretilmiştir. Bu kullanılan yöntem en ucuz, en verimli ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yüzden ki yıllık hidrojen üretim payında en yüksek orana sahiptir.

Doğalgaz buhar dönüşümü kısaca şu aşamalardan geçmektedir; birinci adımda doğalgaz yüksek sıcaklıklarda (320-450°C) buhara maruz bırakılarak hidrojen, karbondioksit ve karbonmonoksit elde edilir. İkinci adımdaysa karbonmonoksit buhara maruz bırakılarak tekrardan hidrojen ve karbondioksit elde edilir. Bu işlemler sonucu hidrojen üretim miktarı %70-%90 arasındadır (Kükürer, 2007, s. 85).

2.2.1.2. Yenilenebilir Kaynaklardan Hidrojen Üretimi

Sanayi devriminin başlamasıyla birlikte, enerjiye ihtiyacın bir hayli artması insanoğlunu bir arayışa geçirmiştir. Bu nedenle ulaşılması ve kullanımı açısından kolay olan kaynaklara karşı ilgisi bir hayli artmıştır. Fosil kaynaklar arasında yer alan kömür ve petrol sanayinin ve kalkınmanın temel dinamiği olmuştur.

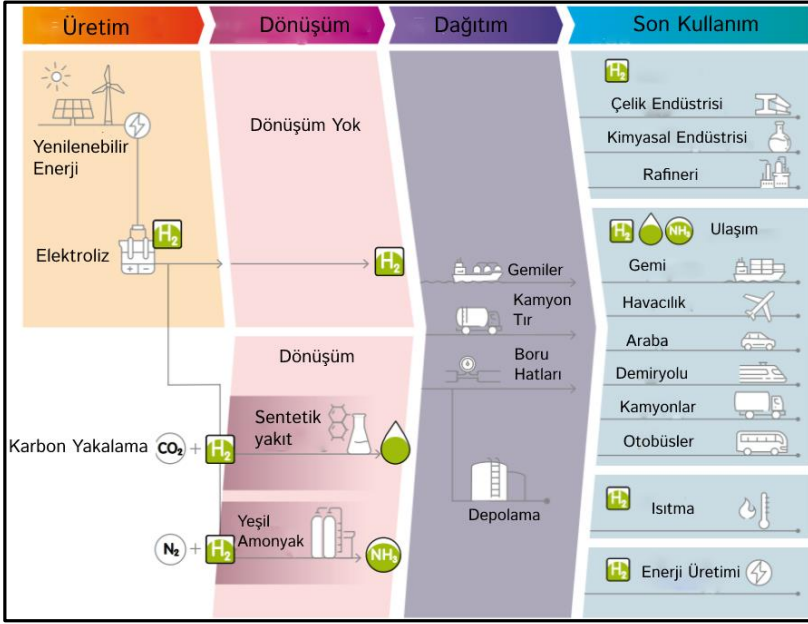
1973'teki petrol krizinden sonra enerji kaynakları konusunda bir güvensizlik ortamı oluşmuştur. Güvensizlik ortamından dolayı dünyada yenilenebilir kaynaklara karşı ilgi artmıştır. 1979 yılında yaşanan ikinci bir petrol krizi ile güvensizlik ortamı iyice pekişti, 80'li yılların ortalarında petrol fiyatları düşmüş olsa da ülkeler enerji arz güvenliği açısından yenilenebilir kaynaklara yönelmeye devam etmiştir. 2021 yılında da artan petrol, doğalgaz ve kömür fiyatları ülkeleri tekrardan bir tedirginliğe sokmuştur. Bu sebeplerden dolayı insanoğlu enerji için kaynak çeşitlendirmesinde arayış içinde bulunmuştur.

Hidrojen enerjinin sürdürülebilir olması ve birçok yenilenebilir kaynaktan üretilmesinden dolayı önemli bir aktördür. Yenilenebilir kaynaklar ile hem ulaşım sektörü hem de endüstri için hidrojen üretimi yapılabilmektedir.

Dünyada üretilen hidrojenin %5'lik kısmı yenilenebilir enerjilerden üretilmektedir. Yenilenebilir enerjilerden hidrojen üretiminin önündeki engeller ise şunlardır;

- 1- Yüksek üretim maliyetleri

- 2- Özel altyapı eksikliği
- 3- Enerji kayıpları (Elektroliz yolu ile üretilen hidrojenle %30-%35'lik bir kayıp oluşması)
- 4- Tanınma eksikliği
- 5- Sürdürülebilirliğinin sağlanması gerekmektedir (IRENA, 2020a, s. 13)



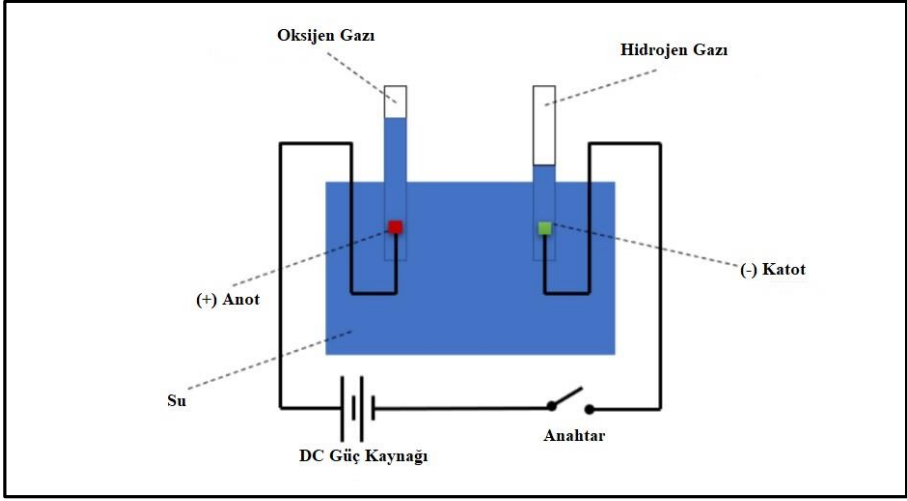
Şekil 17: Yenilenebilir kaynaklar ile hidrojenin üretimi dağıtım ve nihai kullanım alanları

Kaynak: IRENA, 2020a, s. 55

2.2.1.2.1. Elektroliz

Elektroliz işlemi, suyun (H₂O) doğru akım elektrik kullanılarak hidrojen (H) ve oksijen (O) olarak ikiye ayrılması işlemidir. Dönüşümün yapıldığı bu üniteye elektrolizör adı verilmektedir. Elektroliz yöntemi hidrojen üretiminde en basit ve emisyonuz bir yöntemdir. Yenilenebilir kaynaklardan ve nükleer enerjiden emisyonuz bir şekilde üretilebilen hidrojen gelecek için umut verici bir seçenektir.

Elektroliz işleminin çalışma prensibi şu şekildedir; elektrolizörler elektrolitik bir sıvı ile ayrılmış iki elektrottan (anot-katot) oluşur. Elektrotlara doğru akım uygulanır ve elektrolitik sıvı ile pozitif elektrottan (anot) negatif elektrota doğru akım iletilir. Bu işlemin sonunda elektrolitik içindeki su, hidrojen ve oksijene ayrışır (TSKB, 2021, s. 7)



Şekil 18: Suyun Elektrolizi
Kaynak: TSKB, 2021, s. 7

Elektrolizlerden hidrojen elde etmek için birden fazla kaynak mevcuttur. Örnek vermek gerekirse güneş enerjisinden, rüzgâr enerjisinden, jeotermal enerjiden, gelgit enerjisinden, derinliği değişen okyanus akıntılarında, nükleer enerjiden emisyonuz yeşil hidrojen elde edilmektedir (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 25). Hidrojen enerjisi sistemleri birçok birincil enerji kaynağına entegre edilerek üretilebilmektedir. Rüzgâr hızının elektrik enerjisi üretmeye uygun olduğu bölgelerde santraller kurularak hidrojen enerjisi üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Fakat rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları baz yük olmadığından dolayı hidrojen üretiminde kesintiler yaşanabilir.

Dünyadaki en bol kaynaklardan biri olan güneş enerjisi ile temiz ve sürdürülebilir hidrojen üretilebilir. Güneş enerji sistemleri ile hidrojen üretiminde elektroliz yöntemi uygulanırken fotovoltaik yöntemden yararlanır. Bu yöntem iki aşamalıdır; birinci aşamada silisyum ya da eşdeğer maddelerden yapılan güneş pilleri ile doğru akım yani elektrik elde edilir

sonrasında elde edilen bu akım elektrolizin hücresinin elektrotlarından aktarılarak hidrojen ve oksijenin ayrıştırılması sağlanır. PV sistemlerinde üretilen elektriğin ısı verimi hafif su reaktörlerinde %34, gelişmiş sistemlerde %50, ortalama %30-40 arasındadır. Elektroliz sistemleri düşük verimli olsa da sürdürülebilir olması önem arz etmektedir (Özdemir ve Mutlubaş, 2019, s. 22). Gelişen teknolojiler ile hem yenilenebilir enerji teknolojilerinin hem de elektroliz maliyetlerinin düşmesi öngörülmektedir.

2.2.1.2.1.1. Elektrolizör Sistemleri

Elektrolizörler suyun içinde bulunan oksijen ve hidrojeni ayrıştırmak için kullanılan bir cihazdır. Basit bir yapısı olsa da yeşil hidrojen için önemli bir buluştur.

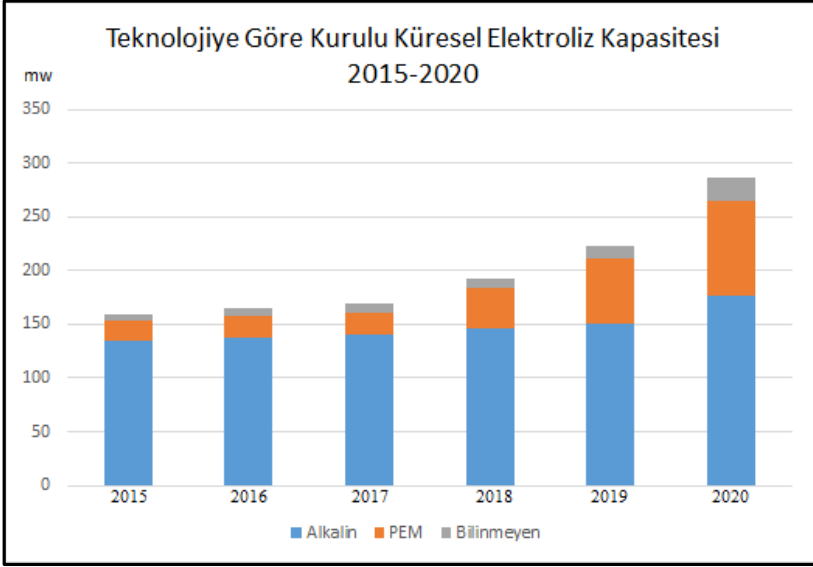
Aktif olarak kullanımlarına rağmen PEM ve alkali elektrolizörler, fosil yakıt kaynaklı hidrojen üretimine kıyasla hem CAPEX⁸ hem de OPEX⁹ açısından hala oldukça pahalıdır. Bu yüzden ki hidrojen üretim piyasasında engel teşkil etmektedir. PEM elektrolizörleri alkali elektrolizörlere göre %50-60 oranında daha maliyetlidir. (IRENA, 2020b, s. 50).

Ticari kullanımda olan PEM ve alkali elektrolizörleri dışında laboratuvarında geliştirilmekte olan iki elektrolizör daha vardır. Bunlar anyon değişim membranı (AEM) ve katı oksittir. Bu geliştirilen elektrolizörlerde gelecek vaat etmektedir.

2021 yılında Cummins Inc. Kanada'nın Quebec eyaletindeki Air Liquide hidrojen üretim tesisinde dünyanın en büyük PEM elektrolizörünü kurmuştur. 20 MW'lık olan elektrolizör günlük 8.2 tona yakın temiz hidrojen üretmektedir. Bu sayede yıllık 27.000 ton CO₂ emisyonu önlenecektir (URL 17). Fakat Nisan 2021'de Çin'in devreye aldığı 30 MW'lık PEM elektrolizörü ile lider konuma yükselmiştir. Ayrıca Çin 22 Aralık 2021 tarihinde dünyanın en büyük alkali elektrolizörünü devreye almıştır, 150 MW'lık olan bu sistem 200 MW'lık bir güneş enerji sistemi ile entegre edilmiştir (URL 18).

⁸ Bir işin üretilirken ki ilk yatırım maliyeti veya sermaye maliyeti anlamına gelmektedir.

⁹ CAPEX aracılığıyla üretilen malların bakım ve işletilmesi ile ilgili harcamaları ifade etmektedir.



Şekil 19: Teknolojiye göre, kurulu küresel elektroliz kapasitesi

Kaynak: IEA, 2021b, s.116

Grafikte görüleceği üzere hidrojen üretiminde en çok kullanılan elektrolizör, alkali elektrolizörleridir. 2020 yılında 176 MW'lık bir kapasiteye ulaşmıştır. Alkali elektrolizörlerin oranının yüksek olmasının sebebi olgun bir teknoloji ve diğer elektrolizörlere göre veriminin daha yüksek olmasındandır.

2.2.1.2.2. Fotoelektroliz

Sonsuz ve temiz enerji kaynağı olan güneş ile hidrojen üretmenin bir yolu daha vardır o da fotoelektrolizdir. Fotoelektroliz, fotoelektrokimyasal hücre (PEC) adı verilen ışık toplama sistemi ile yapılmaktadır.

Sudaki hidrojen elektrokimyasal hücre (PEC) ile ayrıştırılmaktadır. Elektrolit içine konulan yarı iletken anot (foto-elektrot) kullanılır. Bu elektrot üzerine yerleştirilen PV katman ışığı soğurabilen yarıiletken bir malzemeden yapılmıştır. PV katman suyun ayrılması için gereken elektrik enerjisini sağlamaktadır (Onurbaş Avcıoğlu, 2017).

2.2.1.2.3. Termoliz

Suyun yüksek sıcaklıkla da parçalanması ile üretilen hidrojene termoliz adı verilmektedir. Bu işlemde sıcaklık 1500°C ve üzeri sıcaklıklara çıkarılabilmektedir. Bu kadar yüksek sıcaklığa çıkan suyun buhar halini

almasıyla moleküller hidrojen ve oksijen olarak ikiye ayrılır. Sıcaklık yükseldikçe buhar moleküllerinin parçalanması artmaktadır. Endüstriyel kullanıma hidrojen üretmek için sıcaklık 2500-3000°C kadar çıkarılmaktadır. Yüksek sıcaklıkları elde edebilmek için ise güneş ışığını toplayarak küçük bir alanda yoğunlaştıracak bir güneş kulesi sistemidir (Chen vd, 2019).

2.2.1.2.4. Biyokütle ile Hidrojen Üretimi

Biyokütle ile hidrojen üretimi fosil yakıtlardan hidrojen üretimine benzerlik göstermektedir. Önce gazlaştırma işlemi yapılır; gaz içinde H₂, CO ve CH₄ bulunmaktadır. Gazın içerisinde yer alan metan buhar ile reform edilerek hidrojen ve karbonmonoksit çevrilir. Karbonmonoksit ise tekrarda şift reaksiyonu ile hidrojene dönüştürülür ve biyokütleden alınan hidrojen verimi artar. Bu yöntemle hidrojen elde edilmesine biyokütleden termokimyasal hidrojen üretimi adı verilmektedir (Kaya vd., 2017, s. 37).

Biyolojik yöntemler ile üretilen hidrojenin endüstriyel ölçeklerde üretilebilmesi için önünde bazı engeller vardır. Üretimdeki yavaşlık, maliyetlerin yüksek olması, bakterideki davranışların öngörüsüzlüğü olarak sıralanabilir (Erdener vd., 2010, s.36).

2.2.1.3. Nükleer Enerji ile Hidrojen Üretimi

Nükleer enerji ile hidrojen üretimi önümüzdeki yıllar için önemli bir kaynaktır. Hem emisyonların artmaması hem de biyokütle ve fosil yakıtlardaki hammaddenin hızlı tükenişi nedeniyle nükleer santrallerde üretilen hidrojen, sürdürülebilirlik için önem arz etmektedir.

Nükleer ısının hidrojen üretirken ki verimliliği hafif su reaktörlerinde %25 (elektroliz için %75), termokimyasal işlemler ve buhar elektrolizinin yüksek sıcaklıklı reaktörle birlikte verim %45-50 oranına çıkmaktadır. Nükleer enerji ile hidrojen üretiminde hammadde olarak sadece suyu kullanır ve bu da karbon emisyonu içermemektedir (Yan vd., 2011, s.56).

2.2.2. Hidrojenin Depolanması

Sanayi devriminin başlaması ile insanlar kırdan kente göçlere başlamıştır, bu göçler sonucu kentler hızlı bir büyüme sağlamıştır. Artan işgücü nedeniyle nüfus artışı başlamış, bunun sonucunda ise enerjiye olan

ihtiyaç da artmıştır. Bu yüzden ki enerji bir küresel ve jeopolitik güç halini almıştır. 2022'nin sonlarında BM'nin açıklamalarına göre dünya nüfusu 8 milyarı aşmıştır. Bu yüzden alternatif kaynaklar dünya nüfusu için kurtarıcı rolündedir. Fosil yakıtlar tükenmeye ve karbon emisyonu ile çevreye tahribat vermeye başlamıştır. Enerjinin bu kaynaklardan üretilmesi kadar üretilen enerjinin depolanması da önem arz etmektedir.

Hidrojen enerjisinin küresel çapta kullanılabilmesi için depolanabilme sorununun engel teşkil etmemesi gerekmektedir. Hidrojen arz ve talebinin karşılanması için sabit ve mobil depolama uygulamaları yapılması gerekmektedir. Hidrojenin düşük yoğunluğu nedeniyle depolanabilmesinde bazı sorunlar çıkarmaktadır.

Mevcut durumda hidrojen depolama sistemlerinin kamu ve endüstri alanlarında ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Fakat ilerleyen zamanlarda gelişen teknoloji ve depolama sistemlerinin maliyetlerinin düşürülmesi ile büyük adımlar atılmış olacaktır.

Günümüzde hidrojenin maliyeti düşük ve güvenilir depolanması için bazı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sıkıştırılmış gaz, sıvılaştırılmış hidrojen, karbon nanotüpler, hidrokarbonlar, metal hidritler ve mağaralarda depolama şeklinde sıralanabilir.

Sıkıştırılmış gaz yöntemi hidrojen depolama sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Hidrojen gaz halinde basınçlı tanklarda depolanabilir. 50 litrelik silindirik şeklindeki tanklarda 200-250 bar'lık basınç altında depolanması sağlanmaktadır (basınç oranı 600-700 bar'a kadar çıkabilmektedir). Hidrojenin gaz halinin 1 gramı atmosferik basınçta 11 L hacim kaplar. Yüksek basınç nedeni ile depolama tankları çok ağır olmaktadır, bu yüzden hidrojenden alınan verimi ve hidrojenin taşınmasını olumsuz etkilemektedir. Sıkıştırılmış gaz halindeki hidrojenin otomobillerde depolanabilmesi de mümkündür. Ortalama 500 km menzili olan hidrojen yakıtlı bir aracın ortalama boyutuna göre hidrojen tankı içerisinde 4-7 kg hidrojen depolanabilmesi gerekmektedir (Koşar, 2021, s. 1).

Sıvılaştırılmış hidrojen yönteminde ise yalıtımlı tanklar içinde, atmosfer basıncında -253°C kadar soğutulması gerekmektedir (Özdemir ve Mutlubaş, 2019). Fakat soğutma işleminde harcanan enerji miktarı hidrojenden sağlanacak enerjinin ¼'ü kadardır (Erdener vd., 2010, s.41) Bu yüzden sıvılaştırılmış hidrojenin maliyeti artmakta ve verimi düşmektedir.

Fakat sıvılaştırma için harcanan enerji miktarı yüksek miktarda olsa bile uzay araçları ve roketlerdeki sıvılaştırma maliyetleri göz ardı edilmektedir. Sıvılaştırılmış hidrojen büyük tanklarda depolanmışsa günlük %0,06'sı, küçük tanklarda depolanmış ise günlük %3'ü buharlaşmaktadır. Buharlaşmanın önlenmesi ise tankın yalıtımına bağlıdır (Kaya vd., 2017, s. 63).

Hidrojenin sıvı halde depolanması, gaz haline göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir bu yüzden yöntem kendisini daha çekici kılmaktadır. Günümüzde sıvılaştırılmış hidrojen dolun istasyonları bulunmaktadır. Ayrıca sıvı hidrojen, maliyetin gözetilmediği NASA programlarında da kullanılmaktadır (Kılınç, 2008, s. 25).



Şekil 20: NASA'nın Florida'da bulunan Kennedy Uzay Merkezindeki sıvı hidrojen tankı

Kaynak: URL 19

Karbon nanotüpler ile depolamada hidrojen basınç altına alınarak, grafit yüzeyinde depolanır. Uygulamanın yapılabilmesi için soğuk veya oda sıcaklığı ortamı olması gerekmektedir (Özdemir ve Mutlubaş, 2019, s.30).

Metalhidritler ile depolama sisteminde, hidrojen granüler metallerin arasında boşluğa hapsedilerek depolanır. Kullanım aşamasında ısıtma ile hidrojen açığa çıkar. Metal hidrürler güvenilir ve az miktarda yer kaplayan sistemlerdir, fakat kütlece ağır ve pahalıdır (Erdener vd., 2010, s. 42).

Gaz formunda istasyonlara teslim edilen hidrojen için ortalama depolanması 180 kg/gün, ekipman, tasarım, inşaat ve istasyonu devreye alma dahil olmak üzere toplam maliyet 2 milyon dolar olarak belirtilmektedir. Sıvı formda istasyonlara teslim edilen hidrojenin depolanması ise 350 kg/gün ve tahmini devreye alma maliyeti ise tahmini 2,8 milyon olarak hesaplanmıştır. Suyun elektrolizi ile yerinde üretim koşullarında üretilen istasyonlar için ortalama depolanması ise 120 kg/gün ve tahmini toplam inşaat ve devreye sokma maliyeti 3,2 milyon dolardır (CAFCP, 2020).

2.2.3.Hidrojenin Taşınması

Hidrojen üretildiği bölgeden, tüketim bölgelerine taşınması gerekmektedir. Boru hatları, deniz-kara-demir yolları ile taşınıp tüketicinin kullanımına sunulabilmektedir. Hidrojenin yoğunluğunun düşük olmasından dolayı depolamada olduğu gibi hidrojenin taşınmasında da maliyet sorunları vardır.

