

T.C
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANABİLİM DALI
ULUSLARARASI İKTİSAT BİLİMDALI

HİDROJEN EKONOMİSİNİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÖNEMİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Yüksek Lisans Tezi

MÜMİNE KORKMAZ NALBANT

İSTANBUL, 2019

T.C
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANABİLİM DALI
ULUSLARARASI İKTİSAT BİLİMDALI

HİDROJEN EKONOMİSİNİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÖNEMİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Yüksek Lisans Tezi

MÜMİNE KORKMAZ NALBANT

Danışman: Doç. Dr. Y. SERHAT YAŞGÜL

İSTANBUL, 2019



T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

TEZ ONAY BELGESİ

İKTİSAT Anabilim Dalı ULUSLARARASI İKTİSAT Bilim Dalı TEZLİ YÜKSEK LİSANS öğrencisi MÜMİNE KORKMAZ NALBANT'ın HİDROJEN EKONOMİSİNİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÖNEMİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ adlı tez çalışması, Enstitümüz Yönetim Kurulunun 30.05.2019 tarih ve 2019-16/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi 20.06.2019

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

1.	Tez Danışmanı	Doç. Dr. YAŞAR SERHAT YAŞGÜL	
2.	Jüri Üyesi	Doç. Dr. ESRA YÜKSEL ACI	
3.	Jüri Üyesi	Doç. Dr. RANA ATABAY KUŞCU	

GENEL BİLGİLER

İsim ve Soyadı	: Mümine KORKMAZ NALBANT
Anabilim Dalı	: İktisat
Programı	: Uluslararası İktisat
Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Y. Serhat Yaşgöl
Tez Türü ve Tarihi	: Yüksek Lisans – Haziran 2019
Anahtar Kelimeler	: Hidrojen ekonomisi, Hidrojen yakıtı, Yakıt hücreli araçlar, Yakıt hücresi teknolojisi

ÖZET

HİDROJEN EKONOMİSİNİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÖNEMİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

21. yüzyılın enerji kaynağı olarak nitelendirilen hidrojen dünyanın artan enerji ihtiyacını karşılama potansiyeline sahiptir. Çok çeşitli kaynaklardan üretilebilen temiz hidrojen fosil yakıtların en iyi ikamisi durumdadır. Geçmişten günümüze kadar hem elektrik hem de otomotiv sektörü birbirinden bağımsız gelişme göstermiştir. Ancak günümüzde araçlara, hidrojen yakıtından yüksek verimli elektrik üretebilen yakıt hücreleriyle elektrik sağlamak mümkündür.

Alternatif yakıt hidrojen, otomotiv sektöründeki yoğun fosil kaynaklı enerji tüketimini azaltabilir ve yakıt hücreli elektrikli araçlarda kullanıldığında egzoz emisyonlarını ortadan kaldırabilir. Türkiye enerjide yüksek oranda dışa bağımlı bir ülkedir. Verimli yakıt hidrojen Türkiye'nin gittikçe artan fosil yakıt ithalatına çekici bir alternatif oluşturmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'de otomotiv sektörü açısından hidrojen ekonomisinin potansiyeli araştırılmıştır. Hidrojen ekonomisi, Türk otomotiv sektöründeki enerji sorununu çözüme, egzoz emisyonlarını azaltma, zengin bor rezervlerini katma değere dönüştürme ve yakıt hücresi teknolojisine olan eğilimler artarsa Türk otomotiv sektörü için yerli yakıt hücreli elektrikli araçlarını geliştirme gibi önemli fırsatlar sunmaktadır.

GENERAL KNOWLEDGE

Name and Surname : Mümine KORKMAZ NALBANT
Field : Economics
Programme : International Economics
Supervisor : Assoc. Prof. Y. Serhat Yaşgöl
Degree Awarded and Date : Master – June 2019
Keywords : Hydrogen economy, Hydrogen fuel, Fuel cell vehicles,
Fuel cell technology

ABSTRACT

THE IMPORTANCE OF HYDROGEN ECONOMICS IN THE AUTOMOTIVE SECTOR: TURKEY EXAMPLE

Hydrogen, which is regarded as the energy source of the 21st century, has the potential to meet the increasing energy needs of the world. Clean hydrogen, which can be produced from a variety of sources, is the best substitute for fossil fuels. From the past to the present, both the electrical and automotive sectors have developed independently from each other. Nowadays, however, it is possible to provide vehicles with fuel cells capable of generating high efficiency electricity from hydrogen fuel.

Alternative fuel hydrogen can reduce intensive fossil-derived energy consumption in the automotive industry and eliminate exhaust emissions when used in fuel cell electric vehicles. Turkey is highly dependent on foreign energy. Therefore efficient hydrogen fuel constitutes an attractive alternative to Turkey's growing fossil fuel imports. In this study, the potential of the hydrogen economy for the automotive sector in Turkey was investigated. The hydrogen economy offers important opportunities for the Turkish automotive sector to solve the energy problem, to reduce the exhaust emissions, to transform rich boron reserves into added value, and to develop domestic fuel cell electric vehicles in a case if trends in fuel cell technology increase.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

TABLO LİSTESİ	v
GRAFİK LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ KAVRAMI VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇİNDE HİDROJENİN ÖNEMİ	4
2.1. Enerji Kavramı.....	4
2.2 Enerji Kaynakları ve Çeşitleri.....	4
2.2.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları	5
2.2.1.1. Kömür	5
2.2.1.2 Petrol ve Doğalgaz.....	6
2.2.1.3. Nükleer Enerji.....	6
2.2.1.4. Hidroelektrik Enerjisi	7
2.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	9
2.2.2.1. Güneş Enerjisi	10
2.2.2.2. Rüzgâr Enerjisi.....	10
2.2.2.3. Jeotermal Enerji	11
2.2.2.4. Biyokütle Enerjisi	11
2.2.2.5. Deniz Kökenli Yenilenebilir Enerji	12
2.2.2.6. Hidrojen Enerjisi.....	12
2.3. Fosil Kaynak Kullanımının Çevresel Zararları.....	13
3. HİDROJEN EKONOMİSİ.....	17
3.1. Hidrojenin Tarihsel Gelişimi	18
3.2. Hidrojenin Kullanım Alanları	19

3.2.1. Yakıt Hücresi Teknolojisi (Fuel Cell Technology)	21
3.2.1.1. Bazı Yakıt Hücresi Çeşitleri	23
3.3. Yakıt Olarak Hidrojenin Önemi	28
3.4. Hidrojen Altyapısı ve Gelişimi	30
3.4.1. Hidrojenin Üretilmesi	31
3.4.2. Hidrojenin Depolanması ve Taşınması	33
3.4.3. Hidrojen Maliyeti ve Dünya’da Hidrojen İstasyonları	34
4. HİDROJENİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ ÖNEMİ	36
4.1. Dünyada Enerjiye Bakış ve Ulaşım Sektöründe Hidrojenin Potansiyeli	37
4.2. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçların (FCEV) Gelişimi ve Yakıt Hücreli Binek Araçlara Örnekler	38
4.3. Yakıt Hücreli Hibrit Teknolojili Elektrikli Araçlar (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles) (FCHEV)	44
4.4. Dünya’da Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Otobüs Projeleri (FCEB)	45
4.4.1. Avrupa’da Kentsel Ulaşım Projesi 2001-2006 (CUTE)	47
4.4.2. China Fuel Cell Bus Project (Pekin/Çin)	49
4.4.3. Ecological City Transport System (ECTOS) (Reykjavik/İzlanda)	50
4.4.4. Sustainable Transport Energy Program (STEP) 2004-2006 (Perth/Avusturalya)	51
4.4.5. Global Hydrogen Bus Platform HyFLEET: CUTE	52
4.4.6. Hindistan’da Yakıt Hücreli Otobüslerin Gelişimi	55
4.4.7. Clean Hydrogen in European Cities (CHIC)	56
4.4.8. JIVE ve JIVE 2 Projeleri (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe)	57
4.5. Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV) ile Geleneksel İçten Yanmalı Motorlu Araçların (ICE), Hibrit Elektrikli Araçların (HEV) ve Akülü Elektrikli Araçların (BEV), Karşılaştırılması	60
4.6. Hidrojen Enerji Sistemi Önündeki Engeller	66

5. TÜRK OTOMOTİV SEKTÖRÜNÜN HİDROJEN EKONOMİSİNE GEÇİŞ SÜRECİ: SWOT ANALİZİ	67
5.1. Türkiye ve Yenilenebilir Enerji	67
5.2. Türkiye ve Hidrojen Enerjisi	69
5.2.1. Karadeniz'in Hidrojen Sülfür Potansiyeli	70
5.2.2. Sodyum Borhidrür	71
5.2.2.1. Sodyum Borhidrür'ün Yakıt Sisteminde Kullanılması.....	72
5.3. Türkiye ve Yakıt Hücresi Teknolojisi	73
5.4. Türkiye'de Otomotiv Sektörü.....	76
5.5. Türkiye'de Otomotiv Sektörü Açısından Hidrojen Teknolojisinin Potansiyeli: SWOT Analizi.....	81
6. SONUÇ	89
KAYNAKÇA	92

TABLO LİSTESİ

Sayfa No.