Hidrojenin boru hatları ile taşınması, orta mesafeler ile uzak mesafeler için uygundur. Boru hatları yüksek miktarlarda başlangıç yatırımları gerektirse de yüksek hacimli hidrojen taşınması yapılmaktadır.

Boru hatlarının yüksek basınç ve boru hattındaki kullanılan malzemenin gevrekleşmesine (gevrekleşmenin kaynağı hidrojenle bulunan hidrojen sülfürdür) karşı önlemler alınması gerektiğinden maliyet artmaktadır. Doğalgaz boru hatları ile karşılaştırıldığında aynı enerjiyi elde edebilmek için daha büyük çaptaki boru hatları gerekmektedir (Kılınç, 2008, s. 29).

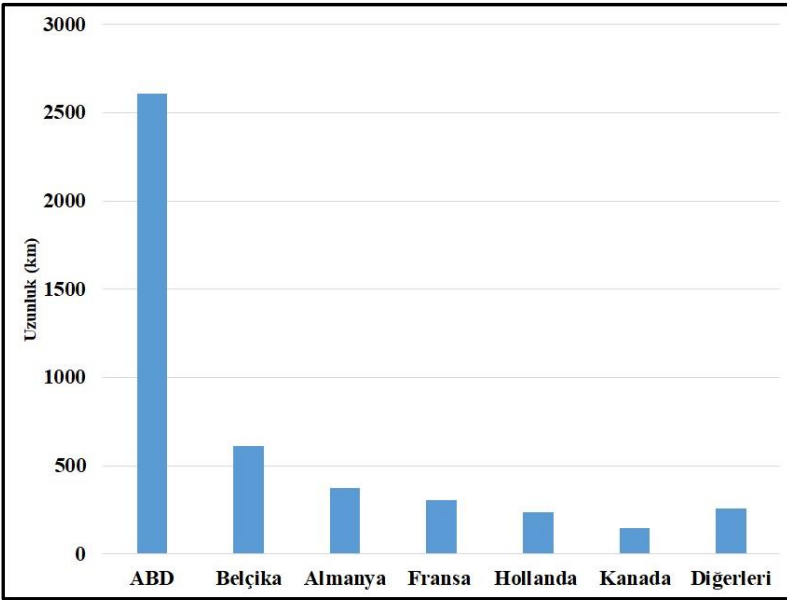
Hidrojenin çelik boru hatlarını çatlatmasından dolayı yeni alternatifler ortaya çıkmaya başlamıştır. Fiber (elyaf) takviyeli polimer (FRP) ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemeli borular ile çatlamalara karşı yüksek oranda önlem sağlanması öngörülmektedir. Ayrıca FRP boru hatlarının montaj maliyetleri çelik boru hatlarına göre %20 daha azdır (URL 20).

Mevcut durumda kullanılan doğalgaz boru hatları ile birkaç modifikasyon sonucu hidrojen taşınabilmektedir. Ülkemizde ve dünyada bazı bölgelerde doğalgaza %20 (maksimum) oranında hidrojen enjekte edilme çalışmaları yapılmaktadır. Bu sayede fosil yakıtlar içerisinde en az karbon salınımına sahip olan doğalgaz, hidrojen enjeksiyonu sayesinde karbon salınımı biraz daha düşecektir.

	Durum	Maksimum Basınç Bar	Boyut (Çap) mm	Maliyet \$/tkm
Çelik	İletim	103	200	0.82
FRP	İletim	103	3 x 150	0.61
PE	Dağıtım	20	150	2,58

Şekil 21: Hidrojen boru hattı malzemeleri maliyet ve işletme basınç tablosu
Kaynak: CSIRO, 2018, s. 34

Küresel düzeyde çoğunluğu hidrojen üreticileri tarafından işletilen 4500 km uzunluğunda hidrojen boru hattı bulunmaktadır. ABD’de Louisiana ve Teksas arasında 2608 km uzunluğunda olan hidrojen boru hattı, dünyanın en uzun hidrojen boru hattıdır. Şekil 21’de dünya üzerinde bulunan hidrojen boru hattı uzunlukları verilmiştir (Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 39).



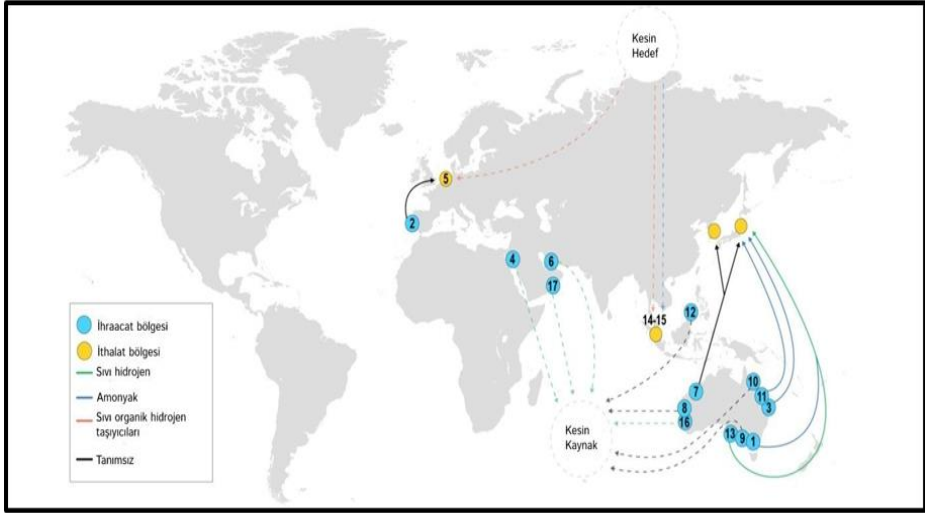
Şekil 22: Dünya genelinde bulunan hidrojen boru hatları

Kaynak: URL 21

2020 yılında yayınlanan “Avrupa’nın Hidrojen Omurgası” raporuna göre 2020 yılının ortasından itibaren 2030 yılına kadar mevcut boru hatları modifikasyonları ile 6800 km’lik bir boru hattı inşa edilmesi, 2040 yılında ise %75’lik kısmı mevcut boru hatları modifikasyonları %25’lik kısmı yeni

hidrojen boru hattı inşaları ile hidrojen boru hattının 23.000 km'lik uzunluğa çıkarılması planlanmaktadır (Wang vd., 2020, s. IV).

Deniz yolu ile yük taşımacılığı uluslararası ticarete istisnasız en verimli yöntemdir. Yüksek düzeyde ağırlık ve uzun mesafeler açısından demiryollarından %30, ağır yük kamyonlarından ise %90 daha az enerji harcamaktadır (IRENA, 2020c). Sıvılaştırılmış hidrojen gemilere yüklenip uzak bölgelerdeki tüketim pazarlarına ulaşımı sağlanabilir. Uzun mesafelerde taşınacağı için izolasyonu daha iyi yapılması gerekmektedir.

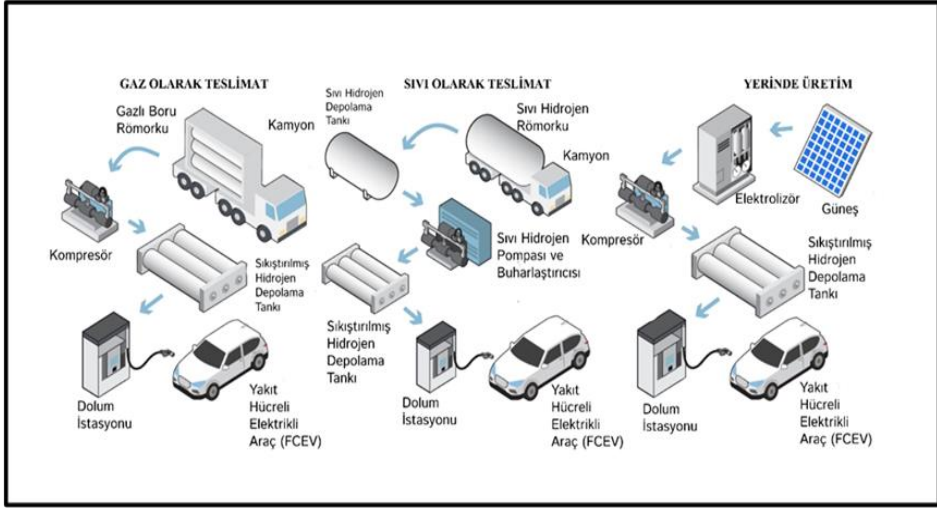


Harita 5: Hidrojenin deniz yolu ile taşınması için planlanmakta olan ticaret rotaları
Kaynak: IEA, 2021b, s. 159

Japonya 2019'da Dünyanın ilk sıvılaştırılmış hidrojen kargo gemisini üretmiştir. Kawasaki Heavy Industries, Ltd. tarafından üretilen gemiye “*Suiso Frontier*” adı verilmiştir. Güney Avustralya'da, Viktorya'da bulunan Hasting Limanında kömürün (linyit) gazlaştırılması ile bir hidrojen üretim tesisi prototipi kurulmuştur. Avustralya'da üretilen hidrojeni Japonya'ya taşıyacak olan gemi için Kobe yakınlarında boşaltma tesisi de inşa edilmektedir (URL 22). Covid-19 nedeni ile ilk sevkiyatını Mart 2022'de yapılması planlanmaktadır (URL 23).

Hidrojenin deniz yolu ile taşınmasının diğer bir yolu ise, hidrojeni amonyak gibi başka bir moleküle çevirmekten geçmektedir. Amonyak uluslararası olarak ticareti yapılan bir üründür, fakat amonyak zehirli bir

kimyasal olduğundan dolayı güvenlik sorunu çıkarmaktadır (IEA, 2021b, s. 155). Karayolu ile taşımada, hidrojen hem sıvı hem de gaz hali ile taşınabilmektedir. Gaz haldeki hidrojen tırların çektiği römorklar üzerine konulan uzun silindirik borular ile taşınması sağlanmaktadır. Sıvı haldeki hidrojen ise tankerler ile taşınmaktadır.



Şekil 23: Hidrojenin gaz, sıvı ve yerinde üretimde teslimat biçimleri

Kaynak: CAFCP, 2020

2.3.Hidrojenin Renkleri

Dünyadaki karbon emisyonlarının düşmesi için sanayi, ulaşım ve elektrik sektörlerinin karbondan ayrılması gerekmektedir bunun için de hidrojenin temiz kaynaklardan üretilmesi şarttır. Hidrojen üretim kaynaklarına göre kahverengi/siyah, gri, mavi ve yeşil olarak renk kodlarına ayrılmıştır.

Hidrojen üretiminin en eski yöntemlerinden biri olan kömürün gazlaştırması yöntemi kahverengi/siyah renk koduna aittir. En fazla emisyon salınımına sahip olan bu yöntem küresel hidrojen üretiminde önemli bir oranda yer almaktadır. Kullanılan kömür tipine bağlı olarak kahverengi (linyit) ve siyah (bitümlü kömür) olarak bilinir (URL 24).

Gri hidrojen doğalgaz reformasyonu ile oluşmaktadır mavi hidrojendeki gibi karbon yakalama ve depolama teknolojileri kullanılmamaktadır. Bundan dolayı çıkan emisyonlar direkt olarak atmosfere salınmaktadır.

Mavi hidrojen, hidrojenin doğalgazın buhar reformasyonu ile ortaya çıkar. Küresel çapta üretilen hidrojenin dörtte üçü bu yöntem ile üretilmektedir. Bu üretim süreci karbon salınımına yol açmaktadır. Fakat karbon yakalama ve depolama teknolojileri ile atmosfere büyük oranda salınmadan depolanmaktadır. Karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin verimliliğinin en yüksek ihtimalle %85-90 oranına çıkması beklenmektedir, geriye kalan %10-15'lik yine atmosfere salınmak zorunda kalacaktır. Bu yüzden mavi hidrojen karbon yakalama ve depolama teknolojileri ile emisyonlar azaltılabilir ancak sıfır emisyon isteğini karşılamamaktadır (IRENA, 2020a).

Yenilenebilir kaynaklar ile üretilen hidrojene yeşil hidrojen adı verilmektedir. Tamamen sürdürülebilir ve emisyonuz bir enerjiye geçişin anahtarıdır. Yeşil hidrojen üretmek için en çok kullanılan teknoloji suyun elektrolizidir. Suya elektrik verilerek bileşiklerine ayrılmaktadır. Burada önemli olan kısım ise kullanılan elektriğin güneş, rüzgâr vb. yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilmesidir.

2.4.Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri “Fuelcell” hidrojen içerisinde olan kimyasal enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Batarya teknolojisinin aksine depolanan kimyasal enerji yerine, çalışma anında da kimyasal enerji ile beslenerek şarj etme ihtiyacı duymamaktadır. Elektrik enerjisinin sürekliliğinin sağlanması için yakıt eklenmesi gerekmektedir. Yakıt eklendiği sürece jeneratörler gibi sürekli elektrik enerjisi üretme kabiliyetine sahiptir (Erdener vd., 2010, s.49).

Yakıt için ise fosil kaynaklar ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen kullanılmaktadır. Hidrojen dışında metanol, etanol, doğalgaz ve LPG gibi ürünlerde kullanılmaktadır. Fakat hem salınan emisyonlar hem de hidrojenin yakıt pilindeki yüksek verimliliğinden dolayı hidrojen öne çıkan bir seçenektir (Kaya vd., 2017, s.99). Hidrojen ile çalışan yakıt pilleri çevreye atık olarak su ve su buharı salınır.

Yakıt pilleri hidrojen ile kullanıldığında verimli, sessiz ve çevreye zararsız teknolojilerdir. Gelecek yıllarda elektriğin kullanıldığı her alanda yakıt pili teknolojisinin yer alması muhtemeldir.

Yakıt hücresi teknolojik olarak çok çeşitli ve karmaşıktır fakat araçlar için en yaygın ve gelecek için en umut verici teknoloji, proton değişimli membranlı (PEM) cihazlardır (Montgomery, 2014, s. 297). PEM yakıt hücreleri diğer yakıt hücrelerine kıyasla yüksek güç yoğunluğu ve düşük ağırlık ve hacim açısından avantajlıdır. 60-80°C gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta çalışmaktadır. Bu özelliği ile ulaşım için uygundur. Çalışması için hidrojen, havada bulunan oksijen ve bir miktar suya ihtiyaç duyarlar. Hidrojeni elektronlarına ayırmak için metal bir katalizör kullanılması gerekmektedir, katalizörde kullanılan metal ise platindir, dünyada platin rezervlerinin az olmasından ve pahalı olmasından dolayı maliyeti arttırmaktadır (URL 20).

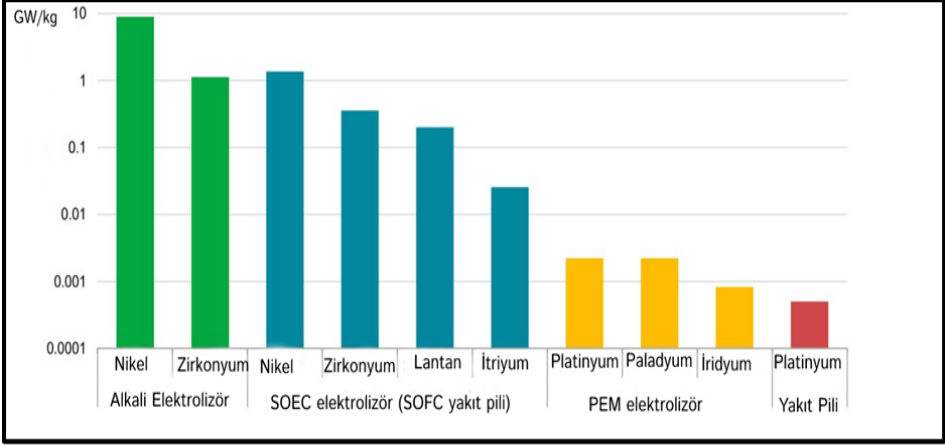


Şekil 24: Dünya platin rezervleri

Kaynak: Statista, 2021

Otomotiv sektöründe kullanılan yakıt pillerinin maliyeti 2008 yılından bu yana %70 oranında düşüş göstermiştir. 2020 yılında 80-kwnet PEM yakıt pilinin tahmini maliyeti, yılda 100.000 adet üretildiğinde ve 8000 saatlik kullanım ömrünü karşıladığında 76 \$/kW olması beklenmektedir (U.S. Department of Energy, 2021). Ancak FCEV'lerin (fuelcell electric vehicle/yakıt hücreli elektrikli araç) içten yanmalı motorlu araçlar ve diğer sıfır emisyonlu araçlar ile rekabet edebilmesi için yakıt hücreleri maliyeti

daha da azaltılmalıdır. 2008’den bu yana yakıt pillerindeki maliyeti düşürmek için katalizörde kullanılan platin oranı %30 düşürülmüştür (IEA, 2021b, s. 83)



Şekil 25: Günümüzde elektrolizörler ve yakıt pillerinde kullanılan madenlerin tahmini talebi

Kaynak: IEA, 2021

Daha önce de belirtildiği gibi dünyadaki platin rezervinin büyük oranı Güney Afrika’da bulunmaktadır coğrafi dağılışı olarak tek bir bölgede yayılmasından dolayı tedarik zincirinde riskler barındırmaktadır. Yakıt pillerindeki platin oranının azaltılması da tedarik zincirindeki riskleri azaltmış olacaktır.

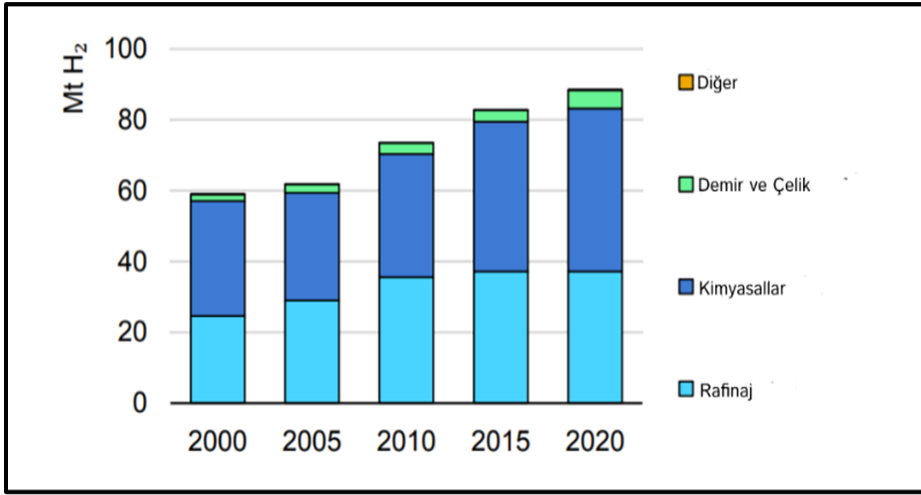
2014 yılında piyasaya çıkan Toyota’nın FCEV ilk nesil Mirai model otomobilinin 2008 yılındaki prototipinden kw çıkış başına yaklaşık dörtte üçünden az olmak üzere 40 g platin kullanılmıştır. 2020 yılında piyasaya sürülen ikinci nesil Mirai ile kw başına üçte bir oranında azaltmıştır. 2040 yılındaki hedef ise araç başına 5g düşürmektir (IEA, 2021c, s. 115). Yapılan teknolojik gelişmeler ile hedeflere ulaşıldığında maliyetler düşecek ve fosil yakıtlar ile kullanılan içten yanmalı motorlar karşı sıfır emisyonlu FCEV araçlar yaygınlaşacaktır.

2.5.Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi Uygulamaları

Hidrojen ve hidrojen enerjisi esas olarak rafınajda, endüstride (amonyak metanol, demir-çelik, çimento), ulaşım sektöründe içten yanmalı

motorlara yakıt olarak, yakıt hücreli araçlara yakıt olarak ve evlerin ısıtılmasında kullanılmaktadır.

Kullanılan hidrojenin neredeyse tamamı fosil yakıtlardan üretilmektedir. Hidrojenin bu kadar çeşitli alanda kullanımı, küresel ekonomiyi ve günlük hayatımızı desteklemektedir. Hidrojenin gelecekteki talebin artması için, gıda üretimi için gübre, nakliye sektöründe rafine yakıtlar ve inşaat sektöründe inşaat malzemesi olarak aşağı, yönlü ürünlere talebin artması ile olacaktır (IEA, 2019, s. 89).



Şekil 26: 2000-2020 yılları arası hidrojen tüketiminin sektörel dağılımı

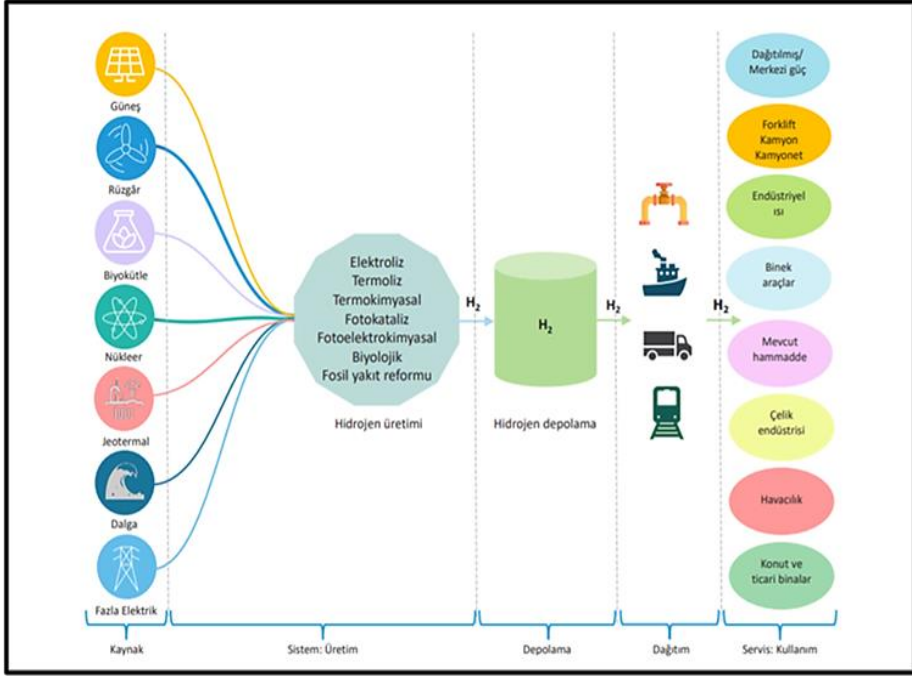
Kaynak: IEA, 2021b, s. 43

Benzin ve dizel yakıtlarından kükürt oranının en aza indirilmesi amacı ile ham petrole rafineri¹⁰ işlemi yapılmaktadır. Bu işlemde yakıttan kükürt'ün arındırılması için hidrojen kullanılmaktadır. Uluslararası alanda benzin ve dizeldeki kükürt içeriği düzenlemelerinin katı hale gelmesi ile rafineri işleminde hidrojen kullanımı artmıştır. (EIA, 2016; IEA, 2021b).

2020 yılında rafineri sektörü 40 mt yakın hidrojen tüketmiştir. Çin rafinaj için hidrojen tüketiminde en yüksek paya sahip ülkedir (9 mt H₂/yıl), Çin'in arkasından izleyen ülke ise 7 mt H₂/yıl ile ABD'dir, en çok tüketimi yapan üçüncü ülke 4 mt H₂/yıl ile Orta Doğu ülkeleridir (IEA, 2021b).

¹⁰ Ham petrolün çeşitli işlemlerden geçirek satılabilir ürünlere (nafta, benzin, dizel yakıtı, asfalt, kerosen, LPG ve fuel oil vb.) dönüştürülen endüstriyel işlem tesisidir.

Rafineri işleminde kullanılacak hidrojen genellikle fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Kullanılacak hidrojen yenilenebilir kaynaklardan elde edilse bile petrol emisyon yayan bir yakıt olduğundan iklim hedefleriyle uyumlu olmayacaktır.



Şekil 27: Hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanım alanları

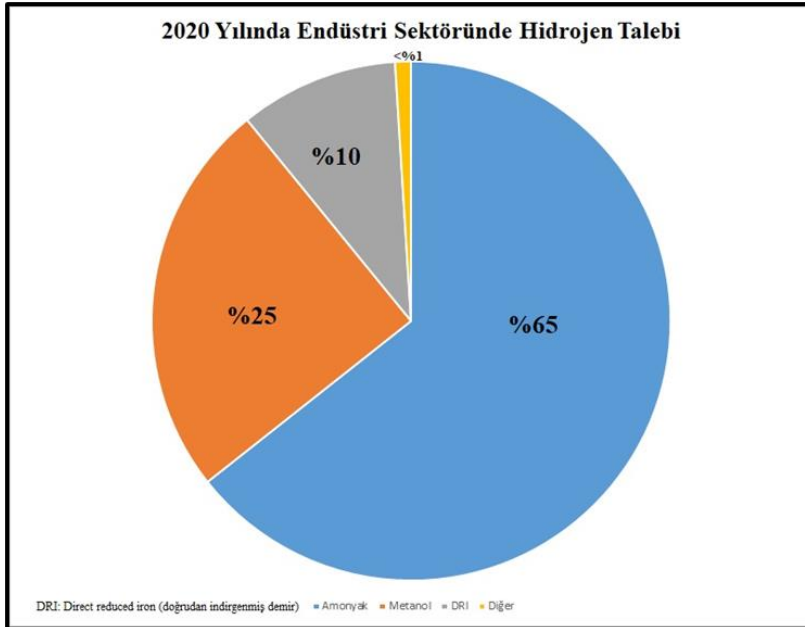
Kaynak: Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021, s. 41

2020 yılında 46 mt hidrojen talebi ile kimya endüstrisi hidrojen kullanımının büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Kullanılan hidrojen daha çok amonyak ve metanol üretiminde kullanılmaktadır.

Dünyadaki amonyak üretiminin yaklaşık %80'i tarımda sentetik gübre olarak kullanılmaktadır, amonyak oluşturmak için ise hidrojene ihtiyaç vardır. Gıda sektörü için büyük önem taşımakta olan amonyak, kimya sektöründe en büyük hidrojen tüketicisidir. Amonyak aynı zamanda mevcut altyapı tarafından taşınabilen ve hidrojen depolama kapasitesine sahip hidrojen taşıyıcısıdır (Alberta, 2021, s. 33). 2020 yılında hem gübre hem de endüstriye uygulamalar için küresel amonyak üretimi 185 mt'dur. Amonyak üretiminin

neredeysi tamamı fosil kaynaklardan üretilmektedir, %70'inden fazlası doğal gazın buhar reformasyonu ile üretilmektedir, geri kalanı ise kömürün gazlaştırılması ile elde edilir (IEA, 2021a). 1 ton amonyak üretmek için hammadde olarak 180 kg hidrojen gereklidir, 2020 yılında üretilen 185 mt amonyak için 33 mt hidrojen kullanılmıştır. Bu talep endüstri sektöründe hidrojen tüketiminin %65'lik kısmını oluşturmaktadır (IEA, 2021b).

Endüstrideki hidrojen tüketiminde ikinci sırada metanol yer almaktadır. Metanolün üçte ikisi polidehit, asetik asit ve plastikleri üretmeye kullanılmaktadır. Geriye kalan metanol, araçlar, gemiler, endüstriyel kazanlar ve yemek pişirmek için yakıt olarak kullanılmaktadır. Metanol, karbonmonoksit ve hidrojenin yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında üretilmektedir. Daha çok kömür ve doğalgaz kullanılarak üretilir. Küresel çapta metanol üretimi 2001 yılında 40 mt'a az iken 2019 yılında 98 mt'a çıkmıştır. Bu yükselişin büyük kısmı Çin'de kömürden üretilen metanol ile gelmiştir (IRENA, 2021, s. 12).

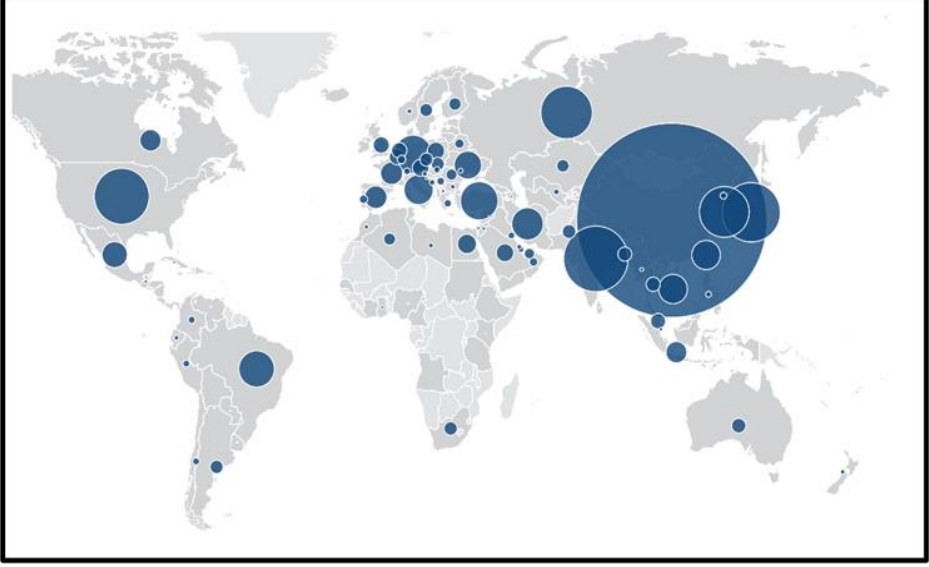


Şekil 28: 2020 yılında endüstri sektöründe hidrojen talebi

Kaynak: IEA, 2021b, s. 55

Modern dünyada demir ve çelik önemli bir hammaddedir. Özellikle inşaat, ulaşım, enerji ve daha fazla sektörde kullanımı oldukça yaygındır.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde demir çelik sektörü diğer sektörlerle öncülük yapmaktadır. Çünkü demir-çelik sektörü diğer sektörlerle temel girdi oluşturmaktadır.



Harita 6: 2021 yılı dünya toplam ham çelik üretimi
Kaynak: URL 25

Gelişen teknoloji ile artan sosyal ve ekonomik refah ihtiyaçlarını karşılamak amacı ile küresel anlamda çeliğe yönelik talebin artması tahmin edilmektedir. Demir-çelik sektörü günümüzde dünya enerji talebinin %8'lik bir paya sahiptir. Küresel çelik üretiminde %70 oranında kömür kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'si demir-çelik üretiminde yayılmaktadır.

Dünya Çelik Birliğinin verilerine göre 2021 yılı içerisinde 1.950.535 ton ham çelik üretimi yapılmıştır. Çin 1.032.790 ton üretim ile birinci sıraya yerleşmiştir. İkinci sırada 118.134 ton ile Hindistan, üçüncü ise 96.334 ton ile Japonya'dır. Çelik tüketiminde ise ham çelik üretiminde olduğu gibi gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler üst sıralardadır.

Çeliği ortaya çıkartabilmek için başlıca üç ana şeye ihtiyaç vardır: çok yüksek bir ısı, demir cevherini demire dönüştürmek amacıyla oksijenin uzaklaştırılması için ajan ve demiri çeliğe dönüştürmek için karbon kullanılır (URL 26). Yüksek ısı kaynağı olarak çoğunlukla kömür kullanılmaktadır.

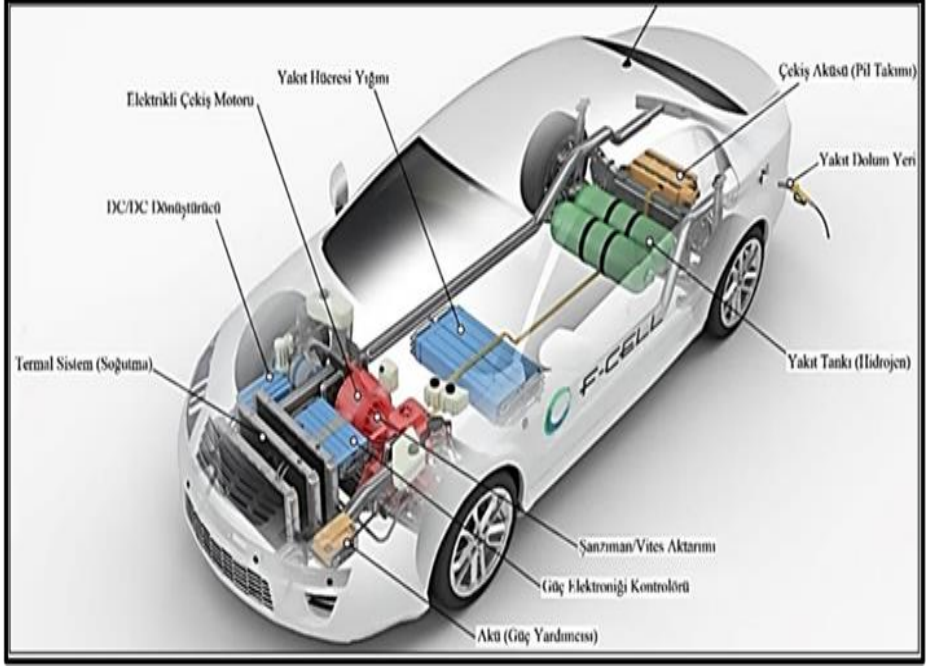
Yukarıda bahsedildiği gibi atmosfere salınan emisyonların %7'si demir-çelik üretiminde salınmaktadır. Hidrojen ise bu aşamada devreye girmektedir, temiz teknolojiler ile üretilen hidrojen gazı ile yüksek ısılar elde edilip neredeyse sıfır emisyon salınımı yapılması planlanmaktadır. Bu yöntem sayesinde demir-çelik sektörü dekarbonizasyona dahil olacaktır.

Demir cevherinin ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa indirgenmesi ile üretilen demire Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI-Direct reduced iron ismi) veya Sünger Demir adı verilmektedir (Dinç, 2005, s. 1). Ayrıca hidrojen, demir-çelik üretiminde bir indirgeyici ajan olarak da kullanılmaktadır.

Ulaşım, insanlığın ortaya çıktığı ilk günden bu yana en önemli faaliyetlerinden birisi olmuştur. Ulaşım faaliyeti, insanların bir amaç doğrultusunda (ticaret, iş, turizm, eğitim vb.) bir bölgeden başka bir bölgeye erişmesini sağlamıştır bu da ulaşımın yaşamsal bir faaliyet olarak doğmasına yol açmıştır. M.Ö. 3500 yıllarında Sümerler'in icat etmiş olduğu tekerlek ile ulaşım faaliyeti farklı bir yöne doğru evrilmiştir. 20. yüzyıl ortalarında ise havayolunun sivil hizmete başlaması ile ulaşım ve ulaştırma faaliyetleri daha hızlı olmaya başlamıştır (Aydın ve Oral, 2018, s. 258). IEA'nın 2020 yılında yayınlamış olduğu rapora göre 2018 yılında küresel enerjinin tüketiminin %29'u ulaşım sektörü tarafından kullanılmıştır (IEA, 2020, s. 15). Ayrıca, ulaşım sektörü CO₂ emisyonlarının %37'sini oluşturmaktadır. 2020 yılında Covid-19 karantina önlemleri sonucu, karantina uygulanan bölgelerde petrole talepte düşüş yaşanmıştır.

Küresel enerji tüketiminin %29'luk kısmını oluşturan ulaşım sektörü enerji güvenliği ve çevrenin korunması açısından tehlike arz etmektedir. Bundan dolayı hidrojen ile çalışan hidrojen yakıtlı araçlar öne çıkmaktadır. 2-3 dakikalık dolun süresi ile uzun mesafeler kat edebilen FCEV'ler ulaşım sektörü için umut olmaktadır. Yakıt hücreli araçlar hiçbir egzoz emisyonu üretmezler bunun yerine su buharı üretirler bu sayede atmosfere emisyon salınımı azaltılacaktır. Yakıt hücresi aracılığı ile hidrojen bir elektrik motoruna güç sağlamak için elektriğe dönüştürülür. Burada kullanılan hidrojenin hangi kaynaklar ile üretildiği önem taşımaktadır. Günümüzde üretilen hidrojenin %90'ı doğalgaz ile üretilmektedir, FCEV'lerin kullanımında dolaylıda olsa salınan emisyonlara katkı sağlayacağı

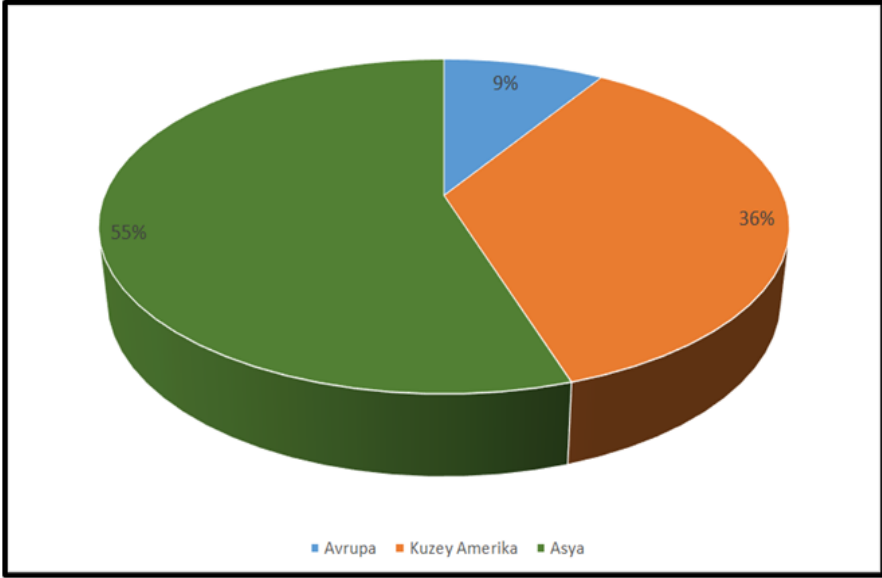
düşünülmektedir. Yenilenebilir kaynaklar ile üretilen hidrojenin emisyonlar üzerinde büyük bir etkisi olacaktır.



Şekil 29: Hidrojen yakıtlı bir aracın (FCEV) çalışma prensibi

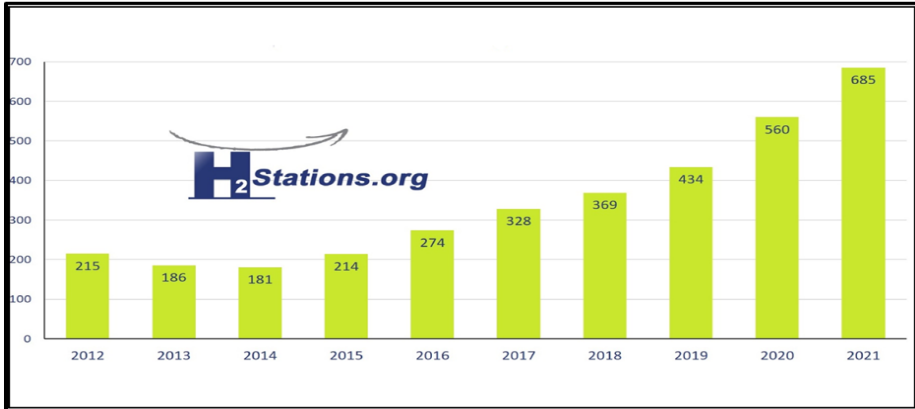
Kaynak: URL 27

Hidrojen yakıtlı araçların sayısı dünyada gün geçtikçe artmaktadır. 2020 yılı sonu itibarıyla dünyada 34.804 FCEV bulunmaktadır. Bu araçların 25.932'si binek otomobillerdir, geriye kalanlar ise; 5648 otobüs, 3161 kamyon, 49 ticari araç ve 14 adet tır şeklindedir (Samsun vd., 2021). IEA raporuna göre Haziran 2021 itibarı ile yaklaşık 40.000 adet üzerinde FCEV bulunmaktadır (URL 28). FCEV'lerin coğrafi olarak dağılımında Asya kıtası ön plana çıkmaktadır en fazla FCEV bulunan ülke ise Güney Kore'dir. Ayrıca FCEV'lerin tüketiciler tarafından ilgi görmesi için sadece binek otomobiller değil kamyon, otobüs, forklift, tren gibi araçların da üretimi artması gerekmektedir. Ürün çeşitliliği arttıkça FCEV'lere olan ilgi de artacaktır.



Şekil 30: Kullanımda olan FCEV'lerin kıtasal dağılımı
Kaynak: Samsun vd., 2021

Hidrojen yakıtlı araçların dünyada ilgi görmesi için önemli bir husus bulunmaktadır o da hidrojen yakıt istasyonlarıdır. Sürücülerin gittikleri bölgelerde rahatça yakıt ikmali yapmaları amacı ile dünyanın çeşitli yerlerinde hidrojen yakıt istasyonları kurulmaktadır. 2012 yılında H₂ Stations verilerine göre 215 adet hidrojen yakıt istasyonu bulunmaktaydı, 2021 itibarıyla istasyon sayısı 685'e çıkmıştır. İstasyon sayıları tüketicilerin FCEV'lere olan ilgisi ile artacaktır.



Şekil 31: Yıllara göre hidrojen yakıt istasyonu sayısı
Kaynak: URL 29

Harita 7'ye bakıldığında küresel ölçekte hidrojen yakıt istasyonlarının en fazla bulunduğu coğrafyalar; Japonya, Güney Kore, ABD ve Avrupa'da özellikle Almanya'dır. Kıtasal olarak coğrafi dağılıma bakıldığında FCEV sayıları ile doğru orantılı olarak Asya kıtası istasyon sayısında önde gelmektedir.



Harita 7: Dünya Çapında Hidrojen Yakıt Dolum İstasyonlarının Dağılışı

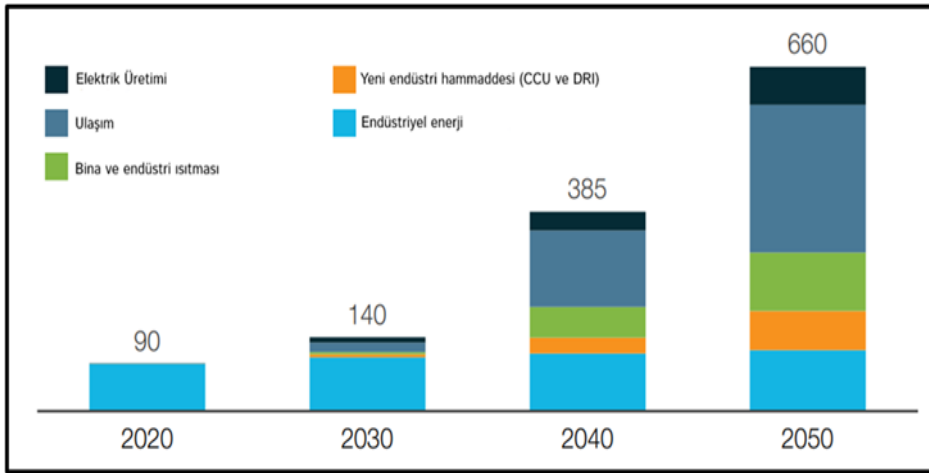
Kaynak: URL 29

2021 verilerine göre en fazla hidrojen yakıt istasyonuna sahip ülke Japonya'dır (195) onu arkasından Çin (105) ve Almanya (101) ve en fazla FCEV'e sahip olan Kore (95) takip etmektedir. Çin'de bulunan istasyonların çoğunluğu otobüs ve kamyon yakıt ikmali için kullanılmaktadır. Kuzey Amerika'da bulunan 86 istasyonun büyük bir kısmı (60) Kaliforniya eyaletinde bulunmaktadır. ABD'nin yüzölçümü ve FCEV'lerin menzil mesafelerinden dolayı daha orta ve doğu kesimlerde yeni yakıt ikmal noktaları açması gerekmektedir. Kanada'da ise yakıt istasyonları Quebec ve Vancouver'de bulunmaktadır. Bu bölgelerde kümelenmesinin sebeplerinden birisi ise dünyanın en büyük ikinci PEM elektrolizörü ile üretilen hidrojen tesisinin Quebec eyaletinde bulunmasındandır.

2.6.Dünya Enerji Politikalarında Hidrojen Enerjisi

Günümüz dünyasında artan enerji ihtiyacı, atmosfere salınan emisyon oranını azaltma isteği, enerji arz güvenliği, ekonomik olarak büyüme isteği olan ülkeler fosil yakıtlar harici alternatif kaynaklara yönelmektedir. Bu amaç doğrultusunda hidrojen önemli bir kaynak olarak ön plana çıkmaktadır.