Tablo 1 - Birincil Enerji: Dünya’da Yakıt türüne göre tüketim (2000-2017) Milyon ton petrol eşdeğeri (Mtoe)	7
Tablo 2 - Türkiye’de Otomotiv Sektörü Açısından Hidrojen Ekonomisinin SWOT Analizi.....	82



GRAFİK LİSTESİ

	Sayfa No.
Grafik 1- Birincil Enerji: Dünya’da Yakıt türüne göre tüketim (2000)	8
Grafik 2- Birincil Enerji: Dünya’da Yakıt türüne göre tüketim (2017)	8
Grafik 3 - Yakıt hücresi taşıtlarının ve benzeri benzinli taşıt modellerinin yakıt ekonomisi.....	65
Grafik 4 - Türkiye’de birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazında dağılımı (2016)....	68



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1. PEM tipi yakıt hücresinin çalışma şeması.....	25
Şekil 2. PEM tipi yakıt hücresini oluşturan elemanlar.....	25
Şekil 3. Yakıt Hücreli Elektrikli Araç	40
Şekil 4. Bir araca yerleştirilen yakıt hücresi ve ekipmanları	72



KISALTMALAR

BEV	Akülü Elektrikli Araç
BP	British Petroleum
CHIC	Clean Hydrogen in European Cities
CO₂	Karbondioksit
CUTE	Clean Urban Transport for Europe
ECTOS	Ecological City Transport System
FCEB	Yakıt Hücresi Elektrikli Otobüs
FCEV	Yakıt Hücresi Elektrikli Araç
FCH JU	Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking
FCHEV	Yakıt Hücresi Hibrit Elektrikli Araçlar
FCPHEV	Yakıt Hücresi Plug-in Hibrit Elektrikli Araç
FCS	Yakıt Hücresi Yığını (Fuel Cell Stack)
Fuel Cell	Yakıt Hücresi/Pili Teknolojisi
H₂S	Hidrojen Sülfür
HES	Hidroelektrik Santrali
HEV	Hibrit Elektrikli Araç
HFCB	Hidrojen Yakıt Hücresi Otobüs
HICEB	Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Otobüs
HyFLEET:	Global Hydrogen Bus Platform
CUTE	
ICE	İçten Yanmalı Motor
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
JIVE	Joint Initiative For Hydrogen Vehicles Across Europe
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi
NaBH₄	Sodyum Borhidrür
PEMFC	Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi
PHEV	Plug-in Hibrit Elektrikli Araç
STEP	Sustainable Transport Energy Program
TTW	Tank-To-Wheel

WTO	Dünya Sağlık Örgütü
WTT	Well-To-Tank
WTW	Well-To-Wheel Analizi



1. GİRİŞ

Dünya nüfusunda meydana gelen artış ve yaşam standartlarının yükselmesi dünyada enerji talebini arttırmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacı coğrafi olarak kısıtlanmış olan fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Dünyadaki birincil enerji üretiminde en büyük pay petrole aittir ve fosil yakıtların 2020 yılındaki toplam paylarının % 88.5 olacağı öngörülmektedir¹. Özellikle Sanayi Devrimi'nden günümüze fosil yakıtlar hayatımızın en önemli parçası haline gelmiştir. Birincil enerji kaynakları olan petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlar, rezervleri sınırlı yakıtlar oldukları için dünyanın artan bu enerji talebine uzun vadede cevap verebilmesi beklenmemektedir. Çünkü mevcut durumda dünyada fosil yakıtlara ait rezervlerin; petrolde kırk (40) yıl, doğalgazda altmış iki (62) yıl, kömürde ise iki yüz on altı (216) yıl yetecek miktarda olduğu bilinmektedir. Bu durum dünyayı alternatif yenilenebilir enerji arayışına yönlendirmiştir².

Ayrıca artan fosil yakıt kullanımı hava kirliliğine, küresel ısınmaya, iklim değişikliklerine neden olmakta ve ciddi ekonomik, çevresel ve sağlık sorunlarını beraberinde getirmektedir³. Yüksek enerji talebi olan ülkelerin mevcut ekonomik gelişimi fosil yakıtlara dayandığından daha yüksek sera gazı emisyonuna sahiptirler. Dünyada enerjiye olan talep artıkça sera gazı emisyonları da artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, enerji sektörü CO₂ emisyonlarını 2030'da % 50'den 2050'ye % 80'e çıkacağını öngörmektedir. Ayrıca dünya nüfusunun 2025 yılında yaklaşık 7.5 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bütün bunlar düşünüldüğünde enerji talebi ve aranan sera gazı emisyonlarının dünyanın ortak sorunu olduğu görülmektedir⁴.

Dünya, tükenmesi kaçınılmaz olan fosil kaynakların yerine temiz, güvenilir, yenilenebilir enerji arayışına yönelmiştir. Güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen gibi alternatif

¹ Özlem Candan Külekçi, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi", **Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi**, Ankara, Cilt 1, Sayı 2, (2009), S 84.

² Emre Üren ve Esra Soylu, "Türkiye' nin Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine Bir Değerlendirme", **Sosyal Bilimler Dergisi ICEBSS**, Özel Sayısı, (Kasım 2016), S 36.

³ Emre Yiğit, "Renewable Energy Resources and Environment", **Journal of International Management, Educational and Economics Perspectives**, Vol 4, No 2, (2016), S 32.

⁴ Tatiane da Silva Veras ve diğerleri, "Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide", **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 4, (Jan 2017), S 2019.

yenilenebilir enerji kaynakları artan küresel enerji talebine cevap verebilir ve kirletici maddelerin atmosfere salınımını, sera gazı etkisini önemli ölçüde azaltabilir.

Bu çalışmada, alternatif yakıt olarak hidrojenin (yakıt hücresi teknolojisi vasıtasıyla) tüm sektörleri destekleyen otomotiv sektöründe kullanılmasının önemi, hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçların (FCEV) geleneksel içten yanmalı ve diğer araçlara kıyasla yüksek rekabet gücü ortaya konulmuştur. Yeni bir teknoloji olan, hızla gelişen ve dünyada potansiyel pazar ve rekabet alanı olarak görülen yakıt hücreleri ele alınmış ve Türkiye'de geliştirilen yakıt hücreleri araştırılmıştır. Ayrıca hidrojenin çözüme kavuşturacağı sorunlar üzerinde durulmuş, yakıt olarak hidrojenin yakıt hücreleri vasıtasıyla otomotiv sektöründe kullanılmasının Türkiye açısından SWOT Analizi yapılarak, Türkiye'nin otomotiv sektöründe enerji sorunu gidermek açısından büyük potansiyel oluşturduğu ve Türk otomotiv sektörüne yerli yakıt hücresi elektrikli araçlarını üretme imkanı sunduğu sonucuna varılmıştır.

Bu araştırmada akademik makaleler, kitaplar, süreli yayınlar, raporlar, projeler ve elektronik kaynaklardan faydalanılmıştır.

Birinci bölümünde yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarına, ikinci bölümde ise; hidrojen ekonomisinin önemine, hidrojenin alternatif yenilenebilir enerji olarak kullanım alanlarına, yakıt olarak hidrojenin önemine ve yakıt hücresi teknolojisine, hidrojenin üretiminden- taşınmasına-depolanmasına kadar olan süreç ve dünyada hidrojen altyapısının geldiği son nokta ele alınacaktır.

Üçüncü bölümde dünyanın enerjiye bakışı, enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin otomotiv sektöründeki önemine, dünyada hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçların (çevre dostu) otomotiv sektöründe uygulamalarına, dünyadaki yakıt hücresi elektrikli otobüs projelerine ve hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçların geleneksel içten yanmalı motor teknolojisi ve diğer araç teknolojilerine karşı rekabet gücüne yer verilecektir.

Dördüncü son bölümde ise hidrojen enerjisinin Türkiye açısından oluşturduğu potansiyel, Türkiye ekonomisi açısından Türk otomotiv sektörünü yeri ve önemi, ve Türkiye’de geliştirilen yakıt hücreleri ele alınacaktır. Ayrıca Türkiye’de Otomotiv sektörü açısından hidrojen teknolojisinin Potansiyeli: SWOT Analizi yapılacaktır.