Yenilenebilir kaynaklar içerisinde en fazla yatırım yapılan kaynaklar güneş ve rüzgâr enerjileridir, en az yatırım alan kaynak ise hidrojendir. Fakat küresel enerji politikalarında hidrojene büyük önem verilmektedir. Hidrojenin kullanım alanları ve geçmiş yıllara göre artan kullanım miktarına bakıldığında gelecek için umut vermektedir. Hükümetlerin oluşturduğu politikalara göre, 2020 yılında dünya çapında 90 milyon ton hidrojen üretimi yapılmıştır 2050 yılı için bu oranı 660 milyon tona çıkarılması hedeflenmiştir (Şekil 32).



Şekil 32: Küresel Hidrojen Talebinin 2020-2050 Yılları Arasındaki Durumu

Kaynak: Hydrogen Council, 2021, s.13

Küresel enerji politikalarında hidrojenin önemi 2017 yılından itibaren yer almaya başlamıştır. 2017 yılında Japonya “Temel Hidrojen Stratejisini” yayınladı. Bunun ardından 2019 yılında Çin, Güney Kore, Fransa gibi birkaç ülkede hidrojen stratejilerini yayınlamaya başladı. Yine 2019 yılında Avustralya’nın yayınlamış olduğu “Ulusal Hidrojen Stratejisi”, ülkenin 2030 yılına kadar hidrojen endüstrisinde ön plana çıkmayı amaçlamaktadır.

2020 yılında Kanada, Şili, Fransa, Almanya, Norveç, Portekiz, Hollanda, Rusya, İspanya ve Avrupa Birliği hidrojenin geleceği için stratejiler

belirlemişlerdir. 2021 yılında ise Hindistan, Çek Cumhuriyeti, Kolombiya, Macaristan ve Birleşik Krallık hidrojen stratejisi geliştirmiştir. 20'ye yakın ülkede ulusal hidrojen stratejilerini geliştirmektedir (URL 28).



Harita 8: Hidrojen stratejisini açıklayan ülkeler

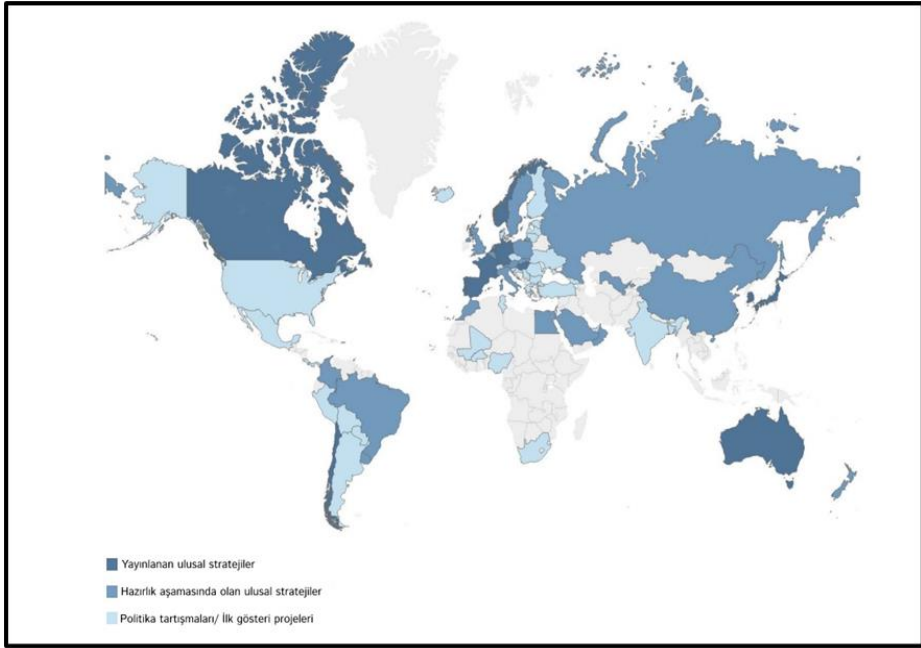
Kaynak: IRENA , 2022, s. 39

Japonya ve Güney Kore gelişmiş teknolojilerine karşın doğal kaynaklar bakımından sınırlı coğrafyalardır. Bu nedenle 2017 yılında dünyanın ilk hidrojen stratejisini belirleyen ülke Japonya olmuştur. Japonya'nın hedeflerinden bir tanesi 2030 yılına kadar hidrojen üretimini 3 milyon tona çıkarmaktır, 2050 yılına gelindiğinde ise 20 milyon ton hidrojen üretimi hedeflemişlerdir. Japonya enerji ihtiyacının %88'ini fosil kaynaklardan karşılamaktadır, net sıfır emisyon hedeflerinde ilerlemek isteyen Japonya bu çerçevede hidrojen üretiminde yenilenebilir kaynaklar ile üretmesi gerekmektedir. Fakat Japonya hidrojen üretiminde mavi hidrojeni ön plana çıkarmaktadır (URL 30).

Güney Kore 2019 yılında "Hydrogen Economy Roadmap Of Korea" adlı yayını yayınlayarak hidrojen stratejisinin ilk adımlarını atmaya başlamıştır. Bu stratejiye göre Kore, iklim hedeflerinden öncelikli olarak

ekonomik kalkınma ve istihdam yaratma amacı ile yola çıkmıştır (URL 31). Kore FCEV sayısında dünyada birinci sıradadır, ülkede yaklaşık 10.000 FCEV bulunmaktadır bu sayıyı 2025 yılında 200.000 çıkarmayı hedeflemektedir. 2040 yılında ise FCEV sayısını 6,2 milyon olarak hedeflemiştir, 3 milyonu ise yerli üretim olarak belirlenmiştir (MOEF, 2019 , s. 3-7)

Enerji sektöründe karbon kullanımını sıfıra indirmek amacı ile küresel çapta dönüşümler devam etmektedir. Avustralya'da 2019 yılında bu dönüşüme hizmet edecek şekilde bir hidrojen stratejisi belirledi. Avustralya 2030 yılına kadar hidrojen üretiminde ve ticari olarak satışında dünyada söz sahibi olmak istiyor. Güney Avustralya önemli yenilenebilir kaynaklara (rüzgâr, güneş) sahip olduğundan dolayı hidrojen üretimi açışında önemli olmaktadır (Australian Government, 2019).



Harita 9: Küresel anlamda hidrojen stratejisi geliştiren/geliştirmekte olan ülkelerin dağılımı

Kaynak: World Energy Council, 2021, s. 5

Avrupa Birliği (AB) hidrojen stratejisini 2020 yılında yayınlamıştır. AB üyelerinin hidrojen stratejisinde önceliği hidrojeni yenilenebilir kılmaktır ve temiz (yeşil) hidrojen lider olmayı hedeflemektedir. Hidrojen enerjisini 2019 yılında imzalamış oldukları Avrupa Yeşil Mutabakatına ulaşmak için bir anahtar olarak tanımlanmıştır. 2030 yılına kadar 40 GW yenilenebilir hidrojen elektroliz kapasitesine ulaşmayı hedeflemektedir. Bu elektroliz kapasitesine ulaşmak için güneş ve rüzgâr enerjisinden faydalanmayı istemektedirler. Elektroliz için 80-120 GW arasında güneş ve rüzgâr enerjisi kapasitesi kurulması da hedefler arasındadır (European Commission, 2020). IRENA 2021 yenilenebilir enerji kapasitelerine bakıldığında AB'nin toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin (hidroelektrik dahil) 511 GW olduğu görülmektedir. Bu rakamlara bakıldığında AB'nin hedeflerine ulaşması için yenilenebilir enerjiye olan yatırımın devasa boyutlara ulaşması gerekmektedir.

Avrupa kıtasında hidrojen uygulamaları ve stratejileri konusunda öne çıkan Almanya 2020 yılında “The National Hydrogen Strategy (NHS)” adlı hidrojen stratejisini yayınladı. NHS, 2030 yılına kadar enerji geçişinde büyük önem arz etmektedir ayrıca Paris İklim Anlaşması kapsamında 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada kilit rol oynamaktadır. Hidrojeni daha çok endüstri ve ulaşımda kullanmayı hedefleyen Almanya sürdürülebilir olması nedeni ile yeşil hidrojene odaklanmaktadır. Fakat karbon yakalama teknolojileri ile mavi hidrojenin de Avrupa’da pazar oluşturacağı düşüncesindedir.

Almanya 2030 yılına kadar 90-110 TWh hidrojen talebi olacağı tahmin edilmektedir. Bu talebi karşılamak amacı ile 5 GW’lık yeşil elektroliz tesisi inşa edilecektir 2040 yılına kadar ise 5 GW’lık bir elektroliz tesisi daha eklenecektir (The Federal Government, 2020, s. 2). Ayrıca Almanya Avrupa kıtasında hidrojen altyapısına en çok önem veren ülke konumundadır (101 hidrojen yakıt istasyonu bulunmaktadır).

Güney ucundan kuzey ucuna 4270 km uzunluğu olan, güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek, Güney Amerika ülkesi Şili 2020 yılında ulusal yeşil hidrojen stratejisini ilan etmiştir. 2025 yılına kadar 5 GW elektrolizör kapasitesine ulaşmayı hedefleyen Şili 2030 yılında ise bu kapasiteyi 25 GW yükseltmeyi hedeflemiştir. Bu yapılan uygulamalar ile 2030’a kadar dünyanın en ucuz yeşil hidrojenini üretmeyi hedeflemektedirler. 2040 yılına kadar ise

dünyanın ilk üç hidrojen yakıtı ihracatçısı konumunda olmayı hedeflemektedir (Gobierno de Chile, 2020, s. 19).

Elektrik ihtiyacının %67'sini yenilenebilir kaynaklardan üreten Kanada 2020 yılında hidrojen stratejisini açıklamıştır. Kanada özellikle hidroelektrik potansiyelinden dolayı elektrik üretilip bu elektrik ile yeşil hidrojen üretmeyi planlamaktadır. Bu sayede dünyanın ilk üç hidrojen ihracatçısı olarak konumlandırılmak istemektedir. (Government of Canada, 2020, s. 22).

Dünya doğalgaz ihracatında ve rezervinde birinci sırada yer alan Rusya 2020 yılında hidrojen stratejisini belirlemiştir. En büyük hidrokarbon üreticilerinde biri olan Rusya, dünyanın 2050 yılına kadar karbon salınımını sıfıra indirmek istemesinden dolayı küresel ekonomide risklerle karşı karşıya kalacaktır. Şu anda hidrojenin üretimi en fazla doğalgaz ile yapılmaktadır bu yüzden mavi hidrojen konusunda avantajlı olan Rusya kendisini küresel hidrojen ticareti konusunda doğalgazda olduğu gibi jeopolitik bir lider olarak görmek istemektedir.

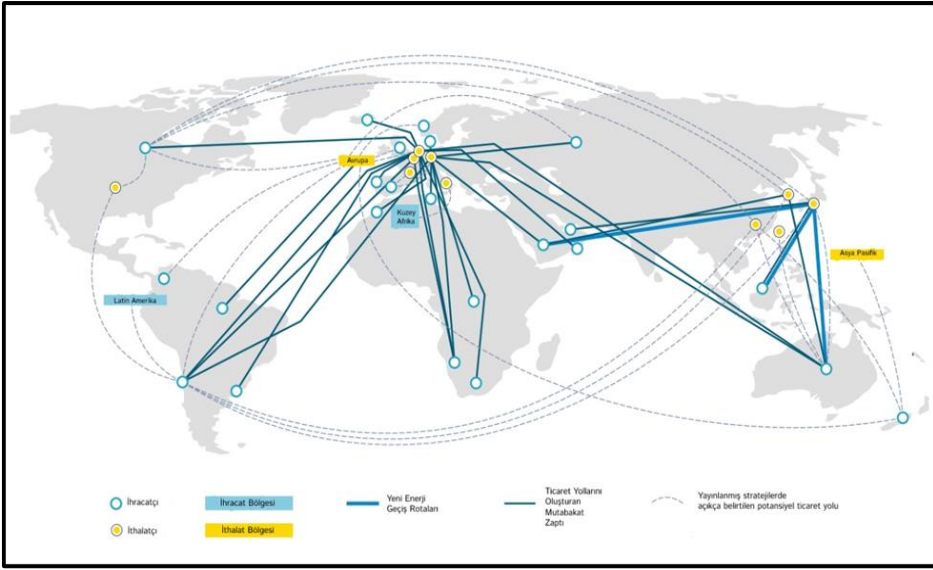
Rusya açıkladığı hedefler doğrultusunda 2030 yılına kadar küresel hidrojen pazarının %20'sini elinde bulundurmak istiyor. 2050 yılına kadar ise 15-50 mt/yıl hidrojen ihracatını hedeflemektedir (URL 32). Rusya ayrıca 215 TWh kurulu kapasitesi ile nükleer enerjiden de hidrojen üretimi yapmak için yararlanabilecektir.

2021 yılında hidrojen stratejisini benimseyen Birleşik Krallık 2050 yılında sıfır emisyon için hidrojeni fırsat olarak görmektedir. 2030 yılına kadar 5 GW'lık bir düşük karbonlu hidrojen üretim tesisi kurmayı planlamaktadır. 2023 yılına kadar doğalgaz şebekesine %20 oranında hidrojen karıştırmayı hedeflemektedir, bu pilot çalışmaların sayesinde 2025 yılına kadar bir hidrojen köyü kurulması planlanmıştır. Birleşik Krallık bulunduğu coğrafi konumdan dolayı hem hidrojenin ticareti hem de hidrojenin depolanması (Kuzey Denizinde boşalan hidrokarbon yataklarında hidrojen depolamayı planlamaktadır) konusunda avantajlara sahiptir (HM Government, 2021, s. 2-50).

Küresel anlamda birçok hükümet hidrokarbonlara alternatifler üretmektedirler bu alternatiflerden biri olan hidrojen birçok ülkenin ilgisini çekmiştir. Bu bağlamda, hükümetler enerji politikalarının doğrultusunda ulusal hidrojen stratejilerini açıklamıştır ya da hazırlık aşamasındadır.

Hidrojen, küresel anlamda ticareti yapılabilen emtia haline geldiğinde yatırımları üzerine çekecektir. Hidrokarbonlara sahip olan kaynak coğrafyalarında ekonomik ve jeopolitik kaygılar artacaktır. Enerji coğrafyalarında büyük değişimler olması muhtemeldir. Hidrokarbonlardan yoksun fakat güneş ve rüzgâr potansiyeli yüksek olan coğrafyalar, maliyet açısından mavi hidrojen ile rekabet edecek hale geldiğinde kaynak coğrafyasına dönüşecektir.

Hidrojen, hidrokarbon kaynaklara göre daha heterojen dağılıma sahip olduğundan dolayı dünyadaki ihracat/ithalatı da bu doğrultuda olacaktır. Dünyanın neredeyse tüm bölgelerinde hidrojen üretmenin mümkün olması, ihracatçı ülkelerin enerjiyi siyasi bir baskı haline dönüştürmesi de imkânsız kılınacaktır. Ayrıca petrol için geçiş bölgesi olan Hürmüz Boğazı ve doğalgaz geçiş noktası olan Ukrayna gibi bölgelerin üzerindeki siyasi baskılarda potansiyel olarak azalacaktır (Van de Graaf vd., 2020, s. 3).



Harita 10: Genişleyen tahmini hidrojen ticareti rotası

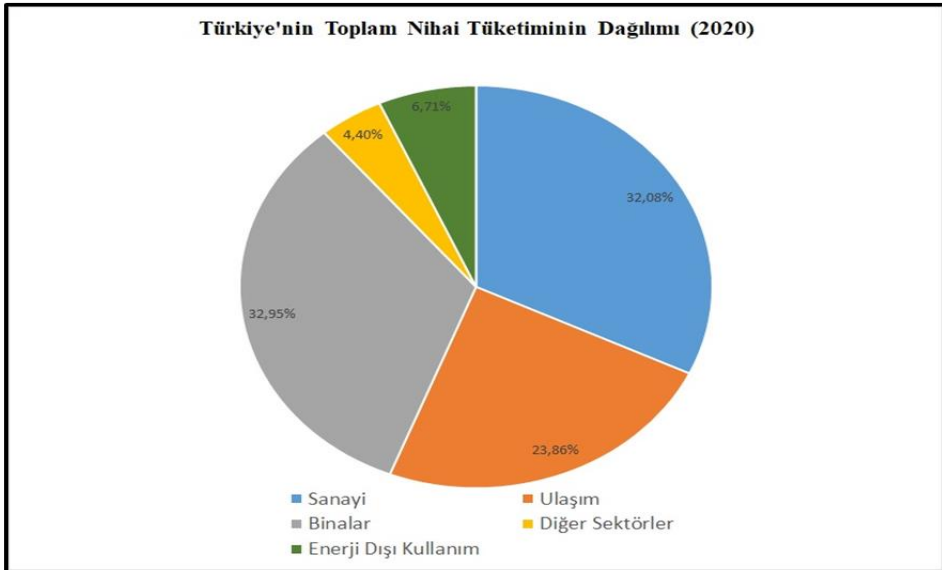
Kaynak: IRENA , 2022, s. 37

Harita 10'da görüldüğü üzere gelecekte küresel çapta hidrojen ekonomisi kurulduğunda devletler arasındaki ilişkilerde değişimler yaşanacaktır. Birçok ülkede yaşanacak olan bu değişimler küresel ekonomiyi değiştirme potansiyelindedir.

Enerjiye erişimde kısıtlı olan Afrika kıtasındaki bazı bölgeler potansiyellerini kullandığında bu sürece dahil olacaktır. Afrika kıtasında büyük bir yeşil hidrojen potansiyeli bulunmaktadır. Dünyadaki toplam hidroelektrik potansiyelinin yaklaşık %10'una sahiptir fakat bu oranın sadece %10'luk kısmını kullanabilmektedir. Ayrıca rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli olan kıta gelecekte olan yatırımlar ile hidrojen ihracatçısı olabilecektir.

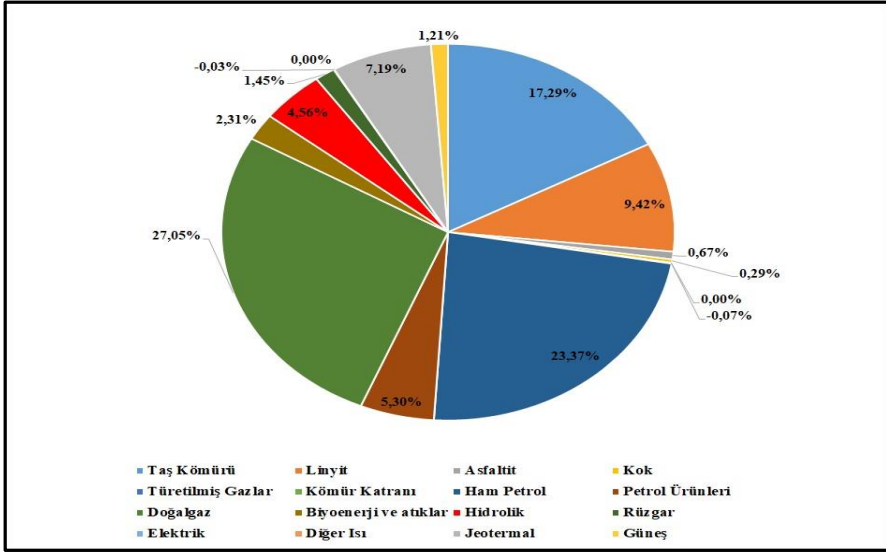
2.7. Türkiye'de Hidrojen Enerjisi

Türkiye'nin toplam nihai enerji kullanımı 2020 itibarıyla 113 Mtep'e ulaşmıştır. Ayrıca toplam birincil enerji arzı da 147,2 Mtep olarak gerçekleşmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Sanayi sektörü bu kullanımda birinci sırada yer almaktadır, imalat sanayi ise kullanımın üçte birini oluşturur. Fosil yakıt hammaddelerinin enerji olarak değil hammadde olarak kullanılması enerji dışı tüketim olarak geçmektedir, %6,71 kısmı sanayi sektörüne kattığımızda oran %40'lara yaklaşmaktadır. Sanayi sektörünün ardından toplam nihai enerji talebinin %32'lik kısmını oluşturan binaların enerji talebi takip etmektedir. Petrolün yakıt olarak kullanımında en büyük paya sahip olan ulaşım sektörü ise üçüncü sıradadır.



Şekil 33: Türkiye'nin Toplam Nihai Tüketiminin Sektörel Dağılımı, 2020
Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022

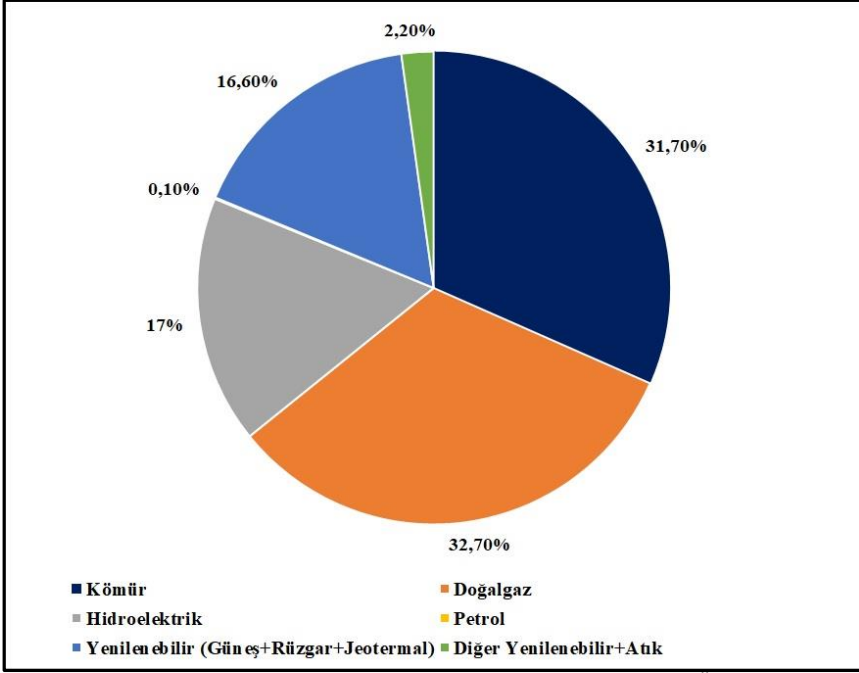
Toplam nihai enerji arzının kaynaklara göre dağılımına bakıldığında (bkz. Şekil 33), enerji arzının %29'luk kısmı ham petrol ve petrol ürünlerinden, %27'lik kısmı taş kömürü ve linyit, %27'lik kısmı doğalgazdan karşılanmıştır. Arzdaki kaynakların (taş kömürü ve doğalgaz da neredeyse tamamı, ham petrolün ise %90'lık kısmı) büyük bir oranı ithaldir. Bu rakamlara bakıldığında Türkiye birincil enerji kaynaklarında dışa bağımlı bir ülke olmaktadır.



Şekil 34: Toplam Enerji Arzının Kaynaklara Göre Dağılımı, 2020

Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022

Ülkemizde 2021 yılında 331.491 GWh elektrik üretimi olmuştur. Bu üretimin %33'ü doğalgaz, %32'lik kısmı kömür, %17'lik kısmı hidrolik ve geriye kalan %18'lik kısmında ise yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmıştır. Yenilenebilir kaynaklarda ise en fazla pay %9,4 oranla rüzgâr enerjisidir onu arkasından güneş enerjisi takip etmektedir.



Şekil 35: 2021 Yılı Türkiye Kaynaklara Göre Elektrik Üretimi
Kaynak: TEİAŞ, 2021

Türkiye'deki artan nüfus, köyden kente olan göçler (2021 itibari ile kentte yaşayan nüfus oranı %93,2'dir), teknolojiye olan gelişmeler ile ülkemizin enerjiye olan bağımlılığı artmaktadır. Türkiye enerji ihtiyacının neredeyse %80'lik oranını ithal eden dışa bağımlı bir ülkedir. Fosil yakıt ithalatının yüksek olması nedeniyle hem ülke bütçesine zarar vermektedir hem de gelişmekte olan bir ülke olduğundan dolayı cari açık artmaktadır. Ayrıca küresel iklim değişiminde etkili olan sera gazlarının en önemli kaynağını fosil yakıtlar oluşturmaktadır. Türkiye de gelişmekte olan bir ülke olduğundan dolayı sera gazı emisyonlarına katkıda bulunmaktadır.

Türkiye'nin ilk yerli elektrikli otomobili olan TOGG Türkiye adına önemli bir gelişmedir. Şu anda lityum batarya ile şarj olan TOGG, TOGG CEO'su Mehmet Gürcan Karakaş'ın açıklamalarına göre hidrojen yakıt hücresi üzerine çalışmalar yapılmaktadır (URL 34). Bu yapılacak çalışma hayata geçirildiğinde Türkiye'deki hidrojen yakıt hücreli araçların kullanımı artacaktır. Ayrıca bu atılım Türkiye'nin hidrojen teknolojilerinde ilerlemesini kolaylaştıracaktır.

2.8.Karadeniz’de Hidrojen Sülfür

Karadeniz, 432.000 km² yüzey alanına sahiptir, maksimum ulaştığı su derinliği ise 2200 m olup, tahmini 534.000 km³ su hacmi ile dünyanın en büyük içdenizlerinden bir tanesidir. Coğrafi olarak 41-47° enlem ve 28-42° boylamlarında, Avrupa’nın Güneydoğusu, Kafkaslar ve Anadolu ile çevrili olan Karadeniz, kuzey kısmında Kırım Yarımadası ve Azak Denizi ile ayrılır. Güneyde ise İstanbul Boğazı ile Marmara Denizi’ne oradan da Çanakkale Boğazı ile Akdeniz’e bağlanır.

Karadeniz’e kıyısı olan 6 ülke (Türkiye, Gürcistan, Rusya, Ukrayna, Romanya ve Bulgaristan) arasında kıyı uzunluğu en uzun ülke olan Ukrayna’nın alt sırasında Türkiye yer almaktadır. Bu 6 ülkeden gelen akarsularla beslenen Karadeniz, akarsuların getirdiği kirlilik ve %90 oranında anaerobik olan yapısı ile hidrojen sülfür (H₂S) birikimi mevcuttur.

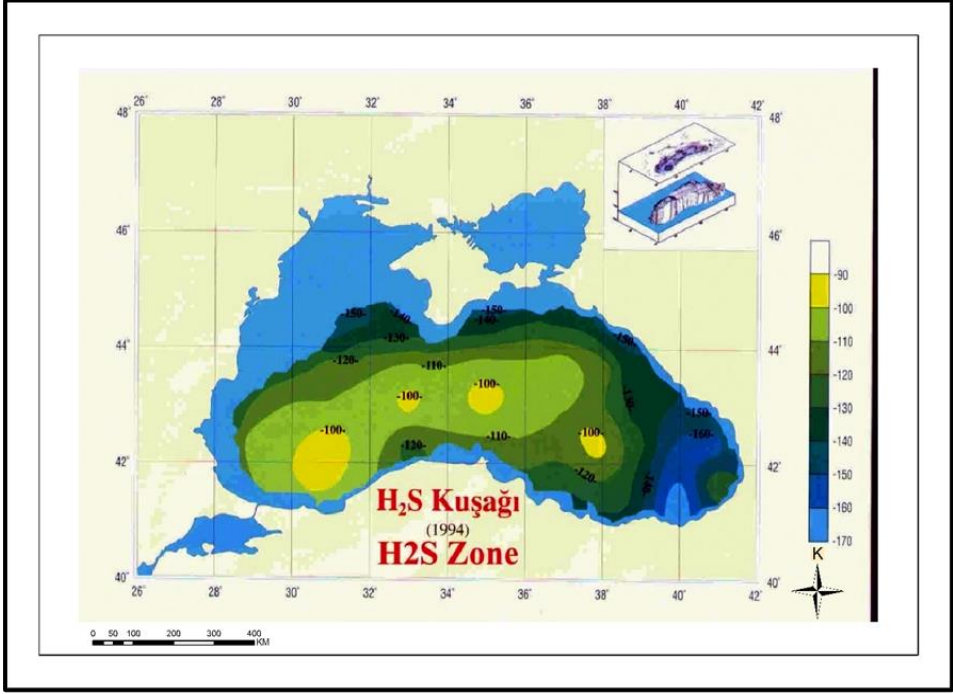
Buzul çağının sonlarına doğru ısınmaya başlayan yerküre ile okyanuslar ve denizlerdeki su seviyelerinde yükselmeler meydana geldi. Akdeniz’in de suları yükselerek boğazları doldurdu. O zamanlar bir tatlı su gölü olan Karadeniz’e ulaşan tuzlu su ile bir yoğunluk gradyanı oluşturdu. Bu sayede tatlı ve tuzlu suyun karışması engellenmiş oldu. Bu nedenden dolayı yüzeyden derinlere olan oksijen girişi sınırlanmış ve yüzeyden derinlere çöken organizmaların oksijen ihtiyacı karşılanamamıştır. Oksijensiz kalan alt tabakada biriken organizmalar ise H₂S birikimine yol açmıştır (Oğuz ve Tuğrul, 1998, s. 5).

H₂S birikimi açısından dünyanın en büyük su kütlesi olan Karadeniz’de H₂S birikimi yüzeyin 200 m altında başlamaktadır. Bir asit gazı olan H₂S zehirli ve çevre kirleticisi olarak kabul edilmektedir. Fakat olumsuzluklarına rağmen bir enerji kaynağı olma potansiyelini de barındırmaktadır.

Karadeniz’de binlerce yıldan beridir H₂S gazı oluşmaktadır, Moskova Oşinoloji Araştırma Enstitüsü raporlarına göre tahmini 4.6 milyar ton H₂S gazı rezervi mevcuttur. Bu rezerve her yıl 4 milyon ton daha H₂S eklenmektedir. H₂S içerisindeki hidrojen ayrıştırıldığında ortaya çıkan hidrojen miktarı 270 mt’dur. Ayrıca H₂S’den hidrojen elde edilmesi suyun elektrolizine göre 3 kat daha az maliyetlidir (URL 35).

H₂S çevreye olan zararlarını azaltmak için bileşenlerine ayrılmalıdır. Ayrışma sonucunda gaz formunda ortaya çıkan kükürt ve hidrojenidir. Ülkemizde Zonguldak, Samsun, Sinop ve Giresun (bkz. Harita 11) açıklarında

H₂S yüzeye çıkarmak daha kolaydır. Yüze çıkartılan sülfürü ayrıştırmak için ise elektrik enerjisi gerekmektedir, bu elektrik enerjisini ise yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmek mümkündür (BAKKA, 2013, s. 55).



Harita 11: Karadeniz'deki H₂S Dağılımı

Kaynak: URL 36

Karadeniz ayrıca bir enerji geçiş güzergahı olduğundan dolayı enerji coğrafyası açısından da önemlidir. Karadeniz'in jeopolitik önemi sadece kıyıdaş olan 6 ülke dışında Balkanlardan Hazar Denizine olan bölgeyi de kapsamaktadır. Rusya'nın Ural ve Sibirya bölgelerinde üretilen petroleri Karadeniz üzerinden Türk Boğazları olan İstanbul ve Çanakkale Boğazlarından geçerek dünyaya ihraç edilmektedir. Ayrıca kıyıdaş olmayan Azerbaycan ve Kazakistan'da çıkardıkları petrolü Karadeniz sahillerinden ihraç etmektedir. Askeri, ekonomik ve siyasi açıdan değerli olan bu alan üzerinde ilerleyen yıllarda kıyıdaş olan ve olmayan ülkeler arasında daha fazla mücadele yaşanacaktır. Özellikle küresel olarak doğalgaz kullanımının arttığı yıllarda bir transit merkezi olmaya başlayan Karadeniz, Avrupa'nın baş doğalgaz tedarikçisi Rusya için önemli bir jeopolitik alan olmuştur. Mavi Akım ve Türk Akımı, doğalgaz boru hatları Rusya-Türkiye ve Avrupa için

enerji güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenlerden dolayı H₂S'den üretilecek olan hidrojen, borular aracılığı ve yapım aşamasında olan Filyos (Zonguldak) Limanından bir hidrojen ekonomi bölgesi oluşturulabilecektir. Keşfi yapılan doğalgaz kaynağı ile de mavi hidrojen üretimi yapabilecek potansiyeli barındıran Türkiye, yine boru hatları ve gemiler ile hidrojen ticaretinde önemli bir oyuncu olacaktır.

2.9. Bozcaada Hidrojen Tesisi

2011 yılında Uluslararası Hidrojen Enerjileri Teknolojileri Merkezi (ICHET) , T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ve Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (UNIDO) tarafından Bozcaada Kaymakamlığının enerji ihtiyacını karşılaması amacıyla “Hidrojen Adası Projesi” hayata geçirilmiştir (Tuna, vd., 2022, s. 37). Fakat pilot proje olan “Hidrojen Adası Projesi” son verilmesi nedeni ile ilk deneme maalesef başarıyla sonuçlanmamıştır.



Şekil 36: Bozcaada hidrojen tesisi

Kaynak: URL 37

2.10. Güney Marmara Hidrojen Vadisi

Bozcaada YEKA (Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları) denizüstü (offshore) RES'ler için aday alan olarak gösterilmektedir. Ayrıca adada, kara tipi (onshore) 17 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır. Kullanımda bulunan ve proje aşamasında olan bu yenilenebilir kaynaklar bölgenin yeşil hidrojen üretim potansiyelinin arttırmaktadır.

15 Şubat 2022 tarihinde 16 paydaşın katılımıyla Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen üretim tesisi protokolü imzalanmıştır. "Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Vadi Projesi" olarak adlandırılan proje ile Balıkesir EnerjiSA üretim sahasında yıllık minimum 500 ton/yıl hidrojen üretilen Hidrojen Peroksit, Eti Maden, Şişecam ve Kale Seramik tesislerinde kullanılmak üzere Linde Gaz ile taşınacak (URL 38).



Harita 12: YEKA aday denizüstü rüzgâr enerji santralleri

Kaynak: URL 39

Bu hidrojen vadilerinin diğer bölgelerde yaygınlaşması Türkiye'nin enerji politikaları açısından çok önemlidir. Çünkü sanayi bölgelerine yakın lokasyonlarda bu tesisler kurulduğunda hem taşıma maliyeti düşmüş oluyor hem de depolama maliyeti ve güvenliği açısından avantajlar sağlanıyor.

2.11. Türkiye Kalkınma Planlarında Hidrojen Enerjisi

Türkiye'nin hidrojen enerjisi ile resmi olarak ilk tanışması 02.05.2007 tarih ve 26510 sayılı Resmî Gazetede yayımlanan "Enerji Verimliliği

Kanunu” ile olmuştur. Bu kanunda hidrojen, biyoyakıt vb. yenilenebilir kaynakların özendirilmesinden bahsedilmiştir.

Türkiye'nin ekonomik, sosyal ve kültürel atılım ve düzenlemelerini içeren kalkınma planlarında hidrojen enerjisine yönelik ayrıntılı bir değerlendirme yapılmamıştır. Kalkınma Planları incelendiğinde yalnızca 9. ve 11. Kalkınma planlarında hidrojene yer verilmiştir. Söz konusu kalkınma planlarında hidrojen şu şekildedir;

9. Kalkınma Planınının 482. Maddesinde hidrojende şu şekilde bahsedilmektedir;

Geleceğe yönelik olarak nanoteknoloji, biyoteknoloji, yeni nesil nükleer teknolojiler ile hidrojen ve yakıt pili teknolojileri; sanayi politikasının öncelik vereceği sektörlerdeki araştırmalar, yerli kaynakların katma değere dönüştürülmesini amaçlayan Ar-Ge faaliyetleri; aşı ve anti-serum başta olmak üzere yaşam kalitesinin yükseltilmesine yönelik sağlık araştırmaları; bilgi ve iletişim teknolojileri ile savunma ve uzay teknolojileri öncelikli alanlar olarak desteklenecektir.

11. Kalkınma Planınının 361.2. Maddesinde ise Hidrojen şu şekilde bahsedilmektedir;

Ülkemizdeki linyit rezervlerinin değerlendirilerek, kömür kaynaklı kimyasalların (amonyak, metanol, monomer, sentetik doğalgaz, hidrojen, sentetik sıvı dizel yakıt gibi) üretilebilmesine olanak veren gazlaştırma reaktörlerinin kurulabilmesi amacıyla fizibilite çalışmaları gerçekleştirilecektir.

Türkiye 7. Beş Yıllık Kalkınma Planınının “Genel Enerji Özel İhtisas Komisyonu Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu'nda” hidrojen teknolojilerinden bahsedilmektedir fakat resmileşmiş olan 7. Beş Yıllık Kalkınma Planında hidrojen enerjisinden bahsedilmemektedir.

Ayrıca 8. Beş Yıllık Kalkınma Planınının “Elektrik Enerjisi Özel İhtisas Raporunda” hidrojene yer verilmiştir. Rapora göre hidrojen 21. yüzyılın yakıtı olarak görülmektedir. Türkiye'nin hidrojen üretme açısından bir şansı daha bulunmaktadır, 1700 km uzunluğu bulunan Karadeniz kıyıları önem arz etmektedir. Ancak resmileşmiş olan 8. Beş Yıllık Kalkınma Planında hidrojen enerjisi bulunmamaktadır.

3. BÖLÜM

3.1. Bulgular

Araştırma bulguları, nitel araştırma metoduna uygun olarak beş tema oluşturulmuş ve bu temalar çerçevesinde analiz edilmiştir. Katılımcılar K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9 olarak kodlanmıştır.

Yenilenebilir bir kaynak olarak hidrojen enerjisinin Türkiye için önemi

Yenilenebilir bir kaynak olarak hidrojen enerjisinin Türkiye için önemli bir yer tutmaktadır. K1, hidrojen enerjisinin Türkiye için önemi hakkında *Birincisi doğal gaz bağımlılığı azaltma, ikincisi ise sanayinin dekarbonizasyonu...* söylemektedir. K7:

Türkiye'nin iki avantajı var 1.si jeopolitik konumu dolayısı ile Türkiye üretmiş olduğu hidrojeni başka ülkelere hızlı bir şekilde taşıyabilir örneğin kuzey Afrika ülkeleri ya da Orta Doğu ülkeleri. 2. Olarak ise Türkiye ciddi bir güneş ve rüzgâr potansiyeline sahip. Bu sebeplerden dolayı hidrojen potansiyeli yüksektir.

Türkiye enerjide dışa bağımlı bir ülke olduğundan dolayı büyük cari açıklar vermektedir. Bunun sonucunda ise ekonomik olarak sorunlar yaşamaktadır. Dolar ve euro kuru arttığında Türkiye'yi ekonomik anlamda yıpratmaktadır. Hidrojen enerjisi dışa bağımlılığı azaltacağı öngörülmektedir. K2, *Hidrojen dünya geneli için önemli bir kaynaktır. Dışa bağımlılığımızı azalttığı ve üretiminin yenilenebilir enerji; Güneş, su, rüzgâr ile olması sebebiyle Türkiye için çok önemlidir.*

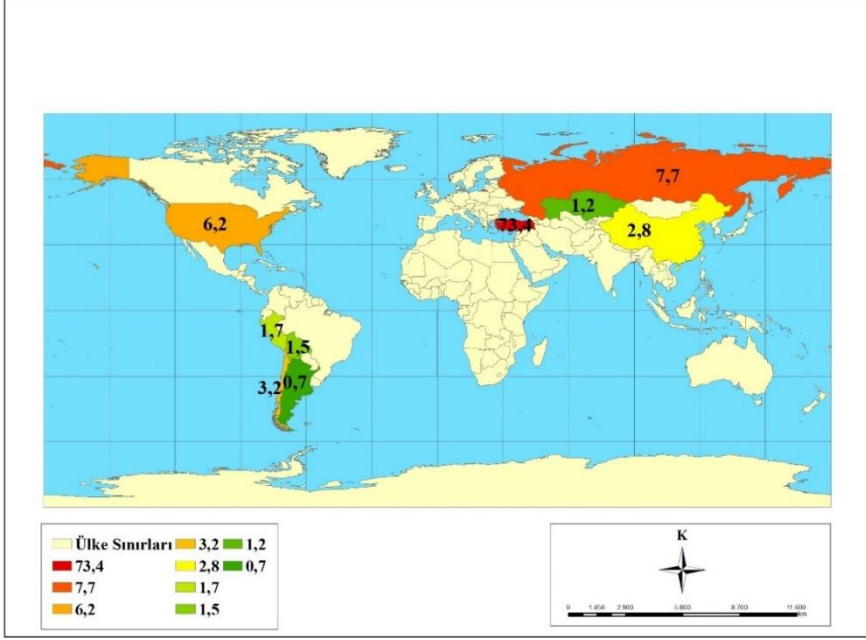
Aslına bakarsak hidrojeni birincil enerji kaynağı olarak tanımlayamayız. Kömür, petrol, doğalgaz ve yenilenebilir gibi birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesinden elde edilen ikincil kaynaklara enerji taşıyıcısı denilmektedir. Elektrik, benzin, LPG, motorin vb. kaynaklar ikincil enerji kaynaklarına örnek verilebilir. Hidrojen enerjisi de yenilenebilir kaynaklar, doğalgaz ve kömürün dönüştürülmesi ile elde edildiğinden dolayı ikincil bir kaynaktır. K3:

Hidrojeni temiz ve yenilenebilir enerji taşıyıcısı olarak değerlendiriyoruz. Çünkü hidrojen üretimi için birincil enerji kaynağına ihtiyaç var bu da güneş ve rüzgârdan ve doğalgazdan elde edilebilir buna mavi hidrojen denir. Dünya üzerinde elde edilen hidrojenin %60-70'i mavi hidrojendir biz projelerimizde yeşil hidrojen kullanımını artırmayı hedefliyoruz.

Türkiye güneş ve rüzgâr enerjisi açısından potansiyeli yüksek bir ülke konumundadır. 2022 yılında güneş enerjisinde toplam 15,84 TWh üretim gerçekleşmiştir, toplam üretimdeki payı ise %4,5'tir. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre Türkiye'de yıllık ortalama güneşlenme süresi 2741 saattir, yıllık ortalama ışıınım süresi ise 1527 kWh/m²'dir. Ayrıca YEKDEM 2022 verilerine göre 62 adet rezervuarlı hidroelektrik santrali bulunmaktadır, bu santrallerin ayrıca yardımcı kaynak olarak yüzer güneş enerjisi santralleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. K4 bu konu hakkında şunları söylemektedir:

Yenilenebilir enerjide hidroelektrik, jeotermal, rüzgâr ve güneş konusunda yüksek potansiyeli olan ender ülkelerden biriyiz bu yüzden hidrojen konusunda da avantajlı olduğumuzu söyleyebiliriz ama kendiliğinden olabilecek bir şey değil bu güneş potansiyeli çok yüksek olmasına rağmen elektrik üretimi %5'e yaklaşmış durumda yalnızca bu çok düşük bir oran. Örnek olarak Ukrayna'da savaş olmasa her şey olduğu gibi devam ediyor olsaydı bu konuda ülkemizin ilerisine geçebilirdi kuzey ülkesi olmasına rağmen biz onlarla kafa kafaya gidiyoruz. Ukrayna gibi ülkelerde güneş potansiyeli düşük olduğu için daha yüksek kapasitelerde kurulum yapmaları gerekiyor biz 2 GW kurulum yaparken onlar 3 GW kurulum yapmak zorundalar aynı elektriği üretebilmek için. O yüzden öncelikle güneş potansiyeli iyi değerlendirmemiz gerekiyor hidrojeni düşünebilmek için. Bir sürü hidroelektrik santrali rezervuarlı barajlarımız var bunlarında en büyükleri devlete ait güneş potansiyelimizi bunların üzerinde de kullanabiliriz yüzer teknolojileri sayesinde büyük bir enerji yaratımı elde edebiliriz büyük barajların bulunduğu bölgeler Türkiye'nin hidrojen üretim merkezleri olabilirler.

inmeden çıkartılmaktadır bu da madenin kolay çıkartılmasında ve ekonomik olarak işletilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır (Yenmez, 2011, s. 70).



Harita 14: Bor rezervlerinin küresel dağılışı

Kaynak: URL 42'den alınan veriler ile yazar tarafından oluşturulmuştur.

Enerji depolama medeniyet için geçmişte ve günümüzde hala büyük bir sorun oluşturmaktadır. Dünyanın artan enerji ihtiyacı ile enerji tüketimi de günden güne artmaktadır. BP'nin yayınladığı verilere göre 2021 yılında küresel birincil enerji tüketiminin %82'lik kısmı fosil kaynaklardan üretilmiştir. Bu fosil kaynaklara olan ihtiyaç giderek artmaktadır, fosil kaynakların sınırlı ve kirletici olmasından dolayı enerji güvenliğinde kaygılar yaşanmaktadır. Bu yüzdendir ki geçmişte yaşanan petrol krizlerinden sonra alternatif kaynaklara yönelmeye başlanmıştır. Fakat alternatif kaynaklar içerisinde olan yenilenebilir kaynakların baz yük olmamasından dolayı da sürekli verimlilik alınmamaktadır. İşte tam burada enerji depolama teknolojileri ortaya çıkmaktadır.