2. ENERJİ KAVRAMI VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇİNDE HİDROJENİN ÖNEMİ

2.1. Enerji Kavramı

Basit anlamda enerji, iş yapabilme yeteneği ya da kapasitesi olarak ifade edilebilir. Canlı ya da cansız herhangi bir maddenin bir yerden başka bir yere hareketi ya da fiziksel, kimyasal olarak formunun değişmesi durumu bir iştir ve enerji kullanımı gerektirir⁵.

Enerji kavramının önemi 1970’li yıllardaki petrol krizi sonrasında giderek artmıştır. Enerji günümüzde insan yaşamı ve sürdürülebilirliği için vazgeçilmez olmuştur. Geleneksel enerji kaynaklarının (petrol, doğalgaz, kömür, nükleer enerji) dünya üzerinde eşitsiz olarak dağılmış olması ve bu kaynakların rezervlerinin sınırlı olması ülkeler açısından enerjinin önemini daha da artırmaktadır. Mevcut geleneksel enerji kaynaklarına sahip ülkeler diğer ülkelere göre ekonomik olarak daha avantajlı durumdadır. Bu ülkeler sahip oldukları kaynaklar sayesinde üretim maliyetlerini düşürebilmekte, dış ticarete rekabet gücünü artırabilmekte ve ekonomik büyümelerini hızlandırabilmektedirler⁶. Geleneksel enerji üretim ve tüketimi çevreye zarar vermekle birlikte yerel, bölgesel ve küresel düzeyde olumsuzluklara neden olmaktadır. Ayrıca enerjide kaynak çeşitliliği en az seçilen kaynakların erişilebilirliği kadar önemlidir⁷.

2.2 Enerji Kaynakları ve Çeşitleri

Enerji kaynakları ikiye ayrılmaktadır ve bunlar; yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır.

⁵ Filiz TUTAR ve Mehmet Vahit EREN, “Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomist ve Türkiye”, **Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi**, Cilt 3, Sayı 6, (Kış 2011), S.2.

⁶ Okyay Uçan ve Ekrem Kaçar, “ENERJİ Tüketimi, Ekonomik Büyüme ve Nüfus İlişkisi: Türkiye: Örneği”, **Verimlilik Dergisi**, Sayı 2, (2017), Ss 1-2.

⁷ KÜLEKÇİ, S 84.

2.2.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları

Sanayi devrimi sonrası enerjiye olan talebin artmasıyla birlikte 1970’li yıllarda yaşanan petrol krizi sonrası, enerji sorunu ortaya çıkmıştır. 1970’lerden sonra teknolojik ilerlemelerden dolayı artan sanayileşme, enerjiye olan talebi daha da artırmıştır. Bütün dünya artan enerji talebini karşılamak için geleneksel enerji kaynaklarına yönelmiştir⁸.

Yenilenemeyen enerji kaynakları rezervleri sınırlı tüketilen enerji kaynaklarıdır. Petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtlar ve nükleer enerji yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Dünyada kullanılmakta olan enerjinin büyük bir kısmı hala bu kaynaklardan sağlanmaktadır⁹.

Fosil yakıt kullanımı doğaya zarar vermekte ayrıca canlı yaşamını da olumsuz yönde etkilemektedir. İklim değişikliğinin yanı sıra bölgesel kuraklıklara veya aşırı yağışlara neden olmaktadır. Gelişen dünyayla birlikte artan enerji talebi daha fazla fosil kaynak tüketimine neden olmakta ve bunun sonucunda ciddi çevre tahribatları görülmektedir. Fosil kaynak kullanılması sonucu oluşan sera gazı emisyonları ozon tabakasına da zarar vermektedir. Nükleer Santrallerden çıkan radyoaktif atıkların çevreye ulaşımı sonucu denizler, göller ve toprak bundan zarar görmektedir¹⁰.

2.2.1.1. Kömür

Enerji kaynaklarının kullanım tarihçesine baktığımızda en eski yenilenemez enerji kaynağı kömürdür. 2015 BP verilerine göre dünya kömür rezervlerinin (891.5 milyar ton) en yoğun olduğu bölgeler Avrupa ve Avrasya bölgeleridir¹¹. Kömür civa kirliliğine, asit

⁸ İlknur Demir, Cem Emeksiz, “Potential and Use of Renewable Energy Resources in Turkey”, **Journal of New Results in Science**, Cilt 5, Sayı 12, (2016), S 82.

⁹ Yiğit, S 19.

¹⁰ Zehra Deniz Yakıncı, Mediha Kök, “Yenilenebilir Enerji ve Toplum Sağlığı”, **İ.Ü. Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi**, Cilt 5 Sayı 1, (2017), Ss 46-47.

¹¹ Cuma Bozkurt, Aslı Şentürk, “Yenilenebilir Enerji ve Ekonomik Büyüme: Avrupa Birliği ve Türkiye Üzerine Bir Araştırma”, **Journal of International Trade and Economic Researches**, Cilt 1, Sayı 2, (2017), S 3.

yağmurlarına vb sebep olduğu için çevre dostu bir enerji türü değildir. Dünyaki fosil yakıt rezervlerine bakıldığında yalnızca iki yüz on altı (216) yıl yetecek kadar kömür rezervi bulunmaktadır¹².

2.2.1.2 Petrol ve Doğalgaz

20. yüzyılda dünyada en çok kullanılan yenilenemeyen enerji kaynakları petrol ve doğalgazdır. Özellikle sanayi devrimi sonrası enerjiye olan yönelim artmış ve I. Dünya Savaşı sonrasında enerjiye olan talebin artmasıyla bu alandaki eğilimler hız kazanmıştır. Fosil kaynaklı yenilenemez enerji kaynağı petrolün dünyada birçok bölgede rezervleri bulunmasına rağmen kalitesinde ve ortaya çıkarılmasında farklılıklar bulunmaktadır. Petrol rezervlerinin en yoğun olduğu bölge Ortadoğu Bölgesidir. Bu sıralamayı Latin Amerika, Orta Asya, Afrika bölgeleri takip etmektedir. Günümüzde mevcut petrol rezervlerinin enerji talebini ancak kırk (40) yıl karşılayabileceği bilinmektedir. Fosil kaynaklı diğer önemli bir enerji kaynağı doğalgazın en yoğun bulunduğu bölge petrol gibi Ortadoğu'dur. Ayrıca Avrupa-Asya, Afrika gibi bölgeler de diğer rezerv bölgeleridir¹³. Doğalgazın petrol ve kömüre göre daha temiz bir enerji kaynağı olması sebebiyle çevre kirliliğine etkisi diğer yenilenemez enerji kaynaklarından çok daha azdır¹⁴. Günümüzde mevcut doğalgaz rezervlerinin enerji talebini ancak altmış iki (62) yıl karşılayabileceği bilinen bir gerçektir¹⁵

2.2.1.3. Nükleer Enerji

Uzun yıllar enerji ihtiyaçlarını petrol ve doğalgazdan karşılayan ülkeler 1970'lerdeki petrol krizi sonrası nükleer enerjiye yönelmişlerdir. Kurulan nükleer santraller ile ülkeler enerji arzı yaratmayı ve tüketilen enerjinin bir kısmını nükleer enerjiden sağlayıp dışa bağımlılıklarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Santrallerde yakıt olarak yenilenebilir olmayan uranyum kullanılmaktadır. Ayrıca bu yakıtın ortaya çıkardığı atıklar çevreye ciddi zararlar

¹² Üren ve Soylu, S 36.

¹³ Afşin Güngör, Beste Şimşek, Ali Ö. Akyüz, "Global Enerji Eğilimleri ve Yenilenebilir Enerji Dinamikleri Üzerindeki Etkileri", **Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)**, Cilt 7, Sayı 2, (2018), S 2.

¹⁴ Gultekin, A.H. ve Orgun, Y, "Natural Gas and Environment", **Ecology Environment Magazine**, Cilt 9, (1993), S 37.

¹⁵ Üren ve Soylu, S 36.

vermektedir. Örneğin; Günümüzde bir nükleer enerji tesisi (350 GW kurulu kapasiteye sahip), bir yılda on (10) bin ton nükleer atık üretmektedir¹⁶.

2.2.1.4. Hidroelektrik Enerjisi

“Hidroelektrik, sudaki potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülerek elektrik üretilmesidir”. Hidroelektrik santraller, suyun potansiyel enerjisinden faydalanarak elektrik üreten santrallerdir. Hidroelektrik santralleri çevre dostu enerji üretmezler. Bunun sebebi ise, doğal suyun akış sisteminin değiştirilmesidir. Akarsuyun akış sisteminin değişmesi sonucu kültürel ve tarihi bölgeler sular altında kalmakta, kıyılarda ise aşırı erozyona neden olmaktadır. Bunun yanı sıra HES’ler ekosistemde önemli değişikliklere neden olmakta ve canlı türleri bu durumdan olumsuz etkilenmektedir¹⁷.