Bor bir hidrojen taşıyıcısı ve depolayıcı görevini üstlenmektedir. Borun bileşiği olan sodyum bor hidrür ağırlıkça %10,6 oranında hidrojen içermektedir. Bu sayede sodyum bor hidrür de hidrojen depolama

kolaylaşmaktadır. Ayrıca hidrojenin taşınmasında ve patlama riskini azaltmada yardımcı olmaktadır. Ülkemizde bulunan bor rezervleri sebebi ile önümüzdeki yıllarda Türkiye bir enerji merkezi olma potansiyelini taşımaktadır. Rezervlerini iyi kullanıp, Ar-GE'ye önem vererek dünyanın enerji merkezi olabilecek kapasiteye sahiptir. Hem enerji transit bölgesi hem de enerji ihracat bölgesi gelebilecek olan Türkiye çevre coğrafyasında ve dünyanın geri kalan coğrafyalarında siyasi olarak güç elde etmiş olacaktır. K6, sodyum bor hidrür ile hidrojen depolama hakkında şu sözleri ifade etmiştir:

Sodyum bor hidrür bor ve hidrojeni birleştiriyorsunuz bu sodyum bor hidrürü suya attığımız zaman suyun içindeki hidrojeni de ortaya çıkarıyor. Kendi yapısındaki hidrojen de açığa çıkıyor. Dolayısı ile biz hidrojeni borlu bileşikten depolamaya ihtiyaç duymadan elde edebiliyoruz, buna ihtiyaç kadar hidrojen diyorlar.

Fakat hidrojeni bor ile depolamada bazı güçlükler ön plana çıkmaktadır. Bor ve hidrojenin birleştirilmesi için elde edilecek enerjiden daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmakta ve bu durum verimliliğin düşüşüne sebep olmaktadır. K1, düşüncesi aynı yöndedir ve bunun için farklı bir yöntem ileri sürmektedir *Bor ve hidrojeni birleştirmek için de büyük bir enerjiye ihtiyaç duyuluyor bu da verimliliğin düşmesine sebep oluyor. Bu yöntem yerine tuz mağaralarına depolamak daha verimli bir yöntemdir.* K7 ise bu durumu şu şekilde ifade etmiştir *Bor hidrojen için güzel bir depolanma sağlıyor maliyet açısından da faydalı. Hidrojenin bir sıkıntısı da depolanması özel silindirik tanklar vasıtası ile depolanabilir ya da tuz mağaralarında depolanabilir.*

K5:

Türkiye boru işlemeden sattığı için çok faydası olacak gibi durmuyor bora hidrojen hapsetmek ve bor hidrür yapan bir firmalar bir araya gelip sanayileştirmedeği sürece açıkçası bu bor için bir anlam ifade etmez. Endüstrilerin bir araya gelip bu ürünleri endüstriyel seviyeye çekmesi halinde ise Türkiye'nin bor madenleri anlamlı hale gelecektir çünkü bir şeyi hammadde halinde satmak getirisi olan bir yöntem değil.

İfadesi ile borun kullanımının katma değer oluşturularak fayda sağlayacağını ifade etmektedir. Bu sebeple Türkiye'nin bor madenini hidrojen depolamasında kullanabilmesi için AR-GE çalışmalarına önem vermesi gerekmektedir.

Doğalgaz, yerli kömür ve nükleer ile hidrojen üretimi

2020 yılında Karadeniz’de Sakarya Gaz Sahasında bulunan Tuna 1 kuyusunda bulunan 320 milyar m³ doğalgaz ile Türkiye ilk büyük keşfini yapmıştır. Ardından aynı kuyuda 85 milyar m³ doğalgaz daha keşfedilmiştir. 2021 yılında ise yine Sakarya Gaz Sahası içerisinde bulunan Amasra 1 kuyusunda 135 milyar m³ doğalgaz keşfi yapılmıştır, bu keşiflerin sonucunda Karadeniz’deki toplam doğalgaz rezerv miktarı 540 milyar m³’e ulaşmıştır. 2022 yılında yapılan doğalgaz arama faaliyetleri sonucunda Türkiye’nin toplam doğalgaz keşfi 710 milyar m³’e ulaşmıştır. Çıkarılacak olan doğalgaz ile enerji arz çeşitliliğini arttıracak olan Türkiye, enerji güvenliğini de arttırmış olacaktır. Gerçekleşen bu keşifler Türkiye’nin stratejik ve jeopolitik önemini daha da arttırmaktadır.

Doğalgaz ve hidrojen gazının ısı değerleri karşılaştırıldığında hidrojenin ısı değeri doğalgazdan 2,1 kat daha fazladır (Gazbir-Gazmer Uluslararası İlişkiler Komisyonu, 2020, s. 2). Doğalgaz’ın çıkartılması ile mavi hidrojen olarak nitelendirilen hidrojen çeşidini üretme imkânı olacak olan Türkiye enerji kaynakları çeşitlendirmesine gidecektir. K1, *Dünyadaki hidrojen üretiminin çoğu doğalgazdan ve kömürden üretiliyor, temiz hidrojen elde edilmeyecek ise kömürün gazlaştırılması da bir seçenektir.* Ayrıca Gazbir-Gazmer’in yürütmüş olduğu proje ile doğalgaza %20 oranında hidrojen entegre etme çalışmaları yapılmaktadır. Bu sayede doğalgazın veriminin artırılarak Karadeniz’de bulunan rezervin daha uzun bir kullanımını ve doğalgazdan yayılan emisyonların düşürülmesinin önünü açacaktır.

Türkiye’de toplam kömür rezervi miktarı 20,84 milyar tondur. 19,32 milyar tonu linyittir geriye kalan 1,52 milyar ton ise taşkömürüdür. Türkiye TÜİK 2022 verilerine göre 2022 yılında 38 milyon ton taşkömürü ithalatı gerçekleştirmiştir. Türkiye taşkömürü tüketimine bakıldığında %60’lık kısmı termik santrallerde elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Geriye kalan kısım ise %16’sı kok fabrikaları, %3’ü demir-çelik sanayi, %10,77’si sanayi (demir-çelik sanayi hariç), %9,68’lik kısmı ise diğer sanayi kollarında gerçekleşmiştir. Türkiye 2022 yılında 71 milyon ton linyit tüketmişti, bu tüketimin %84’ü termik santrallerde gerçekleşmiştir, %10’luk kısmı sanayi (demir-çelik hariç), geriye kalan %6 ise diğer sanayi sektöründe tüketimi gerçekleşmiştir (TÜİK, 2022). Türkiye’de bulunan linyit rezervlerinin kalorisi

düşük olduğundan dolayı kok fabrikalarında kok kömürü üretimi ve demir çelik sanayinde kullanımı verimli olmamaktadır.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yayınlamış olduğu *Hidrojen Yaklaşım Belgesi* hidrojenden geleceğin enerji taşıyıcısı olarak tanımlanmıştır. Yerli kömürden hidrojen üretimi konusunda bahsi geçen belgede şu şekilde ifade edilmektedir:

Türkiye'nin kömür kaynaklarının hidrojen üretiminde kullanılması ve bunun daha sonra ısınma ve elektrik sektörlerine destek vermesinin sağlanması olası ve ilerlenmesi gereken bir yol olarak önerilmiştir. Yapılan pilot çalışmalarda bunun mümkünlüğü ortaya konulmuştur. Türkiye'nin havagazı kullandığı yıllarda da talebin yüksek olduğu dönemlerde kömürden elde edilen jeneratör gazı olarak bir karışım halinde Ankara havagazı şebekesine de hidrojen verildiği söylenmiştir.

Karbon yakalama teknolojileri ile daha temiz ve yerli kömür kaynaklarından hidrojen üretimi mümkün hale gelmektedir. K7, *Yerli kömürümüzden üretim sağlanabilir*, ifadesinde bulunmuştur. K9:

Hidrojen üretim kısmında yeşil hidrojene daha ağırlık verilecektir, ama bu demek değil ki fosil yakıtları da hidrojen üretiminde kullanmayacağız. Kısa vadede fosil yakıtlardan hidrojen üretimi gerçekleştireceğiz, uzun vadede ise yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi gerçekleştirilecektir.

Türkiye'nin güney kıyısında yer alan Mersin ilinde 2010 yılında Rusya-Türkiye arasında yapılan anlaşma ile 4800 MW kurulu gücünde Akkuyu NES iş birliği anlaşması yapılmıştır. Buna göre kesintisiz elektrik üretimi yapabilecek olan santralde özellikle gece elektrik kullanımının düştüğü saatlerde kullanılmayan elektriğin depolanıp hidrojen üretilmesi için kullanılması mümkündür. K9, *Hidrojen üretimi ile alakalı bir detay daha var oda nükleer enerjiden hidrojen üretimi. Gelecekte Akkuyu nükleer enerji santralinde de hidrojen üretimi yapmak mümkündür. K7, Nükleer santralde üretilen elektrik hidrojen üretiminde kullanılabilir.* Şeklindeki görüşleriyle nükleer enerjiden hidrojen üretim konusuna dikkat çekmişlerdir. Fosil kaynaklardan üretilen hidrojen karbon salınımına neden olmaktadır fakat nükleer enerjide bir emisyon salınımı yoktur. Nükleer enerjinin riskleri bulunmasına rağmen hidrojen üretimi için gerekli elektrik enerjisini karşılama potansiyeli mevcuttur.

Fakat K4 ve K5 nükleer enerjiden hidrojen üretimine sıcak bakmadığı gözlemlenmiştir. K4, *Hidrojen amaçlı kurulan bir santral değil daha çok elektrik üretsın diye kurulan bir santral ben onun hidrojen üretiminde kullanılacağını düşünmüyorum.* K5, *Yenilenebilir kaynaklar varken nükleere gidilmesi sıcak baktığım bir konu değil nükleer zaten temiz olduğu hala tartışılan bir bilgi bu kadar riskli bir yapıyı tercih etmek mantıklı olmaz.*

Küresel iklim değişimi açısından hidrojen

1980'li yılların başından itibaren küresel ısınmanın sonuçları ortaya çıkmaya başladığında çevre kaygısı çeken hükümetler derhal harekete geçmiştir. Aslında 1896'da Nobel ödülüne layık görülen İsveçli bilim insanı Svante Arrhenius tarafından CO₂ gazının sera etkisine neden olduğunu kanıtlamıştır. Fakat küresel anlamda 1979 yılında Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization/WMO) tarafından düzenlenen "*Dünya İklim Konferansı*" nda fosil kaynaklardan kaynaklı CO₂ birikimi nedeniyle küresel ısınmaya vurgu yapılmıştır (Selçuk, 2009, s. 9).

1988 yılında IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change/ Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli) Birleşmiş Milletlere bağlı Dünya Meteoroloji Örgütü ve Birleşmiş Milletler Çevre programı tarafından kurulmuştur. Amacı ise iklim değişikliğini bilimsel bir çerçeveye oturtmak, etkilerini ve gelecekteki barındırdığı riskleri değerlendirmeler yaparak politika yapıcılara öngörü sağlamaktır.

1992 yılında iklim değişimi açısından önemli bir gelişme daha yaşanmıştır. *Atmosferdeki sera gazı birikimlerini, iklim sistemi üzerindeki insan kaynaklı tehlikeli etkiyi önleyecek bir düzeyde durdurmayı başarmayı.* amaçlayan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi imzalanmıştır. Türkiye ise bu sözleşmeye 24 Şubat 2004 tarihinde dahil olmuştur. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesinin bir eki olan Kyoto Protokolü taraf olan ülkelerden sayısallaşmış şekilde emisyon azaltım hedefi belirten bir anlaşmadır, bu nedenden dolayı uygulamaya geçen ilk anlaşmadır. 1997 yılında kabul edilen anlaşma 2005 yılında yürürlüğe girmiştir.

2015 yılında 195 ülke tarafından kabul edilen, 2016 yılında ise 175 ülke tarafından imzalanan Paris İklim Anlaşması ile küresel emisyonların 2030 yılına kadar %50'ye indirilmesi, 2050 yılına

gelindiğinde ise sıfır emisyon hedeflenmektedir. Anlaşmaya göre taraf olan ülkelerin hedefi, küresel ortalama sıcaklık artışını 2°C (sanayi öncesi dönem) ile sınırlandırmak ve mümkünse 1,5°C düşürmektir. Anlaşmadaki taahhütleri gerçekleştirmek amacı ile fosil yakıt kullanımını sınırlandırılmak istenmektedir. Temiz ve yenilenebilir enerjiye geçişin küresel olarak hareket edilmesinden bahsedilmektedir. K2 Paris İklim Anlaşması açısından hidrojen enerjisinin önemini şu şekilde vurgulamaktadır:

Paris İklim Anlaşmasına göre çok mantıklı ve hidrojen maddesi için benzer bir ürün yok Paris iklim anlaşmasında uygulamamızda elimizdeki ürünler çok kısıtlı. Nükleer santraller de patlamadığı sürece çok çevreci bir ürün ama riski yüksek fakat çevreci olarak kabul edilmiyor elimizde yenilenebilir enerji kalıyor ama yakıtı yönelik elimizde hidrojen dışında bir alternatif yok. Bu sebeple çok önemlidir küresel iklim değişimi açısından.

7 Ekim 2021 tarihinde TBMM tarafından onaylanan Paris İklim Anlaşması Türkiye'de yürürlüğe girmiştir. Paris İklim Anlaşması Kyoto Protokolünden farklı olarak gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin emisyonları kendi belirledikleri ve bağlayıcı olmayan hedeflerden oluşmaktadır. Türkiye bu bağlamda sera gazı emisyonlarını 2030 yılında %21 oranında azaltmayı hedeflemiştir.

Hidrojen enerjisi, küresel iklim değişimi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Hidrojen enerjisi, fosil kaynaklarda olduğu gibi karbon içeren bir kaynak değildir ve hidrojen yakıldığında atmosfere sadece su buharı yayılmaktadır. Bu sebeple hidrojen enerjisi sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilecektir. Fakat hidrojen bir enerji taşıyıcısı olduğundan dolayı hidrojen üretiminde kullanılan kaynağın yenilenebilir mi yoksa fosil kaynaklar mı olduğu önemlidir. Hidrojen, yenilenebilir (rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle, dalga) enerjiler ile üretiliyor ise üretim ve tüketim aşamalarında atmosfere hiçbir zararlı emisyon salınmamaktadır. K4 bu konuyu şu şekilde değerlendirmektedir:

...hidrojeni tek başına bağımsız bir kaynakmış gibi değerlendirmem gerekiyor rüzgâr ve güneşi tamamlayıcı bir aktör olarak değerlendirmek gerekiyor hidrojen den önce ülkelerin rüzgâr ve güneşte ya da yeni bir

enerjide özellikle elektrik sisteminde belli bir noktaya getirmeleri karbonsuzlaştırmaları gerekiyor.

Öne çıkan sektörler

Hidrojen enerjisi birçok sektörde kullanımı mevcuttur. Özellikle karbondan arındırılması zor olan sektörler (demir-çelik, çimento) için hayati önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojileri ile birbirini tamamlayan hidrojen enerjisi özellikle yakıt hücresi teknolojileri ile deniz yolu taşımacılığı, büyük kara vasıtaları (kamyon, tır vb.), otomobiller ve havacılık sektörünü de karbondan arındırma potansiyeli yüksektir.

Çelik endüstrisi CO₂ salınımı yapan en büyük endüstrilerden birisidir. Üretim sürecinde koklaştırılmış taş kömürü kullanımı sebebiyle küresel emisyonların %8'ini oluşturmaktadır. Yeşil hidrojene geçişte atmosfere yayılan emisyonları azaltmada büyük bir rolü bulunmaktadır. Tahminlere göre hidrojen talebinde çelik üretiminin payı %8 olması ve atmosfere yıl içinde %20 daha az emisyon yayılması beklenmektedir (URL 43).

Hidrojen enerjisini, yakıt hücreleri ile elektrik enerjisine dönüştürmek mümkündür. Fakat hidrojen enerjisi daha önce bahsedildiği gibi kömür, petrol, doğalgaz ve yenilenebilir kaynaklar gibi birincil enerji kaynağı olmadığından dolayı üretiminde birincil enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Birincil enerji kaynaklar ile hidrojen üretimi yapıldıktan sonra yakıt hücreleri ile hidrojen elektrik üretimini mümkün kılmaktadır, sadece burada enerji dönüşümlerinden dolayı verimlilik düşmesi söz konusudur. K4, bu konu hakkında şu düşünceleri paylaşmaktadır:

...ama birçok projeksiyonda elektrik üretiminden ziyade sanayi ve ağır sanayide rol oynayacağı düşünülüyor. Bu sayede karbondan arındırılması zor olan sektörler için kolaylaşabilir. Ulaşım da kullanılabilir ama 2035 yılları için planlanıyor. Elektrik üretimi ve ısınmada rolünün küçük olacağını düşünüyorum.

Rüzgâr, güneş ve hidrolik enerji gibi yenilenebilir kaynaklardan fazla üretim yapıldığı durumlarda hidrojen depolama görevi üstlenmektedir. Depolanan hidrojen gerektiği durumlarda yakıt hücreleri ile elektrik enerjisine çevrimi gerçekleşecektir. Özellikle deniz üzerinde bulunan rüzgâr enerjisi santrallerinde elektrik enerjisini kıyıya ulaştırmak için kablolamaya ihtiyaç bulunmaktadır bu nedenle maliyeti arttırmaktadır. Fakat yerinde hidrojen

üretimi yapılarak, kıyıda depolama tesislerinde hidrojen farklı enerji sistemlerinde kullanılmak üzere depolanabilir (URL 44). K8:

...rüzgâr ve güneş enerjisi gibi değişken kaynaklardan elde edilen fazla enerji hidrojen üretimi için kullanılabilir ve daha sonra ihtiyaç duyulduğunda tekrar kullanılabilir. Bu, enerji sisteminin daha istikrarlı ve güvenilir olmasını sağlar. Enerji üretimi dışında birçok farklı sektörde kullanılabilir.

Bu görüşüyle hidrojen enerjinin enerjiye ihtiyaç duyulduğunda kurtarıcı bir kaynak olduğuna değinmektedir.

Tarım bitkisinin beslenmesi, verimliliğinin artırılması, hızlı büyümesi amacı ile girdi olarak gübre kullanılmaktadır. Gübreler organik ve inorganik gübreler olarak ikiye ayrılmaktadır. Organik gübreler hayvan gübresi, bitki atıkları gibi maddelerden oluşmaktadır. İnorganik gübreler ise kimyasal prosesler yoluyla üretilmektedir.

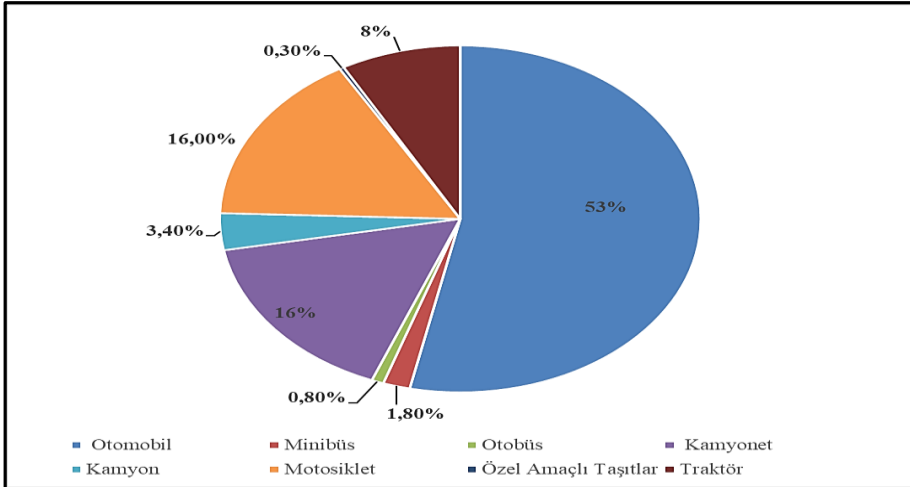
Dünya'da dekar başına ortalama 12,9 kg, Türkiye'de ise dekar başına ortalama 28,3 kg kimyasal gübre kullanılmaktadır. Türkiye bu ortalama ile dünyadan ayrılmaktadır. Türkiye'de gübre kullanımının dünyadan iki katı fark olması nedeniyle ve doğalgaz fiyatlarına bağlı olarak gübre üretim fiyatının artması noktasında çiftçiler olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca Türkiye'deki toprak yapısı sebebiyle özellikle azotlu kimyasal gübrelerin kullanımı daha yaygındır (Türkiye Bankalar Birliği, 2023, s. 15).

Gübre üretiminde en önemli girdilerden biri olan amonyak için hidrojen gereklidir. Hidrojeni elde etmek için ise doğalgaza ihtiyaç duyulmaktadır. Küresel doğalgaz fiyatları arttığında doğrusal olarak gübre fiyatlarında artış yaşanmaktadır. Bu nedenlere bağlı olarak ise gıda fiyatlarında artış yaşanmaktadır. Yeşil hidrojen üretimi doğalgaza bağımlılık gübre sektöründe de yararlı olacağı görülmektedir. Yeşil hidrojen üretiminde birim fiyat düşürüldüğünde amonyak üretimi de çevreyi gözetten bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Bu sayede Türkiye'nin hem gübre ithalatı düşecektir hem de yaptığı fazla üretim ile özellikle Avrupa'ya ve dünyanın geri kalanına amonyak ve gübre ihracatçısı bir ülke konumuna gelecektir. K5, düşüncelerini şu şekilde ifade etmiştir:

...Türkiye için en başta amonyak olabilir Türkiye kendi üretiminden fazla bir tüketimi vardır. Türkiye'de hem gübre sanayi fabrikalar hem de üretim firmaları çok ciddi şekilde amonyak kullanıyorlar ve bu amonyak üretimi Türkiye'nin ihtiyacını karşılamıyor hidrojeni amonyak yapmak

ciddi ve mantıklı bir yatırım olabilir amonyak ihtiyacı kapandıktan sonra metanol yapmak. Metanol de Türkiye için yurtdışından alınan bir ürün bununda hidrojen hammaddesidir, metanolü Türkiye’de üretmek mümkündür. Doğalgaz yerine, hidrojen ile besleyebiliriz doğalgazı yakan fabrikalarda hidrojene geçilebilir bu da büyük ölçüde tüketimi azaltıp dış borçlanmayı ve dışarı bağımlılığını azaltır ve Türkiye için gerekli bir hamle olabilir.

Türkiye’de araç kullanım sayısı yıldan yıla artış göstermektedir. 2022 TÜİK verilerine göre 2004 yılında toplam araç sayısı 10 milyon iken 2022 aralık ayı istatistiklerine göre toplam araç sayısı 26 milyona yükselmiştir. Grafik 24’te görüleceği üzere en fazla paya sahip araç cinsi otomobillerdir. Toplam otomobil sayısı 14 milyondur, otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı ise şu şekildedir; benzinli %26,8, dizel araç %36,9, LPG’li araç oranı %35,1, hibrit araçlar %0,9, elektrikli araç oranı ise sadece %0,1’dir (TÜİK, 2023). Ayrıca Avrupa Birliği 2050 sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda 2035 yılından itibaren benzinli ve dizel araçların üretiminin sonlandırılmasına karar vermiştir. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaştırılması ve sera gazı emisyonlarının sıfıra indirilmesi hedeflenmektedir. Türkiye’de elektrikli araçların yaygınlaşması için altyapının düzenlenmesi, elektrikli araç bakım servislerinin yaygınlaşması ve elektrikli araç fiyatlarının diğer fosil yakıtlı araçlara göre nispeten daha ucuz olması gerekmektedir.



Şekil 37: 2022 yılı Türkiye’deki Araç Sayısının Dağılımı

Kaynak: TÜİK, 2022

Elektrikli araçlar günümüzde yeni bir teknolojidir hali hazırda kullanıma sunulsa da hala geliştirilmeye devam edilmektedir. Elektrikli araçların avantajları sessiz çalışması, hava kirliliğine yol açmaması olarak sıralanabilir. Fakat bataryaların kısa menzilde olması, batarya şarj etme süresinin çok uzun olması elektrikli araçların en büyük sorunlarıdır. Ayrıca elektrikli araçlar kullanıldığında emisyon üretmemektedir fakat şarj istasyonuna sağlanan elektrik enerjisinin fosil yakıttan üretilmiş olması nedeniyle dolaylı olarak sera gazı emisyonu yayılmaktadır.

Hidrojen yakıt hücreli araçlarda ise yakıt dolumu 5 dakika gibi bir sürede gerçekleştirilebilmektedir. Araç menzili konusunda ise hidrojen yakıtlı hücreli araçlar yakıt tankının büyüklüğüne bağlı olarak 400-600 mil (650-960 km) gibi uzun menzile sahiptir. Ayrıca bu araçlar egzoz sistemlerinden su buharından başka salınım yapmamaktadır. Hidrojen yakıtlı araçların dezavantajı ise; altyapı eksikliği mevcuttur, elektrikli araçların altyapısı şu anda hidrojen yakıt hücreli araç altyapısına göre öndedir (URL 45). Hidrojen yakıt hücreli araç üreten ülkelerde kısıtlıdır. Günümüzde küresel çapta hidrojen yakıt hücreli araçlara olan talep de kısıtlıdır. Bunun sebebi ise elektrikli araçlara ve diğer fosil yakıtlı araçlara göre pahalı olması, istasyon ve altyapı eksikliği ayrıca yeni bir teknoloji olması nedeni ile halk arasında talep bulmamaktadır. Yakıt hücrelerinin yakıt ihtiyacı hidrojenle karşılanmaktadır fakat günümüzde hidrojenin büyük bir kısmı fosil kaynaklardan üretilmektedir. Fakat iklim değişikiminin etkilerinin azaltılması ve atmosfere yayılan sera gazı miktarının düşürülmesi için hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi gerekmektedir.

Hidrojenin yakıt olarak kullanımı sadece otomobillerde değil tren, gemi ve hava araçlarında da kullanılabilir. K2 bu konu hakkındaki düşünceleri şu şekildedir:

Devlet demiryollarının bütün trenleri dizel kullanıyor. Dizeli jeneratör ile elektriğe çeviriyorlar ve elektriği trende kullanıyorlar bizde diyoruz ki hidrojen kullanın zaten elektriğe çevirmek kolay hem ucuza mal oluyor yolculuk hem de karbondioksit ve karbonmonoksit atmamış oluyorsun bu iki anlamda çevre için çok faydalı ulaşım ve dekarbonizasyon için çok faydalı.

K8 ise yine ulaşım sektöründeki dizel yakıtı kullanımına değinerek hidrojen yakıtlı araçların önemine vurguda bulunmaktadır. ...hidrojenin son

tüketim noktalarında, ulaştırma sektöründe dizel yakıtının ikamesi (yük taşımacılığı)

...

Özellikle son dönemlerde kullanımı artan dron gibi hava araçlarında en büyük problem uçuş süresi kısalığı ve lityum-iyon pillerinin ağırlığı nedeniyle tam verim alınamamaktadır. Fakat hidrojen yakıt pilleri ile hem uzun bir uçuş süresine sahip olunabilecektir hem de lityum-iyon piller kadar ağır olmadığından dolayı hareket serbestisi artacaktır. Dronlar askeri, tarım, enerji, haritalama, gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Havada kalma süresinin uzaması ile bu alanlarda verimlilik artacaktır. Ayrıca hidrojen yakıtlı pillerin yakıt ikmali ise lityum-iyon pillere göre çok avantajlıdır. K9 bu konu hakkında şunları ifade etmektedir:

Türkiye savunma sanayi artık dronlar, İHA ve SİHA'ları tamamen hidrojen yakıt teknolojisine geçirmeyi planlamaktadır. Bunun iki sebebi bulunmaktadır hidrojen yakıtı ile uçuş süresi ve menzili uzayacaktır, ikincisi ise daha hafif olmasıdır. Bu sayede daha uzun uçuş sürelerine sahip olan dronlar operasyonel olarak daha verimli olacaktır.

SONUÇ

Dünyada son dönemlerde istikrarsız seyreden petrol, kömür ve doğalgaz fiyatları Türkiye üzerinde baskı oluşturmakta ve enflasyona sebep olmaktadır. Türkiye fosil kaynaklar bakımından fakir bir ülke olduğundan dolayı enerjide dışa bağımlı bir ülkedir. Enerji politikaları bağlamında değerlendirildiğinde hidrojen fosil yakıtlar yerine yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi ile üretim gerçekleştirilirse hem temiz hem sürdürülebilir bir aktör olarak yer alacaktır.

Özellikle Covid-19 pandemisi sonrası Ukrayna-Rusya Savaşı küresel enerji politikalarında enerji güvenliği sorunu gün yüzüne çıkarmıştır. Küresel doğalgaz fiyatlarının artışı sonrası dünyada enflasyon rakamları artışa geçmiştir. Bu nedenle ülkelerin ekonomik ve sosyal istikrarında düşüşler yaşanmıştır. Fakat bu olumsuzluklar karşısında özellikle Avrupa Birliği hidrojen enerji teknolojilerine olan yatırım ve politikalara hız kazandırmıştır. Enerji güvenliği ve iklim değişimi kaygıları ülkeleri temiz hidrojen ekonomisine doğru ilerletmektedir. Türkiye de enerji güvenliğini sağlaması ve sektörleri karbondan sıfırlaması için hidrojen ekonomisine önem vermek durumundadır.

Politika yapımcıların temiz enerji üretimine ve temiz enerji teknolojilerine getireceği teşvikler ile ayrıca atmosferi kirletenlere verilen yüksek meblağlı cezalarla yenilenebilir kaynakların kullanımı artacaktır. Bu sayede yenilenebilir kaynaklara olan talep artacağından dolayı temiz hidrojen üretiminin gerçekleşmesi de kolaylaşacaktır.

Hidrojen enerjisi sadece enerji güvenliği ve iklim değişimi açısından değil aynı zamanda yeni iş istihdamı oluşturacak alanlar doğuracaktır. Çünkü hidrojen enerji sistemleri sadece üretim aşamasından oluşmamaktadır. Son tüketiciye ulaşana kadar hidrojen üretimi, hidrojen taşınması, hidrojen depolanması, hidrojen enerji sistemleri teknolojilerinin üretimi, hidrojen yakıt hücreli araçların üretimi, bakımı, onarımı gibi birçok alanda iş istihdamı sağlamaktadır. Ayrıca üniversitelerde hidrojen sistemleri için uzman kişileri yetiştirmek amaçlı istihdam uygulamaları yapılabilmektedir.

Türkiye petrol ve doğalgaz (sırasıyla %93-%99) ithalatına büyük oranda bağımlıdır, bu nedenle ülkenin ekonomik olarak kalkınmasını ertelemektedir. Son on yılda yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi üç kat artmıştır fakat fosil yakıtlara olan bağımlılıkta gözle görülür bir değişim yaşanmamıştır. Sadece elektrik üretiminde değil ısıtma, ulaşım ve sanayi sektörlerinde de enerji dönüşümü için yatırımlar gereklidir. Bu bağlamda hidrojen enerjisi en Türkiye için önemli bir kaynaktır. Yenilenebilir enerji yatırımlarının sürekliliği ile yeşil hidrojen üretimi gerçekleştirilebilir.

Türkiye'de 2000 yılında toplam 8 milyon araç varken 2022 yılında araç sayısı 26 milyona ulaşmıştır, üç katından daha fazla artan araç sayısı Türkiye için daha fazla petrol ithalatı anlamına gelmektedir. Dünya ölçeğinde değerlendirildiğinde hidrojen enerjisine yönelik özellikle son 20 yıllık sürede önemli gelişmeler gerçekleşmiştir. Gelişmiş ülkeler 1970'li yıllarda hidrojen üzerine çalışmalar yapmışlar bu kapsamda prototip araçlar üretmişlerdir. Elektrikli araçlar Türkiye'de toplam araç sayısında %0,2'sini oluşturmaktadır her ne kadar elektrikli araçlar hidrojen yakıtlı araçlara göre ucuz olsa da fosil yakıtlı araçlara dünya ve Türkiye'de talep daha fazladır. Bu sebeple Türkiye'nin yakıt hücrelerine yapacağı AR-GE çalışmaları ve yatırımlar sayesinde fosil yakıt kullanan araçlar yerine hidrojen yakıtlı araçların kullanımının yaygınlaştırılması ve hidrojen yakıtlı araç alacak kişilere teşviklerin sağlanması gerekmektedir.

Türkiye'nin yerli şehir içi ve şehirler arası otobüs üreticisi olan TEMSA, Avrupa'nın önemli hidrojen yakıtlı araç üreticilerinden biri olan Caetanobus ile yapılan anlaşma sonucu hidrojen yakıtlı şehirler arası otobüs üretecek. TEMSA Adana tesisinde üretilen otobüsün ilk prototipi 2024 yılında tamamlanması ve 2025 yılında seri üretime geçmesi hedeflenmektedir. Otobüsün menzilinin ise tek depoyla 1000 km aşacağı belirtilmiştir (URL 46). Özellikle elektrikli araçlardaki en önemli eksiklik menzil problemidir, fakat hidrojen yakıtlı araçlarda bu problem bulunmamaktadır. İkinci olarak elektrikli araçlardaki yakıt ikmal uzun süreleri bulmaktadır, hidrojen yakıtlı araçlarda ise benzin ve dizel araçlarda olduğu gibi kısa sürede dolun yapılmaktadır. Hidrojen yakıtlı araçları ticari ve şahsi olarak kullanmak daha avantajlıdır. Projenin hayata geçmesi ve yaygınlaşması ile şehirler arası otobüs taşımacılığında sıfır emisyonlu ulaşım sağlanacaktır. Bu proje sayesinde hidrojen yakıtlı araçlar, yakıt pili teknolojileri için Türkiye'nin gerekli bilgi ve tecrübeye ulaşmasında fayda sağlayacaktır.

Bununla birlikte yakıt hücrelerinde katalizör olarak kullanılan platin madeni şu an yakıt hücre teknolojilerinde önemli bir hammadDEDİR. Platin rezervlerinin %90'ı Güney Afrika Cumhuriyeti'nde bulunmaktadır, ayrıca dünyadaki platin üretiminde de Güney Afrika Cumhuriyeti birinci sırada yer almaktadır. Rezerv dağılışının asimetrik olmasından dolayı platin madenine talep arttığında sorunlar yaşanabilir. Bu nedenle Türkiye hidrojen enerji teknolojilerini geliştirirken bu sorunu göz ardı etmemelidir.

2023 yılında T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" başlıklı raporda elektrolizör kapasitesinin 2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW, 2053 yılında ise 70 GW yükselmesi hedeflenmektedir. Ayrıca yeşil hidrojen üretim maliyetinin 2030 yılında 2,4 \$/kgH₂, 2053 yılında ise 1,2 \$/kgH₂ altına düşürmeyi hedeflemektedir (ETKB, 2023, s. 19). Bu hedefler doğrultusunda enerji mevzuatının hidrojen enerjisine uygun hale getirilmesi, yenilenebilir enerji teşviklerinin artırılması gerekmektedir. Yeşil hidrojen üretiminde ve depolanmasında (özellikle bor madeni) yerli kaynakların tercih edilmesi gerekmektedir. Yerli teknolojilerin geliştirilmesinde, talep edilmesinde ve yeşil hidrojen kullanımının yaygınlaştırılmasında devlet-özel sektör iş birliği yapılması gerekmektedir. Yerli kaynak ve teknolojileri ile üretilen hidrojenin amonyaka dönüştürülerek veya saf hidrojen halinde ihracatı yapılması

sağlanmalıdır. Hidrojen ticareti açısından zaten Türkiye enerji geçiş noktasıdır. Bunu fırsat bilerek kolayca Avrupa'ya hidrojen ihracatçısı bir ülke konumuna yükselebilir.

Türkiye'nin bir diğer avantajı ise Karadeniz diplerinde bulunan hidrojen sülfür (H_2S) yataklarıdır. İçerisinde hidrojen bulunan zehirli gaz suyun elektrolizi ile aynı işlem yapılmaktadır fakat kükürt ve hidrojen arasında olan bağın su ile olan bağdan daha zayıf olduğundan elektroliz maliyeti daha düşüktür. Hidrojenin üretilmesindeki en büyük sorunlarından bir tanesi maliyettir hidrojen sülfür ile hidrojen üretimi maliyetin düşmesi konusunda katkı sağlayacaktır. Ayrıca Ege Denizi'nde olduğu gibi Karadeniz'de kıta sahanlığı ve münhasır ekonomik bölge sorunları olmadığından dolayı rahatça hareket kabiliyetine sahiptir. Karadeniz'e komşu olan ülkeler ile iş birlikleri sağlanarak hidrojen üretimi daha hızlı gelişebilir.

Paris İklim Anlaşmasını imzalamasından dolayı Türkiye'nin uzun vadeli enerji dönüşümü ve iklim stratejisine ihtiyacı bulunmaktadır. Türkiye enerji dönüşümünü gerçekleştirmesi ve enerjinin karbondan arındırılması konusunda hidrojene büyük önem vermek zorundadır. Yenilenebilir kaynaklarla üretilen hidrojen ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Güneş ve rüzgâr enerjisi teknolojileri yeni olmasına rağmen özellikle 2014 yılından sonra elektrik enerjisi üretiminde \$/mWh başına maliyette ciddi düşüşler yaşamıştır. Bu düşüş hidrojen enerji teknolojilerine yatırım yapmak için önemli bir örnektir.

Hidrojen yenilenebilir kaynaklar ile üretildiğinde ile anlam kazanacaktır. Çünkü fosil kaynaklar bakımından fakir olan ülkeler için hidrojen büyük önem arz etmektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisinin elektrik üretmeye uygun olan konumlarda enerji güvenliği kaygısı çekmeden, temiz, sürdürülebilir bir kaynağa sahip olacaktır. Fakat şu unutulmamalıdır ki hidrojen enerjisi teknolojilerinin ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin yerli kaynaklar kullanılarak üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Türkiye yerli enerji teknolojileri konusunda da çalışmalarına hız vererek bu alanı güçlendirmelidir.

Türkiye yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek bir ülkedir. Fakat özellikle güneş enerjisinde bu potansiyelini tam olarak kullanamamaktadır. Güneşlenme süresi birçok Avrupa ülkesine göre neredeyse iki katıdır. Ancak Türkiye hâlihazırda hem kurulu güç ve hem de güneş enerjisinden elektrik

üretiminde bazı Avrupa ülkelerine (Almanya, İspanya, İtalya) göre geridedir. Ayrıca Türkiye'nin faaliyette olan deniz üstü RES'leri bulunmamaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili olmasına rağmen bu potansiyeli değerlendirmemektedir.

2023 yılı ağustos ayı T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) kapsamında denizüstü RES 4 aday bölge belirlenmiştir. Bunlar Bozcaada kıyıları, Karabiga kıyıları, Gelibolu açıkları ve Balıkesir açıklarıdır. Bu alanlarda deniz üstü RES'lerin kurulması halinde Türkiye'ye önemli bir kazanım olacaktır. Özellikle Balıkesir açıklarında kurulmaya aday olan RES'ler ile şu anda hayata geçen "Güney Marmara Hidrojen Vadisi" projesi birlikte iş birliği yapılarak daha büyük projeler ortaya çıkabilecektir. Rüzgâr kurulu gücünün artması ile yeşil hidrojen üretiminde de artış gerçekleşecektir.

Ayrıca Ordu ilinde 77 MW'lık bir dalga enerji santrali projesi bulunmaktadır. Bu santral Türkiye'nin ilk ve dünyanın en büyük dalga enerji santrali unvanını taşımaktadır. Bu sayede yenilenebilir enerji yeşil hidrojen üretim imkânı çeşitlenmektedir. Hidrojen üretimindeki kaynak çeşitliliği de Türkiye'ye fayda sağlayacaktır.

Nihai olarak Türkiye'de 19,32 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin yaklaşık 5 milyar tonu ise Afşin-Elbistan bölgesindedir. Kahramanmaraş ili sınırları içerisinde yer alan Afşin-Elbistan linyit sahası Türkiye'nin en büyük linyit rezerv sahasıdır. Ayrıca söz konusu sahada elektrik üretimi için termik santraller yer almaktadır. Linyitin gazlaştırılması ile hidrojen elde edilmesi mümkündür. Bu sayede kalorisi düşük olan linyite katma değer katılarak daha değerli hale getirilebilir. Ayrıca bölgede Güney Marmara Hidrojen Vadisi gibi Afşin-Elbistan linyit hidrojen projesi geliştirilerek ulusal ve yerel ölçekte bir kalkınma oluşturulabilir.

KAYNAKÇA

- Akova, İ. (2016). *Enerji Kullanımındaki Değişimler*. Ankara: Nobel Akademik.
- Alberta. (2021). *Alberta Hydrogen RoadMap*. Government of Alberta |.
- Altunışık, M. B. (2013). Ortadoğu'da Bölgesel Düzen ve "Arap Baharı". *Ortadoğu Analiz, Cilt:5, Sayı: 53*, s. 71-78.
- Australian Government. (2019). *Australia's National Hydrogen Strategy*.
- Aydın, F., & Oral, M. (2018). Türkiye'de karayolu ulaşımının tarihsel gelişimi. *Journal of Awareness, 3 (Özel Sayı)*, 257-266.
- Aydın, L. (2020). *Enerji Ekonomisine Giriş*. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- BAKKA. (2013). *2014-2023 Batı Karadeniz Bölge Planı, Cilt 1 Mevcut Durum Analizi*. Batı Karadeniz Kalkınma Teşkilatı.
- Birleşmiş Milletler. (2022). *World Population Prospects 2022*, <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>, Son Erişim: 09.01.2023.
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*. British Petroleum.
- BP. (2023). *Energy Outlook 2023 Edition*. British Petroleum.
- CAFCP. (2020). *California Fuel Cell Partnership*. Cost and financing: <https://h2stationmaps.com/costs-and-financing> adresinden alındı
- Chen, J., Xu, W., Zuo, H., Wu, X., E, J., Wang, T., . . . Lu, N. (2019). System development and environmental performance analysis of a solardriven supercritical water gasification pilot plant for hydrogen production using life cycle assessment approach. *Energy Conversion and Management, 184*, s. 60-73.
- Chester, L. (2010). Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy Policy, 38(2)*, s. 887-895.
- Cipolla, C. (2021). *Dünya Nüfusunun İktisat Tarihi, (çev. M. S. Gezgin)*. İstanbul: Ötügen Yayınevi.
- CSIRO. (2018). *National Hydrogen Roadmap*. Commonwealth Scientific and Industrial Research.
- Çoban, O., & Şahbaz Kılınc, N. (2016). Enerji Kullanımının Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. *Marmara Coğrafya Dergisi, Sayı: 33*, s. 589-606, DOI: 10.14781/mcd.06387.
- Demir, F. M. (2010). *Enerji Oyunu*. Ayrım Yayınları.
- Diñç, Y. (2005). Türkiye demir çelik sektöründe yeni bir teknoloji: sünger demir kullanımı. *III. Demir Çelik Kongresi Bildirisi*. Ankara: Türkiye Makina Mühendisleri Odası (TMMOB).
- Doğan, Z. (2021). Bölgesel Siyasi İstikrarsızlıkların Enerji Arz Güvenliğine Olası Etkileri: Arap Baharı. *International Journal of Politics and Security (IJPS), Cilt. 3, Sayı. 2*, s. 135-168.
- Doğanay, H., & Ogün, C. (2020). *Enerji Kaynakları*. Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık.