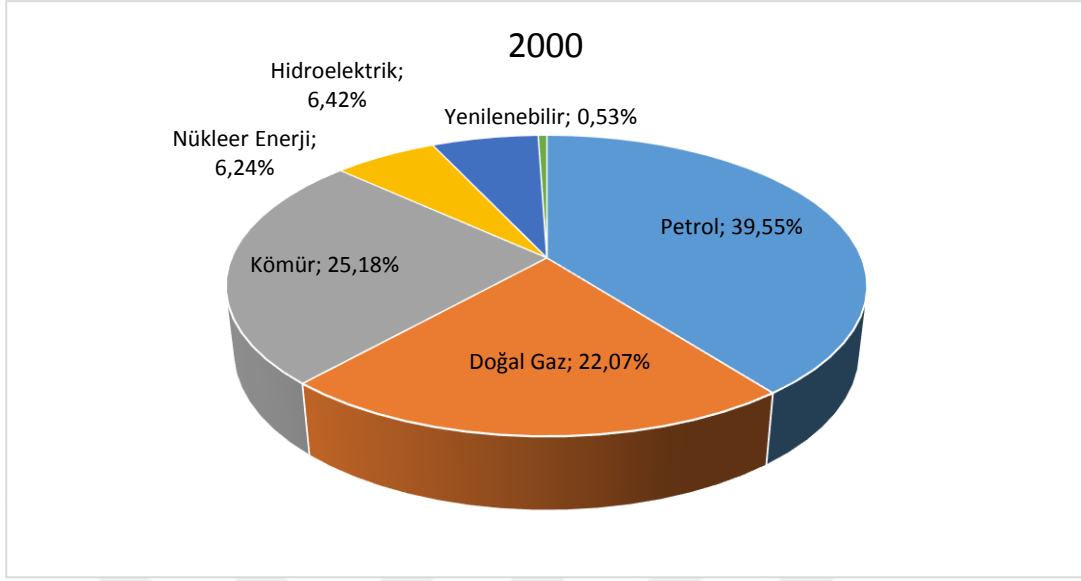
Tablo 1
Birincil Enerji: Dünya’da Yakıt türüne göre tüketim (2000-2017) Milyon ton petrol eşdeğeri (Mtoe)

	Petrol	Doğal Gaz	Kömür	Nükleer Enerji	Hidroelektrik	Yenilenebilir	Toplam
2000	3700.7	2065.3	2356.3	584.0	600.7	49.3	9356.4
2001	3733.5	2095.2	2394.8	600.5	585.3	52.2	9461.5
2002	3765.8	2158.9	2488.1	610.1	596.0	58.8	9677.7
2003	3852.4	2215.8	2706.4	597.7	595.0	63.9	10031.2
2004	3998.6	2300.3	2893.9	623.9	635.4	73.0	10525.1
2005	4051.2	2367.8	3105.7	626.6	660.3	82.1	10893.6
2006	4104.2	2437.5	3265.7	634.4	685.7	92.9	11220.3
2007	4167.8	2543.4	3451.8	621.5	696.9	107.0	11588.4
2008	4148.8	2607.2	3500.6	619.5	738.5	123.9	11738.5
2009	4077.6	2534.6	3447.0	610.8	736.2	143.7	11549.9
2010	4208.9	2730.8	3605.6	626.2	777.5	170.5	12119.4
2011	4252.4	2786.8	3778.9	600.0	792.7	203.5	12414.4
2012	4304.9	2860.8	3794.5	559.5	830.7	238.7	12589.0
2013	4359.3	2899.0	3865.3	563.8	859.4	282.6	12829.3
2014	4394.7	2922.3	3862.2	575.0	879.7	320.1	12953.9
2015	4475.8	2987.3	3765.0	582.8	880.5	368.8	13060.2
2016	4557.3	3073.2	3706.0	591.2	913.3	417.4	13258.5
2017	4621.9	3156.0	3731.5	596.4	918.6	486.8	13511.2

Kaynak: British Petroleum Statistical Review of World Energy 2018

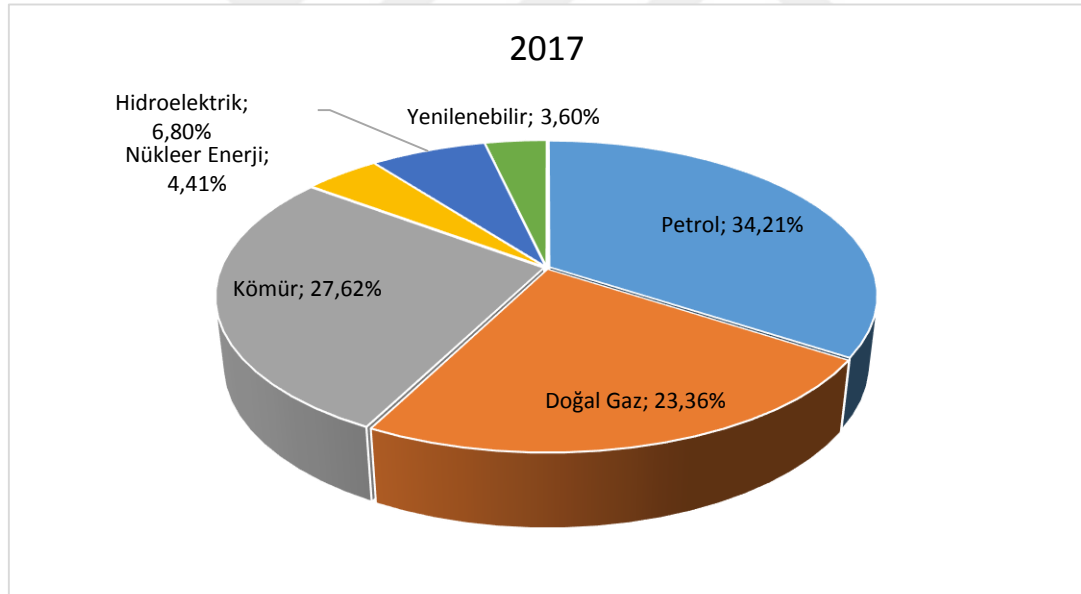
¹⁶ Hakan KUM, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Dünya Piyasalarındaki Son Gelişmeler Ve Politikalar, **Erciyes University Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences**, Cilt 0, Sayı 33, (2009), S 209.

¹⁷ Murat Yaman, Fatih Haşıl, “Türkiye’deki Hidroelektrik Santrali (Hes) Uygulamalarına Çevre Açısından Bakış”, **Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi**, Sayı 5, Ss 146-148.



Grafik 1- Birincil Enerji: Dünya’da Yakıt türüne göre tüketim (2000)

Kaynak: British Petroleum Statistical Review of World Energy 2018



Grafik 2- Birincil Enerji: Dünya’da Yakıt türüne göre tüketim (2017)

Kaynak: British Petroleum Statistical Review of World Energy 2018

Hali hazırda dünyada tüketilen enerjinin büyük bir bölümünü birincil enerji kaynakları oluşturmakta ve bu enerjinin büyük kısmını petrol, doğalgaz ve kömür gibi dünyaya homojen şekilde dağılmamış fosil yakıtlar olan yenilenemez enerji kaynakları oluşturmaktadır. 2000 yılı verilerine göre, dünyada tüketilen toplam birincil enerji miktarı dokuz bin üç yüz elli altı (9356) Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olup tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı

petrol (%39.55), kömür (%25.18), doğal gaz (%22.07), hidroelektrik (%6.42), nükleer (%6.24) ve yenilenebilir (%0,53) şeklinde sıralanmaktadır.

2017 yılı verilerine göre, dünyada tüketilen toplam birincil enerji miktarı on üç bin beş yüz on bir (13.511) Mtep olup tüketilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı petrol (%34.21), kömür (%27.62), doğal gaz (%23.36), hidroelektrik (%6.80), nükleer (%4.41) ve yenilenebilir (%3,60) şeklinde sıralanmaktadır. Sayısal verilerde görüldüğü üzere tüketilen enerji miktarı içerisinde yenilenebilir enerjinin payı hala oldukça düşüktür.

2000-2017 yıllarındaki birincil enerji tüketimi karşılaştırıldığında enerji tüketiminin yaklaşık dört bin yüz elli beş (4155) Mtep arttığı görülmektedir. Enerji tüketimi içerisinde yenilenemez olan petrol ve nükleer enerjinin payı azalırken 2000 yılına göre hidroelektrik ve yenilenebilir enerjinin payında artış meydana gelmiştir.