- Ediger, V. Ş. (2007). Yeni Yüzyılın Enerji Güvenliğinde Karşılıklı Bağımlılık Bir Zaruret. *Doğalgaz Dergisi*, Sayı: 132.
- EIA. (2016). *Hydrogen for refineries is increasingly provided by industrial suppliers*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=24612>
Son Erişim: 26.01.2022 adresinden alındı
- EIA. (2021). *International Energy Outlook 2021*. Washinton, DC: U.S. Energy Information Administration.
- EMBER. (2022). *Global Electricity Review 2022*. EMBER.
- EMBER. (2023). *Global Electricity Review*. EMBER.
- Energy Institute. (2023). *Statistical Review of World Energy*. Energy Institute.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Ulusal Enerji Denge Tabloları*. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>.
- Erdal, L. (2011). Enerji Arz Güvenliğini Etkileyen Faktörler ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Alternatif, Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Aydın.
- Erdeneer, H., Erkan, S., Eroğlu, E., Gür, N., Şengül, E., & Baç, N. (2010). *Sürdürülebilir Enerji ve Hidrojen*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
- ETİ MADEN. (2022). *Bor Sektör Raporu*. Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, <https://www.etimaden.gov.tr/storage/2022/2021%20YILI%20BOR%20SEKTOR%20RAPORU.pdf>, Son Erişim: 19.10.2022.
- ETKB. (2023). *Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels: European Commission.
- Fanchi, R. (2005). *Energy in The 21st Century*. World Scientific Publishing.
- Gautier, C. (2011). *Petrol, Su ve İklim*. Ankara: Tübitak.
- Gazbir-Gazmer Uluslararası İlişkiler Komisyonu. (2020). *Doğal Gaz Sistemlerinde Hidrojene Geçiş: Avrupa Örneği*. Gazbir-Gazmer.
- GECF. (2022). *Global Gas Outlook*. Doha: Gas Exporting Countries Forum.
- Gobierno de Chile. (2020). *National Green Hydrogen Strategy*.
- Government of Canada. (2020). *Hydrogen Strategy For Canada*.
- GWEC. (2023). *Global Wind Report*. Global Wind Energy Council.
- Haldane, J. (1925). *Daedalus or Science and the Future*. New York: E. P. Dutton & Company.
- Hatunoğlu, E. E. (2010). Biyoyakıt Politikalarının Tarım Sektörüne Etkileri, DPT Uzmanlık Tezleri.
- Hayes, A. (2022). *1973 Energy Crisis*. Investopedia: <https://www.investopedia.com/1973-energy-crisis-definition-5222090#:~:text=The%201973%20energy%20crisis%20was,sell%20crude%20to%20the%20U.S.,> Son Erişim Tarihi: 23.02.2022 adresinden alındı

- Hidrojen Teknolojileri Derneği. (2021). *Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası*. İstanbul: Hidrojen Teknolojileri Derneği.
- HM Government. (2021). *UK Hydrogen Strategy*.
- Hoffman, P. (2012). *Tomorrow 's Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner*. Londra: The MIT Press.
- Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen for Net-Zero: A critical cost-competitive energy vector*. Published Hydrogen Council.
- IEA. (2019). *The Future Of Hydrogen*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2020). *World Energy Balances 2020: Overview*. IEA Publication.
- IEA. (2021). *Key World Energy Statistics 2021*. International Energy Agency.
- IEA. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions- World Energy Outlook Special Report*. IEA.
- IEA. (2021a). *Ammonia Technology Roadmap*. Paris, <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>: IEA.
- IEA. (2021b). *Global Hydrogen Review*. International Energy Agency.
- IEA. (2021c). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. IEA.
- IHA. (2022). *World Hydropower Outlook*. International Hydropower Assosication.
- İlhan, S. (2003). *Jeopolitik Duyarlılık*. İstanbul: Ötüken.
- IRENA . (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020a). *Green Hydrogen A Guide To Policy Making*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020b). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020c). *Reaching Zero With Renewables: Eliminating CO2 Emissions From Industry and Transport in Line With the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency*. Abu Dhabi.
- IRENA. (2021). *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Karanfil , G. (2020). Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri: Termodinamiği, Bileşenleri ve Uygulama Alanları. *Mühendis ve Makina, Cilt:61, Sayı:698*, s. 57-76.
- Kaya, D., Öztürk, H., & Kayfeci, M. (2017). *Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojisi*. İstanbul: Umuttepe Yayınları.
- Kılınç, A. Ç., Çepni, O., Kılcan, B., & Palaz, T. (2017). Öğretim Üyelerinin Görüşlerine Göre Türkiye'de Yeni Kurulan Üniversitelerin Sorunları: Nitel Bir Araştırma. *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 2*, s. 282-293.
- Kılınç, N. (2008). Hidrojen Enerjisinin ve Hidrojen Teknolojilerinin Ekonomideki Yeri Pazar Gelişimi ve Pazar Payı Üzerine Bir

- Araştırma, Yüksek Lisans Tezi. *Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü* .
- Koşar, C. (2021). Hidrojen Depolama Yöntemleri. *Open Journal of Nano*, s. 1-10.
- KPGM. (2021). *Petrol ve Doğalgaz Sektörel Bakış*. KPGM Türkiye.
- Kükreler, B. (2007). Hidrojen Enerjisinin Gelişme Potansiyeli ve Türkiye Ekonomisi Açısından Değerlendirilmesi. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Lacoste, Y. (2020). *Coğrafya Her Şeyden Önce Savaş Yapmaya Yarar*. İstanbul: Ayrıntı Yayınları.
- Lazard. (2023). *Levelised Cost Of Energy Analysis*. Lazard LTD.
- MOEF. (2019). *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*.
- Montgomery, S. L. (2014). *Küresel enerjiye yön veren güçler, (E.G. Şenol, Çev.)*. Ankara: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Yayını.
- Oğuz, T., & Tuğrul, S. (1998). Denizlerimizin Genel Oşinografik Özelliklerine Toplu Bir Bakış. N. Görür içinde, *Türkiye Denizlerinin ve Çevre Alanların Jeolojisi* (s. 1-21). İstanbul: Tübitak Üniversite-MTA.
- Onurbaş Avcioğlu, A. (2017). *Yenilenebilir enerji kaynakları ve teknolojileri. Ayten Onurbaş Avcioğluna ait 2017 Ders Notları*. https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/18484/mod_resource/content/0/YEN%20C4%B0LENEB%20C4%B0L%20C4%B0R%20ENERJ%20C4%B0%20KAYNAKLARI%20VE%20TEKNOLOJ%20C4%B0LER%20C4%B0%202014.pdf (Son erişim: 26.11.2021) adresinden alındı
- OPEC. (2022). *World Oil Outlook 2022-2045*. Vienna: Organization of the Petroleum Exporting Countries.
- Oral , M. (2017). Enerji Coğrafyası Perspektifinde Türkiye'nin Enerji Politikaları, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. Karabük.
- Oral, M. (2020). Sürdürülebilir enerji politikalarının geleceğinde hidrojen enerjisi. *International Journal of Eurasia Social Sciences*, 11(42), 1115-1156.
- 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.
- Samsun, R. C., Antoni, L., Rex, M., & Stolten, D. (2021). *Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update*. Jülich Forschungszentrums, url: <http://hdl.handle.net/2128/28398>.
- Sasaki, K., Wen Li, H., Hayashi, A., Yamabe, J., Ogura, T., & Lyth , S. (2015). Hydrogen Energy Engineering: A Japanese Perspective. K. Okana içinde, *Development Histories: Hydrogen Technologies* (s. 53-92). Fukuoka: Springer.

- Selçuk, I. Ş. (2009). Küresel Isınma, Türkiye'nin Enerji Güvenliği ve Geleceğe Yönelik Enerji Politikaları, T.C. Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. Ankara.
- Sevim, C. (2012). Küresel Enerji Jeopolitiği ve Enerji Güvenliği. *Journal of Yaşar University*, 26 (7), s. 4378-4391.
- Sevim, C. (2019). *Enerji Teknolojileri ve Enerji Yatırım Projeleri*. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- Smil, V. (2017). *Energy Transitions: Global and National Perspective, 2nd Edition*. Santa Barbara, Praeger.
- Spykman, N. S. (2020). *Coğrafya ve Dış Politika*. İstanbul: Doğu Kütüphanesi.
- Statisca. (2021). *Platinum metal reserves worldwide as of 2020, by country*. Statista: <https://www.statista.com/statistics/273624/platinum-metal-reserves-by-country/> adresinden alındı
- TEİAŞ. (2021). *Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2021 Yılı İstatistikleri*.
- TENMAK. (2022). *Bor Rezervi*. <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calismalanlari/rezervler.html> adresinden alındı
- The Federal Government. (2020). *The National Hydrogen Strategy*.
- The World Bank Group. (2005). *Energy Security Issues*. Moscow-Washington DC.
- TKİ. (2022). *Kömür "Linyit" Sektör Raporu*. Ankara: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu.
- TPAO. (2007). *Türkiye'de Petrol Faaliyetleri ve TPAO*. İstanbul: Petro- İş Yayıncı.
- TSKB. (2021). *Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu*. İstanbul: TSKB.
- Tuna, M., Türker, N., Demiral, N. Ö., & Ağaoğlu, D. (2022). *Turizm Ana Planı*. Bozcaada Belediyesi.
- TÜİK. (2022). *Aylık katı yakıt istatistikleri*.
- TÜİK. (2023). *Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri*.
- Türkiye Bankalar Birliği. (2023). *Türkiye Bankalar Birliği Tarım Sektörü Raporu*. İstanbul.
- U.S. Department of Energy. (2020). *Types of Fuel Cells*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells> adresinden alındı
- U.S. Department of Energy. (2021). *DOE Hydrogen Program Record Record 21001: Durability-Adjusted Fuel Cell System Cost*.
- UN. (2022). *Renewable energy – powering a safer future*. United Nations. <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>, Son Erişim Tarihi: 02.03.2023 adresinden alındı
- USGS. (2022). *Mineral Commodity Summaries 2022*. United States Geological Survey, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>, Son Erişim: 19.10.2022.

- Van de Graaf, T., Overland, I., Scholten, D., & Westphal, K. (2020). The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. *Energy research & social science, Cilt: 70*, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101667>.
- Wang, A., Leun, K. v., Peters, D., & Buseman, M. (2020). *European Hydrogen Backbone. Gas for Climate 2050* url: <https://gasforclimate2050.eu/publications/>.
- World Energy Council. (2021). *Working Paper, National Hydrogen Strategies*. London: Published World Energy Council.
- Yan, X. L., Konishi, S., Hori, M., & Hino, R. (2011). Nuclear Hydrogen Production: An Overview. X. L. Yan, & R. Hino içinde, *Nuclear Hydrogen Production Handbook* (s. 47-79). Ohio: CRC Press.
- Yenmez, N. (2011). Stratejik bir maden olarak bor minerallerin Türkiye için önemi. *Coğrafya Dergisi*, s. Sayı:19, s. 59-94.
- Yergin, D. (2006). Ensuring Energy Security. *Foreign Affairs*, 3 (1).
- Yergin, D. (2011). *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World*. New York: The Penguin Press.
- Yergin, D. (2014). *Enerjinin Geleceği (Petrol, Doğalgaz, Elektrik)*. İstanbul: Optimist Yayınları.
- Yüksel, Y. E. (2010). Türkiye'deki Bazı Kömürlerin Gazlaştırılması ile Hidrojen Üretiminin Ekserji Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Zohuri, B. (2018). *Hydrogen energy: Challenges and solutions for a cleaner future*. Albuquerque: Springer.

İnternet Kaynakları

- URL 1: <https://www.iea.org/areas-of-work/ensuring-energy-security>, Erişim Tarihi: 10.12.2022
- URL 2: https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_49208.htm, Erişim Tarihi: 14.12.2022
- URL 3: <https://www.tuicakademi.org/neden-enerji-guvenligi/#:~:text=Enerji%20g%C3%BCvenli%C4%9Fi%20kavram%20olarak%20E2%80%9Cenerji,t%C3%BCketici%20%C3%BClk eye%20transferi%20E2%80%9D%20olarak%20tan%C4%B1mlanabilir>, Erişim Tarihi: 22. 12.2022.
- URL 4: <https://www.gapminder.org/data/>, Erişim Tarihi: 04.01.2023
- URL 5: <https://corporate.exxonmobil.com/energy-and-innovation/outlook-for-energy/global-energy-fundamentals>, Erişim Tarihi: 03.01.2023
- URL 6: <https://www.dyballassociates.co.uk/a-brief-history-of-energy-coal>, Erişim Tarihi: 12.01.2023
- URL 7: <https://about.bnef.com/blog/a-record-495-billion-invested-in-renewable-energy-in-2022/>, Erişim Tarihi: 27.02.2023

- URL 8: <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2022-power-generation-capacity-mw/>, Erişim Tarihi: 05.03.2023
- URL 9: <https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022
- URL 10: <https://hydrogenoptimized.com/history/>, Erişim Tarihi: 07.10.2022
- URL 11: <https://www.joiscientific.com/taming-hydrogen-the-road-to-practical-hydrogen-applications/> Erişim Tarihi: 18.10.2021
- URL 12: https://www.tupolev.ru/en/about/#history_en, Erişim Tarihi: 12.10.2022
- URL 13: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Into-the-future-with-NECAR-and-NEBUS.xhtml?oid=9274425#prevId=7415847>, Erişim Tarihi: 12.10.2022
- URL 14: <https://www.ensonhaber.com/teknoloji/sivi-hidrojenle-calisan-ilk-pilotlu-ucak-havalandi>, Erişim Tarihi: 14.09.2023
- URL 15: <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft/>, Erişim Tarihi: 14.09.2023
- URL 16: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>, Erişim Tarihi: 10.09.2021
- URL 17: <https://www.cummins.com/tr/news/2021/10/04/video-case-study-cummins-hylyzerr-pem-electrolyzer-becancour-quebec>, Erişim Tarihi: 17.01.2022
- URL 18: <https://www.upstreamonline.com/hydrogen/baofeng-energy-brings-worlds-largest-green-hydrogen-project-on-line-in-china/2-1-1161221>, Erişim Tarihi: 02.02.2022
- URL 19: <https://www.nasa.gov/feature/kennedy-plays-critical-role-in-large-scale-liquid-hydrogen-tank-development>, Erişim Tarihi: 21.02.2022
- URL 20: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>, Erişim Tarihi: 20.02.2022
- URL 21: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-pipelines>, Erişim Tarihi: 13.12.2021
- URL 22: https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487, Erişim Tarihi: 02.02.2022
- URL 23: <https://www.upstreamonline.com/hydrogen/baofeng-energy-brings-worlds-largest-green-hydrogen-project-on-line-in-china/2-1-1161221>, Erişim Tarihi 02.02.2022
- URL 24: <https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen/>, Erişim Tarihi: 02.16.2022
- URL 25: https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND, Erişim Tarihi: 17.02.2022

- URL 26: <https://wildsight.ca/2020/06/01/do-we-really-need-steelmaking-coal/>, Erişim Tarihi: 18.02.2022
- URL 27: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>, Erişim Tarihi: 18.10.2021
- URL 28: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>, Erişim Tarihi: 10.09.2021
- URL 29: <https://www.h2stations.org/statistics/>, Erişim Tarihi: 02.03.2022
- URL 30: <https://energytracker.asia/japan-hydrogen-strategy/> , Erişim Tarihi: 28.03.2022
- URL 31: <https://www.csis.org/analysis/south-koreas-hydrogen-industrial-strategy>, Erişim Tarihi: 03.04.2022
- URL 32: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/natural-gas/091721-global-gas-russia-bets-on-hydrogen-future-as-pressure-for-cleaner-fuel-mounts>, Erişim Tarihi: 26.04.2022
- URL 33: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>, Erişim Tarihi: 16.05.2023
- URL 34: <https://www.milligazete.com.tr/haber/16227676/togg-bombayi-patlatti-hidrojen-yakitli-togg-modeli-geliyor>, Erişim Tarihi: 14.09.2023
- URL 35: <https://www.haberes.com.tr/karadenizde-zehirli-hazine-hidrojen-sulfur-h2o-1>, Erişim Tarihi: 30.09.2022
- URL 36: <https://www.kastamonugazetesi.com.tr/karadenizde-dev-enerji-kaynagi/>, Erişim Tarihi: 18.10.2022
- URL 37: <https://beyazgazete.com/haber/2011/10/7/turkiye-nin-ilk-hidrojen-enerjisi-uretim-tesisi-bozcaada-da-hizmete-girdi-799817.html> adresinden, Erişim Tarihi: 14.09.2023
- URL 38: <https://www.gmka.gov.tr/haber/turkiyenin-ilk-yesil-hidrojen-vadisi-kuruluyor>, Erişim Tarihi: 08.06.2023
- URL 39: <https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=20382>, Erişim Tarihi: 04.08.2023
- URL 40: <https://globalwindatlas.info/en>, Erişim Tarihi: 30.06.2023
- URL 41: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>, Erişim Tarihi: 12.06.2023
- URL 42: <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/rezervler.html>, Erişim Tarihi: 14.06.2023
- URL 43: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future>, Erişim Tarihi: 06.08.2023
- URL 44: <https://www.nationalgrideso.com/electricity-explained/how-electricity-generated/how-electricity-generated-using-hydrogen>, Erişim Tarihi: 06.08.2023
- URL 45: <https://bacancysystems.com/blog/hydrogen-vs-electric-cars>, 18.08.2023

- URL 46: <https://www.temsa.com/tr/tr/haberler/temsa-ve-caetanobus-turkiye-nin-ilk-sehirler-arasi-hidrojenli-otobusunu-2024-te-banttand-indirecek-d8LtbNokIzO>, Erişim Tarihi: 18.09.2023
- URL 47: <http://kojenturk.org/tr/kojenerasyon-nedir-15>, Erişim Tarihi: 21.09.2023

HARİTALAR LİSTESİ

Harita 1: Dünya enerji transit noktaları.....	8
Harita 2: Dünya Kömür Rezervlerinin Dağılışı.....	18
Harita 3: Dünya Doğalgaz Rezervlerinin Dağılışı.....	24
Harita 4: 2020 yılında tüketilen hidrojenin küresel ölçekte dağılımı.....	37
Harita 5: Hidrojenin deniz yolu ile taşınması için planlanmakta olan ticaret rotaları.....	50
Harita 6: 2021 yılı dünya toplam ham çelik üretimi.....	58
Harita 7: Dünya Çapında Hidrojen Yakıt Dolum İstasyonlarının Dağılışı ...	62
Harita 8: Hidrojen stratejisini açıklayan ülkeler.....	64
Harita 9: Küresel anlamda hidrojen stratejisi geliştiren/geliştirmekte olan ülkelerin dağılımı	65
Harita 10: Genişleyen tahmini hidrojen ticareti rotası.....	68
Harita 11: Karadeniz'deki H ₂ S Dağılımı.....	73
Harita 12: YEKA aday denizüstü rüzgâr enerji santralleri	75
Harita 13: Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli.....	79
Harita 14: Bor rezervlerinin küresel dağılışı	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Enerji güvenliğinde 4A kavramı	10
Şekil 2: 1830-2022 yılları arasındaki dünya nüfus artışı	15
Şekil 3: Dünya Enerji Tüketimi, (1830-2022).....	15
Şekil 4: Dünya Kömür Tüketimi (1988-2021)	19
Şekil 5: 2020-2050 Yılları Arasında Kaynaklara Göre Birincil Enerji Arzı Tahmini	20
Şekil 6: Dünya Petrol Tüketiminin Sektörel Dağılımı.....	22
Şekil 7: 2000-2019 yılları arasındaki petrol talep artışı.....	22
Şekil 8: 2004-2022 yılları arası yenilenebilir enerjiye olan yatırım	26
Şekil 9: Bölgelere göre 2022 yılı ve tam kapasite potansiyel kurulu güç miktarı	27
Şekil 10: 2009-2023 Yılları arasında elektrik üretiminin kaynaklara göre maliyeti	28
Şekil 11: 2018-2022 yılları arasında karada ve denizde eklenen kurulu güç miktarı.....	29
Şekil 12: Alexander T. Stuart Tarafından İcat Edilen “Stuart Cell”	32
Şekil 13: Tupolev TU-155	34
Şekil 14: Daimler-Benz NECAR 1	35
Şekil 15: Dünyanın ilk sıvı hidrojenle çalışan gösteri uçağı HY4	36
Şekil 16: 2020 Yılı Hidrojen Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	39
Şekil 17: Yenilenebilir kaynaklar ile hidrojenin üretimi dağıtımı ve nihai kullanım alanları.....	41
Şekil 18: Suyun Elektrolizi	42
Şekil 19: Teknolojiye göre, kurulu küresel elektroliz kapasitesi	44
Şekil 20: NASA'nın Florida'da bulunan Kennedy Uzay Merkezindeki sıvı hidrojen tankı	47
Şekil 21: Hidrojen boru hattı malzemeleri maliyet ve işletme basınç tablosu	49
Şekil 22: Dünya genelinde bulunan hidrojen boru hatları	49
Şekil 23: Hidrojenin gaz, sıvı ve yerinde üretimde teslimat biçimleri.....	51
Şekil 24: Dünya platin rezervleri	53
Şekil 25: Günümüzde elektrolizörler ve yakıt pillerinde kullanılan madenlerin tahmini talebi	54
Şekil 26: 2000-2020 yılları arası hidrojen tüketiminin sektörel dağılımı	55
Şekil 27: Hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretimi, depolanması,.....	56
Şekil 28: 2020 yılında endüstri sektöründe hidrojen talebi	57
Şekil 29: Hidrojen yakıtlı bir aracın (FCEV) çalışma prensibi.....	60
Şekil 30: Kullanımda olan FCEV'lerin kıtasal dağılımı.....	61
Şekil 31: Yıllara göre hidrojen yakıt istasyonu sayısı	61
Şekil 32: Küresel Hidrojen Talebinin 2020-2050 Yılları Arasındaki Durumu	63
Şekil 33: Türkiye'nin Toplam Nihai Tüketiminin Sektörel Dağılımı, 2020 ..	69

Şekil 34: Toplam Enerji Arzının Kaynaklara Göre Dağılımı, 2020	70
Şekil 35: 2021 Yılı Türkiye Kaynaklara Göre Elektrik Üretimi.....	71
Şekil 36: Bozcaada hidrojen tesisi	74
Şekil 37: 2022 yılı Türkiye'deki Araç Sayısının Dağılımı	88

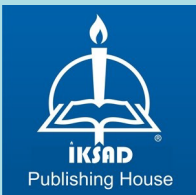
EKLER

Katılımcılara yöneltilen sorular

- 1) Hidrojen Türkiye için önemli bir kaynak olabilir mi?
- 2) Türkiye, hidrojen teknolojilerinde ve hidrojen üretimi konusunda nasıl bir yol izleyebilir?
- 3) Türkiye'nin enerji tüketiminde hidrojen etkili bir kaynak olabilir mi?
- 4) Yakın vadede hidrojen kullanımında hangi alanlar daha fazla öne çıkabilir?
- 5) Küresel iklim değişimi açısından hidrojeni nasıl bir kaynak olarak değerlendiriyorsunuz?

ÖZGEÇMİŞ

Fatih KILIÇ, ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümünde eğitimine başladı ve 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Coğrafya Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.



ISBN: 978-625-367-526-4