2.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, belli bir ömrü olmayan yani belli sürede kendini yenileyebilen ve çevremizde doğal haliyle mevcut olan enerji kaynaklarıdır. Fosil yakıtlar gibi sınırlı rezervli olmayan, insanoğlu varlığı süresince ona hizmet edebilecek olan kaynaklardır. Ayrıca çevre dostu olan bu enerjiler karbon kökenli olmadıkları için küresel ısınmaya da neden olmazlar. Yenilenebilir enerji çevre ve insanlık için birçok avantaja sahip olsa da nispeten yüksek maliyetli olmaları yaygınlaşmalarında büyük engeldir. Bugün dünyada özellikle gelişmiş ülkeler çeşitli teşvik uygulamaları ve projelerle yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılmasını amaçlanmaktadır. Dünyada artan enerji talebi ve enerji maliyetleri ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir¹⁸.

¹⁸ TUTAR ve EREN, S 3.

2.2.2.1. Güneş Enerjisi

Yeryüzünden kilometrelerce uzakta olan; dünyayı ısıtan ve sürekliliği sağlayan güneş, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Sonsuz bir güce sahip olan güneş dünyamızın ve diğer tüm gezegenlerin enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, enerjiyi güneş ışığından ısıya veya elektriğe dönüştürmek için kullanılmakta olan çevre dostu temiz, tükenmez enerji kaynağı olarak nitelendirilir¹⁹.

Güneş enerjisinin dünyada bolca bulunması, sonsuz ve temiz bir enerji olması, enerjide dışa bağımlı olunmaması, güneş enerji sistemlerinin güvenilir olması, basit yapıda olması (kurulumunun basit olması), güneş enerji sistemlerinin kolayca taşınabilir olması gibi avantajlardan dolayı dünyada kullanımı günden güne artmaktadır²⁰.

2.2.2.2. Rüzgâr Enerjisi

“Rüzgâr enerjisi, güneş ışınlarının dünya yüzeyini farklı ısıtması sonucu oluşan bir enerji türüdür”. Yer yüzeyinde meydana gelen farklı ısınmalar basınç, nem ve hava sıcaklığı gibi faktörleri farklılaştırmakta dolayısıyla havanın hareket etmesine neden olarak rüzgârı oluşturmaktadır²¹.

Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtlardan elde edilen enerjiye göre daha maliyetli olmasına rağmen verimli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi çevre dostu bir enerji olması, dışa bağımlılığı azaltması, kurulumunun kolay olması, yerli ve her zaman kullanılabilir olmasından dolayı dünyada tercih edilen bir enerji türüdür. Üretiminin rüzgâra

¹⁹ Üren ve Soylu, S 36.

²⁰ Yiğit, S 20.

²¹ Eylem Önal ve Rahmiye Zerrin Yarbay, “Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği”, **İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt 9, Sayı 18, (2010), Ss 77-96.

bağlı olması, büyük alan kaplaması ve manzarayı bozduğu gerekçesiyle eleştirilmesi dezavantajlarıdır²².

2.2.2.3. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji: “Yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde bulunan, yeryüzündeki havzalardan beslenen sularla potansiyelini oluşturan birikmiş ısıнын meydana getirdiği sıcaklıkları bölgesel olarak değiştiren, bünyesinde daha çok erimiş mineral tuzlar ve gazlar içeren su ve buhardan oluşan bir hidrotermal kütledir”. Eğer yer kabuğunda doğal su dolaşımına imkân sağlayan kırıklar yoksa ve ısı birikimi varsa oluşturulacak yapay kırıklar sayesinde yine enerji elde edilebilir²³.

Yeryüzünün çeşitli derinliklerinde biriken ısı; elektrik üretimi, soğutma ve ısınmada çeşitli endüstriyel tesislerde enerji hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Jeotermal enerjinin çevre dostu enerji olması, pek çok kullanım alanının olması, hava koşullarından etkilenmiyor oluşu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması gibi oldukça önemli avantajları vardır. Fakat günümüzdeki mevcut teknolojilerle, sadece jeotermal kaynakların yeryüzüne ulaştırılabildiği yerlerde jeotermal enerjinin üretilmesine imkân sağlamaktadır. Dünya, artan maliyetlerden dolayı geliştirecek teknolojilerle enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü gelecekte jeotermal enerjiden sağlamayı hedeflemektedir²⁴.

2.2.2.4. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisinin kaynağını, bitkisel ve hayvansal kökenli tüm doğal maddeler oluşturmaktadır²⁵. Biyokütle enerjisi dünya genelinde en çok yayılmış yenilenebilir enerji

²² TUTAR ve EREN, S 4.

²³ Üren ve Soylu, S 39.

²⁴ Emre Çıtar ve Pınar Buket Kılıç Pala, “Yenilenebilir Enerjinin Enerji Güvenliğine Etkisi”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, Cilt 3, Sayı 25, (2016), S 85.

²⁵ Mutlu, Yılmaz, “Türkiye’nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi”, **Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi**, Cilt 4, Sayı 2, (2012), Ss 33-54.

türüdür. Ayrıca ısıtmadan elektrik üretimine, araç yakıtından mevcut petrokimya ürünlerinin üretilmesine kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır²⁶.

2.2.2.5. Deniz Kökenli Yenilenebilir Enerji

Okyanuslardan ve denizlerden gelen enerji kaynakları, artan enerji talebini karşılayabileceği düşünülen alternatif enerji kaynakları olarak nitelendirilmektedirler. Bu enerji türleri; Deniz akıntıları enerjisi (boğazlarda), Deniz dalga enerjisi, Deniz sıcaklık gradyant enerjisi ve Gel-git'tir (medcezir). Okyanuslardan sağlanan en önemli enerji kaynakları gelgit ve dalga enerjileridir. Gelgit enerjisi, suların yükselmesi ve düşmesinden faydalanılarak elektrik üretilmesidir. Dalga enerjisi ise, denizlerde ve okyanuslarda dalgaların kullanılmasıyla sağlanan enerji kaynağıdır. Gelgit enerjisi ise, suların yükselmesi ve düşmesinden faydalanılarak elektrik üretilmesidir²⁷. Deniz kökenli yenilenebilir enerjiler temiz bir enerji kaynağı olmaları ve denize kıyısı olan ülkeler için kolay, ucuz olmaları gibi avantajlar sağlarken, denize kıyısı olmayan ülkeler için bu enerji türü pahalıdır ve enerji iletimi zordur²⁸.

2.2.2.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, Yunanca “hidro” ve “genes” kelimelerinden gelmektedir, “su” ve “jeneratör” anlamına gelir. Periyodik tablodaki ilk element olan hidrojen, evrendeki en az karmaşık olan ve en bol bulunan elementtir. Hidrojen aynı zamanda gezegen yüzeyinin % 60 (altmış) 'ından fazlasını kaplayan suyun önemli bir bileşenidir²⁹. Bunun yanı sıra renksiz, kokusuz havadan on dört tam yüzde dört (14.4) kez hafif ve zehirsiz bir gazdır³⁰. Hidrojen doğada bileşikler halinde bulunur ve bundan dolayı doğal bir enerji kaynağı değildir. Fakat hidrojen birçok kaynaktan yararlanılarak üretilebilmektedir. Hidrojen geleceğin alternatif

²⁶ Çıtar ve Pala, S 85.

²⁷ Yiğit, S 22.

²⁸ TUTAR ve EREN, S 5.

²⁹ Umar K. Mirza ve değerleri, “A vision for hydrogen economy in Pakistan”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 13, No 5, (June 2009), S 1112.

³⁰ Önal ve Yarbay, S 91.

enerji kaynağı olarak nitelendirilmektedir. Ayrıca herhangi bir fosil yakıt içermediği için çevreye bir zararı bulunmamaktadır³¹.

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye verdikleri ciddi zararlar sebebiyle, çevre zarar vermeyen “Geleceğin Enerjisi” olarak nitelendirilen hidrojen ortaya atılmıştır. Hidrojen kolaylıkla her yere güvenli şekilde taşınabilir ve taşınması esnasında enerji kaybı çok azdır. Ayrıca sanayide, evlerde ve taşıtlarda kullanılabilen hidrojen, kolaylıkla ısı, elektrik, ve mekanik enerjiye dönüştürülebilir. Hidrojen karbon içermeyen, ekonomik ve hafif bir enerji kaynağıdır. Ancak hidrojen diğer yakıtlara kıyasla daha pahalı bir enerji türüdür. Buna karşılık teknolojik ilerlemelerle beraber uzun dönemde enerji kullanımında önemli rol oynayacaktır³².

Dünyada yenilenemeyen enerji kaynaklarının aşırı kullanımı sonucu hem kaynaklar azalmakta hem de buna bağlı kaynakların fiyatları artış göstermektedir. Ayrıca içten yanmalı motorlarda kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarının çevreye ciddi zarar verdikleri bilinmektedir. Yapılan araştırmalar evrende en bol bulunan element hidrojenin, bir yakıt olarak kullanılması için gerekli özelliklerin birçoğuna sahip olduğunu göstermiştir. Çünkü hidrojen temiz ve yüksek enerjili bir yakıttır. İkincil enerji kaynağı olan hidrojenin en büyük avantajı ise birçok birincil enerji kaynaklarından elde edilebilmesidir. Fosil yakıtlar dünyaya homojen bir şekilde dağılmamışken, en önemli hidrojen kaynağı ise neredeyse bütün coğrafyaya yayılmış olan sudur. Bu durum hidrojeni geleceğin en önemli enerji taşıyıcısı yapmakta³³ ve hidrojenin itici gücünü ortaya koymaktadır³⁴.

2.3. Fosil Kaynak Kullanımının Çevresel Zararları

Temiz hidrojen enerjisini daha iyi anlayabilmek için günümüzde yoğun bir şekilde kullanılmaya devam edilen fosil yakıtların çevresel etkilerinden kısaca bahsetmememiz gerekmektedir.

³¹ H, Kumbur ve diğerleri, “Türkiye’nin Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyeli ve Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması”, Mersin Üniversitesi, (2005).

³² TUTAR ve EREN, S 6.

³³ Alternatif yakıt olarak hidrojen, gazi.edu.tr/posts/download?id=116880, erişim tarihi 12.02.2019.

³⁴ Ayhan Demirbaş, “Future hydrogen economy and policy”, **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, Vol 12, No 2, (2017), S 172.

Sera: Güneşten gelen ışınların bir bölümü ozon tabakası ve atmosferdeki gazlar tarafından soğurulmakta, bir kısmı da yerküreden ve bulutlardan geriye yansımaktadır. Yeryüzüne ulaşan ışınlar geriye dönerken atmosferdeki su buharı ve diğer gazlar tarafından tutularak dünyayı ısıtmakta ve yüzey olması gerekenden daha sıcak olmaktadır. Bu olay, güneş ışınlarıyla ısınan ama içindeki ısıyı dışarıya bırakmayan seraları andırmaktadır. Bu duruma doğal sera etkisi denir. Sera etkisini oluşturan gaz şunlardır: Karbondioksit (CO₂), Metan (CH₄), Diazot Oksit (N₂O), Hidroflorokarbonlar (HFC'ler), Perflorokarbonlar (PFC'ler), Sülfür Hegzaflorid (SF₆). Dünyada özellikle artan fosil yakıt kullanımı sonucunda sera gazları uzun dönemde sera etkisiyle küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. Atmosferdeki sera gazlarının artması yerkürede ısının tutulmasına neden olmakta ve buna bağlı dünyanın ortalama sıcaklığında artış meydana gelmektedir. Bu ise küresel ısınma sorununu ortaya çıkarmaktadır³⁵.

Küresel ısınma sonucu ortaya çıkan iklim değişikliğinin en önemli sonuçları; dünya giderek daha fazla ısınmakta, buzullar erimekte, deniz seviyeleri yükselmekte, yağış türleri değişmekte, ekstrem hava olaylarının sıklığında ve şiddetinde önemli artışlar meydana gelmekte ve bunlara bağlı olarak, ekolojik yapı değişmektedir. Ortaya çıkan bu olumsuz sonuçlar doğadaki tüm canlıların hayatını tehdit etmektedir³⁶. Doğadaki canlı yaşamını tehdit eden diğer bir faktör ise asit yağmurlarıdır.

Asit yağmurları, fosil yakıt kaynaklı atıkların doğal su döngüsüne karışmasıyla oluşmaktadır. Özellikle fosil yakıtların enerji kaynağı olarak yoğun kullanıldığı sanayileşmiş bölgelerde fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere azot ve kükürt içeren gazlar karışmaktadır. Bu zararlı gazlar havadaki su buharıyla birleştiğinde bir kimyasal tepkime meydana gelmekte ve bu tepkime sonucu nitrik asit ve sülfürik asit damlaları oluşmaktadır³⁷. Günümüzde meydana gelen asit yağmurları daha çok insan faaliyetlerinden

³⁵ Tekin Altuğ, Füsun Özkan, "Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi, Doğrulanması ve Raporlanması", **Verimlilik Dergisi**, Cilt 0, Sayı 2, (2015), Ss 74-75.

³⁶ H.Naci Bayraç, "Enerji Kullanımının Küresel Isınmaya Etkisi ve Önleyici Politikalar", **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 11, Sayı 2, (2010), S 231.

³⁷ Asit yağmurları ve sebepleri, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/75264/mod_resource/content/0/Asit%20ya%C4%9Fmurlar%C4%B1%20ve%20sebepleri.pdf, (Erişim tarihi 15.03.2019).

kaynaklanmaktadır. Fabrikaların ve motorlu araçların atmosfere saldığı zararalı gazlar (içinde sülfür ve azot bulunan birleşikler) asit yağmurlarına neden olmaktadır³⁸.

19.yy'ın ortalarından günümüze kadar yapılan araştırmalar yaşanan küresel ısınmanın %60'ının fosil yakıtların yakılmasıyla oluşan karbondioksit (CO₂) gazından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Araştırmalara göre, sera gazlarının salınımındaki en önemli faktörler; otomobil egzozlarından çıkan partiküller, fabrika bacalarından çıkan gazlar, petrol, kömür ve yan ürünleridir³⁹.

Motorlu taşıtlar, sera gazının oluşmasına, iklim değışikliğine ve hava kirliliğine neden olan fosil yakıt emisyonlarının en önemli sebeplerinden bir tanesidir. CO₂ emisyonlarıyla ve sürekli artan hava kirliliğiyle hayatımızın ayrılmaz bir parçası olan otomotiv sektörü yakından ilgilidir. Sera gazı, iklim değışikliği ve hava kirliliğiyle mücadelede otomotiv sektöründen kaynaklanan emisyonlarının azaltılması hayati önem taşımaktadır. Örneğin Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre ulaşım sektörü, sırasıyla elektrik ve ısı üretimi sektörlerinden sonra en fazla karbon salımı yapan sektördür. Ulaşım sektörü içerisinde Karayolu Ulaşımı bu emisyonların %70'inden fazlasından sorumludur⁴⁰.

Dünyadaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 25'inden ulaşım sektörü sorumludur. IEA göre nüfus ve gelir artışındaki mevcut eğilimler devam ederse ulaşımındaki araç sayısının 2050

³⁸ Dr. Mahir E. Ocak, Asit Yağmuru Nasıl Oluşur?, (14 Temmuz 2016), <http://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/asit-yagmurlari>.

³⁹ Bahar Şanlı, Halil Özekicioğlu, "Küresel Isınmayı Önlemeye Yönelik Çabalar ve Türkiye", **Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi**, Cilt 2007, Sayı 2, (2007), S 459.

⁴⁰ Yudum Bıyık, Gökhan Civelekoğlu, "Ulaşım Sektöründen Kaynaklı Karbon Ayak İzi Değişiminin İncelenmesi", **Bilge International Journal of Science and Technology Research**, Cilt 2, Sayı 2, (2018), S 158 ve 162.

yılına kadar iki katına çıkabileceğini, buna bağlı olarak da ulaşım sektöründeki CO₂ emisyonlarının artabileceğini öngörmektedir⁴¹.

Dünyadaki içten yanmalı motorlu taşıt sayısı bir milyarın üzerindedir ve bu sayı günden güne artmaktadır. Küresel ısınmada oldukça etkili olan ve hava kirliliğinin diğer kaynaklara göre %75'ini oluşturan CO₂ içten yanmalı motorların emisyonlarında da oldukça fazladır. Dünya nüfusu arttıkça enerji ihtiyacı da buna paralel olarak artış göstermektedir. Gelecek yıllarda petrol türevi enerji kaynaklarının tükeneyeceği ve ayrıca petrol ürünlerinin dünyaya dağıtımının ek bir maliyet getirdiği de düşünüldüğünde dünyanın motorlu araçların çalışmasını sağlayacak farklı enerji kaynaklarına ihtiyaç duyduğu ortadadır⁴².

Alternatif yakıtlar içerisinde hidrojen, tabiattaki en bol element olması, çok çeşitli kaynaklardan elde edilebiliyor olması ve çevreye herhangi bir zararlı etkisinin olmaması açısından dünyada mevcut yakıtlarla rekabet edebilecek potansiyle sahip tek yakıt olduğu söylenebilir⁴³.

Temiz ve verimli hidrojenin yakıt olarak kullanılması, ülkelerin yerli ulaşım yakıtına erken geçişini sağlayabilir ve fosil kaynaklı yakıtların tükenmesiyle gelecekte oluşabilecek jeopolitik mücadeleleri engelleyebilir. IEA, alternatif taşımacılık yakıt uygulamalarının 2030 yılına kadar gerekli olabileceğini ayrıca hidrojenin, CO₂ (karbondioksit) salınımının önemli ölçüde azaltabilmesinin yanı sıra enerji güvenliğini artırabilen tek alternatif olduğunu belirtmiştir⁴⁴.

⁴¹ Anna Creti ve diğerleri, A cost benefit analysis of fuelcell electric vehicles, (2015), hal-01116997, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01116997/document>, S 4.

⁴² Levent Alkaya, Rasim Behçet ve Cumali İlkiliç, “Yakıt Pilleri ve Uygulama Alanları”, **Doğu Anadolu Araştırma ve Uygulama Merkezi (DAUM)**, Cilt 6, Sayı 3, (HAZİRAN 2008), Ss 68-70.

⁴³ Nafiz Kahraman, Selahattin Orhan Akansu ve Bilge Albayrak, “İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanılması”, **Mühendis ve Makina Dergisi**, Cilt 48, Sayı 569, (Haziran 2007), S 9.

⁴⁴ Jamie Ally, Trevor Pryor, “Accelerating Hydrogen Implementation By Mass Production of a Hydrogen Bus Chassis”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol 13, No 3, 2009, S 618.

3. HİDROJEN EKONOMİSİ

Tarih boyunca enerji insan için ihtiyaç olmuştur. Bu enerji ihtiyacı çeşitli kaynaklardan sağlanmıştır. Bu kaynaklar fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları, nükleer, hidroelektrik enerjidir. Enerji ihtiyacı özellikle sanayi devrimiyle beraber katlanarak artmıştır. Günümüzde enerjiye olan talep hiçbir dönemde olmadığından daha yüksektir. Ayrıca uluslararası ilişkiler enerji temini ve güvenliği üzerine kurulmaktadır. Enerji kaynaklarının çeşitlenmesi, toplumda ve endüstride geniş yer kapsamı enerjiyi ekonomik faaliyetlerden biri haline getirmiştir.⁴⁵ Her gün büyüyen enerji ihtiyacı karşısında kaynakların tükenme tehlikesi, insanları yenilenebilir enerji arayışına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde Hidrojen 21. yüzyılın alternatif enerji kaynağı olarak nitelendirilmektedir.

Hidrojen doğada bileşikler halinde bulunduğu için birincil enerji kaynağı değildir. Ancak fosil kaynaklardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından (biyokütle, elektrik, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi) ve sudan karbonsuz enerji kaynaklarından üretilmektedir. Hidrojen enerjisinin kullanımı enerji sektöründen gelen zararlı gaz (sera gazı) emisyonlarını ortadan kaldırmaktadır⁴⁶.

18.yy ‘den günümüze kadar toplumların enerji talepleri fosil ağırlıklı yakıtlardan karşılanmaktadır. Dünyadaki mevcut taşımacılık sektöründeki enerji sistemi fosil yakıtlara dayanmaktadır. Ancak modern toplumlar sürdürülebilirliği sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu anlamda hidrojen umut verici bir enerji taşıyıcısı olarak ortaya çıkmıştır⁴⁷.

⁴⁵ Tolga Ural ve Gülşah Karaca, “Hidrojen Ekonomisi”, **Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi**, Cilt 3, Sayı 2, S 146.

⁴⁶ Demirbaş, S 172.

⁴⁷ Veras ve diğerleri, S 2020.

Hidrojen ekonomisi; temiz havanın korunması, iklim değışikliklerinin ortadan kalkması, emisyonların azalması, ozon tabakasının korunması, temiz çevrenin korunması, petrol kullanımının azalması veya bitmesi, ülkelerin kendi yakıtlarını üretme imkânları, petrol savaşlarının bitmesi, artan dünya nüfusun enerji talebinin karşılanması gibi kalıcı çözümler getirilmesinde fosil yakıtların en iyi ikamesidir⁴⁸.

Enerji- ekonomi-ekoloji açısından bakıldığında 21. yy Hidrojen çağı olacaktır. Bunun sebebi ise hidrojen ekonomisinin;

- ✓ Temiz ve devamlı bir enerji sistemi olması,
- ✓ İstihdam sağlayacak olması,
- ✓ Yeni bir enerji teknolojisi olmasından dolayı ihracat potansiyeli oluşturacak olması,
- ✓ Ülkeler yerli yakıtlarını üretecekleri için dışa bağımlılık ve dış ticaret açıklarını azalacak olması
- ✓ Sera gazı etkilerini, kirliliği ve asit yağmurlarını azaltacak olması,
- ✓ Çevreyi koruduğu için ülke ekonomisine destek olması gibi önemli avantajlara sahiptir⁴⁹.

3.1. Hidrojenin Tarihsel Gelişimi

“Hidrojen ekonomisi” terimi ilk olarak enerji krizinde ortaya çıkmıştır. 1974’te Dünya Hidrojen Enerjisi Başkanı ve aynı zamanda da Miami Üniversitesinde “ Temiz Enerji Araştırmaları Enstitüsünün” başkanlığını yapmakta olan Prof. Dr. Nejat Veziroğlu “Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı” nda (THEME) fosil yakıtların tükenen kaynaklar olmaları ve çevreye ciddi zararlar vermeleri nedeniyle “Hidrojen Ekonomisi” fikrini ortaya atmış ve öncülüğünde Uluslararası Hidrojen Enerjisi Kurumu kurulmuş, çalışmalarına başlamıştır⁵⁰. Hidrojenin yakıt kaynağı olarak kullanılması, yenilenemeyen fosil yakıtların

⁴⁸ Ural ve Karaca, S 147.

⁴⁹ Özgür ASLAN, Burcu Özcan, “Sürdürülebilir Kalkınma ve Hidrojen Enerjisi”, **e-Journal of New World Sciences Academy**, Cilt 3, Sayı 2, (2008), S 157.

⁵⁰ Gülbahar Kurtuluş, F. Öznur Tabakoğlu ve İ. Engin Türe,

kullanımından kaynaklanan enerji krizlerini ortadan kaldırmanın bir yolu olarak düşünülmüştür. Fosil yakıt kullanımının küresel ısınmaya bağlı sera gazı olan karbondioksiti (CO₂) ürettiği konusunda daha fazla insanın bilinçlenmesiyle, küresel ısınma gerçeği ve sürdürülebilir bir kalkınma arzusu 1990'lı yıllarda hidrojen ekonomisine olan ilgiyi yeniden canlandırmıştır⁵¹.

3.2. Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen pek çok alanda kullanılabilen bir enerji türüdür. Örneğin; Hidrojen, alevli yanma özelliği sayesinde gaz türbinlerinde, ocaklarda ve içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilmektedir. Hidrojen doğrudan buhara dönüşüm özelliği sayesinde buhar türbinlerinde ve endüstriyel buhar üretiminde de kullanılabilir. Ayrıca hidrojenin katalitik yanma özelliği onun mutfak ocakları, su ısıtıcıları ve sobalarda uygulanmasına imkân sağlamaktadır⁵².

Genel hatlarıyla ele alacak olursak hidrojenin iki farklı kullanım alanı mevcuttur. İlki yakıt hücresi teknolojisi; bu teknoloji sayesinde hidrojen doğrudan elektrik üretici, konutlarda ısıtma amaçlı, taşıt araçlarında ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Yakıt hücresi teknolojisi tezde detaylı şekilde ele alınacaktır. Diğeri ise hidrojenin taşıtlarda yakıt olarak kullanıldığı geleneksel içten yanmalı motor teknolojisidir⁵³. İçten yanmalı motorlarda hidrojen yakıt olarak sıvı veya gaz halinde kullanılabilir. Sıvı hidrojen sıvı petrol gazı (LPG) gibi; gaz halindeki hidrojen ise sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) gibi kullanılabilmektedir. Gaz halindeki hidrojen depolama sistemleri büyük ve ağırken, sıvı hidrojen depolama sistemleri daha küçük ve hafiftir. Ancak sıvı hidrojenin kriyojenik sıcaklıklarda (çok düşük sıcaklık)

“Türkiye’de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve Unido-Ichet”, **Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi**, İstanbul.

⁵¹ Sergei A. Markov, “**Hydrogen economy**”, Encyclopedia of Environmental Issues, Salem Press, Editor: Craig W. Allin, 2011, Pp 678-680.

⁵² Buğra Şenaktaş, “Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları”, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2005, S 36.

⁵³ Şahin Mükerrrem, Enerji Problemine Çözüm: Hidrojen Enerjisi, MTA, hydrogen.cankaya.edu.tr/sunum/sunum4.ppt -

çalışması gerekmektedir. Ayrıca hidrojen benzinli ve dizel yakıtlı (karma yakıtlı) çalışma imkanı da sunmaktadır⁵⁴.

Hidrojen ekonominin tüm sektörlerinde (ulaşım, güç, endüstri ve binalar) çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Hidrojen ve elektrik birbirini tamamlayan enerji taşıyıcılarıdır. Hidrojen, yakıt hücresi (bir elektrokimyasal cihaz) tarafından kolayca elektriğe dönüştürülebiliyorsa, elektrik de hidrojene kolayca dönüştürülebilir⁵⁵. “Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı ve kimyasal enerjinin elektrik enerjisine çevrildiği sisteme yakıt hücresi denir”⁵⁶.

Yakıt hücreleri, evlerde işyerlerinde elektrik, ısınma, soğutma vb ihtiyaçların karşılanmasında kullanılabilir. Günümüzde yakıt hücrelerinin bu amaçlarla kullanılması dünyada hızla artmaktadır. Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı yakıt hücrelerinin portatif kullanım alanları; Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, bataryalar, dijital kameralar, video kameralar ve mobil araç uygulamalarıdır⁵⁷.

Panasonic Japonya’da (Mayıs 2009’da) doğal gazdan elde edilen hidrojenle çalışan konut yakıt hücreleri satmaya başlayan ilk şirket olmuştur. Şirket Haziran 2018’e kadar 140.000 adetten fazla bu konut yakıt hücrelerinden üretmiştir. Ayrıca Panasonic, 2021 yılının Nisan ayına kadar hidrojen yakıt hücresi jeneratörlerinin ticarileştirilmesiyle başlayarak, konut yakıt hücre sistemleri için geliştirmekte olduğu teknolojileri daha ileri taşıyarak sürdürülebilir hidrojen enerjisini yayma girişimlerine hızla devam etmektedir⁵⁸.

⁵⁴ Parashuram R Chitragar , Shivaprasad K V ve Kumar G N, “Use of Hydrogen in Internal Combustion Engines: A Comprehensive Study”, **Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics**, Vol 1, No 3, (2016), S 85.

⁵⁵ International Energy Agency (IEA), Global Trends and Outlook for Hydrogen, December 2017, Ss 5-6.

⁵⁶ Şahin Mükerrrem, Enerji Problemine Çözüm: Hidrojen Enerjisi, MTA, hydrogen.cankaya.edu.tr/sunum/sunum4.ppt -

⁵⁷ TUTAR ve EREN, S 10.

⁵⁸ Panasonic aims to commercialise fuel cell generator in 2021, **Fuel Cells Bulletin**, Volume 2018, No 11, (November 2018), Pp 6-7.

Hidrojeni yanma olmadan doğrudan elektriğe dönüştürebilen yakıt hücreleri, enerji dönüşümünün “ateş çağı”ndan “elektrokimya çağı”na doğru evrilmesini sağlayan bir itici güç olacaktır⁵⁹.

3.2.1. Yakıt Hücresi Teknolojisi (Fuel Cell Technology)

Yakıt hücreleri yüksek verimli ve çevreye zarar vermeyen enerji teknolojileridir. Yakıt hücresi, tek bir hücreden oluşan kimyasal bir enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren basit bir yapıdır. Yakıt hücrelerinin çalışma sistemlerini suyun elektrolize deneyinden anlayabiliriz. Suyun elektrolizi deneyinde suya doğru akım verilerek su hidrojen ve oksijen olarak ayrıştırılır fakat yakıt hücrelerinde ise tersi bir durum söz konusudur. Şöyle ki suyun ayrışması işleminde elektrik akımı verilip suyun ayrıştırılması sağlanıyorsa, hidrojen ve oksijenin reaksiyonu sonucunda da elektrik enerjisi ortaya çıkar. Yakıt hücreleri yakıtın enerjisini elektrokimyasal reaksiyon sonucunda doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir⁶⁰. Şöyle ki yakıt hücreleri yakıt sisteme verildiği sürece elektrik enerjisi üretilir, yani yakıt hücreleri akülerin aksine şarj edilmeden elektrik üretebilmektedirler. Yakıt hücresi çalışma prensibi basit olsa da karmaşık tasarıma sahiptir⁶¹.

İlk yakıt hücresi çalışması 1838’de Sir William Grove tarafından H₂-O₂ (Hidrojen-Oksijen) hücresi üzerinde yapılmıştır (Britanya’da). Grove’nin yaptığı çalışma neticesinde suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda ters akım ve gücün açığa çıktığını keşfetmiştir. Daha sonra 1958 yılında, General Electric firması NASA ile birlikte yakıt hücresini daha da geliştirerek ilk ticari yakıt hücresini uzay projesinde kullanmıştır. Apollo veya Gemini gibi uzay projelerinin dışında uzun süre yakıt hücreleri kullanılmamıştır. Bunun temel nedeni ise maliyetin çok yüksek olmasıdır. Ancak otomotiv endüstrisinde 1960’ların ortalarından beri yakıt hücreleri kullanılmaya başlanmıştır. Yakıt hücrelerinin diğer alternatiflere göre birçok avantaja sahip olması, mevcut teknolojide rekabetçi enerji

⁵⁹ Lynn Mytelka, New Wave Technologies: Their Emergence, Diffusion and Impact. The Case of Hydrogen Fuel Cell Technology and the Developing World, February 2003, https://www.researchgate.net/publication/4777817_New_Wave_Technologies_Their_Emergence_Diffusion_and_Impact_The_Case_of_Hydrogen_Fuel_Cell_Technology_and_the_Developing_World, sayfa 8.

⁶⁰ Adem Yılma ve diğerler, “Yakıt Pili Teknolojisi”, **Technological Applied Sciences**, Cilt 12, Sayı 4, (October 2017), s186.

⁶¹ Adem Yılmaz ve Seyfi Şevik, “Sodyum Borhidrür (NaBH₄) Destekli Bir Hidrojen/Hava PEM Yakıt Hücresi İle Elektrik Üretiminin Deneysel Analizi”, **Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi**, Cilt 7, Sayı 2/2, 2017, S 220.

piyasına giriş için yeterince olgun olmasının yanı sıra en büyük dezavantajı ise maliyetinin yaygın ticarileşmeye ulaşmak için hala çok yüksek olmasıdır⁶².

Yakıt hücresi teknolojisi uygulama çeşitliliği bakımından benzersiz bir teknolojidir. Çünkü bir elektrik santrali kadar büyük ve bir dizüstü bilgisayar kadar küçük sistemler için güç sağlayabilmektedir⁶³.

Yakıt hücresi yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük emisyon, güvenilir olması, hızlı enerji dönüşümü, kolay kurulum gibi önemli avantajlara sahiptir. Ayrıca geleceğe yönelik gelişme potansiyeli oldukça yüksektir. Günümüzde yakıt hücresi kullanımı günden güne artmakta ve üretim maliyeti azaltılarak kullanımının yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır⁶⁴.

Yakıt olarak hidrojenin, yakıt hücreleri vasıtasıyla çeşitli uygulamalarda kullanılabilmesi hidrojen ekonomisinin en önemli özelliklerinden biridir. Yeni bir teknoloji olan yakıt hücreleri dünyada potansiyel bir rekabet alanı olarak görülmektedir. Yakıt hücresi teknolojisi hidrojen ekonomisi ve pazarı için önemli teknolojik üründür. Ayrıca bu teknoloji potansiyel pazar olarak görülmektedir. Dünyadaki önemli firmaların bu alandaki eğilimleri potansiyel pazarın göstergesidir⁶⁵. Ayrıca bu teknoloji dünyada istihdam oluşturmaktadır. Örneğin, ABD’de Hidrojen Derneği tarafından yapılan bir araştırmaya göre; hidrojen enerji sisteminin ve yakıt hücre teknolojisinin ABD’de 2020’ye kadar 180.000, 2035’e kadar ise 675.000 kişiye istihdam oluşturabileceği tahmin edilmektedir⁶⁶.

⁶² O, Alo, A.Otunniyi, I. O.Pienaar, HCvZ, Fuel Cell Targets, Achievements and Improvement Drivers, S 152.

⁶³ Bahman Zohuri, **Hydrogen Energy Technology, Renewable Source of Energy, Hybrid Energy Systems**, Springer International Publishing, 2018, S 135.

⁶⁴ Yakıt Pilleri, <https://www.elektrikport.com/universite/yakit-pilleri/10188#ad-image-0>, (29.11.2013).

⁶⁵ Cihat Polat, Nurcan Kiliç, Enerji Pazarında Yeni Alternatifler ve Yeni Fırsatlar: Hidrojen Pazarı ve Yakıt Hücreleri, <https://slidex.tips/download/dosya-dosya-enerj-pazarinda-yen-alternatifler-ve-yen-firsatlar-hdrojen-pazarı-ve>, S 56, Erişim tarihi 15.01.2019.

⁶⁶ Emerging Occupations and Skills in the Hydrogen/ Fuel Cell Economy and Associated Education and Training Requirements, Cavendish Energy LLC http://www.cavendish-e.com/uploads/7/5/7/3/75738781/hydrogen_and_fuel_cell_economy_jobs_1.pdf, September 2016.

3.2.1.1. Bazı Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücresi temiz enerji, yüksek verim gibi avantajlarının yanı sıra kolay işletilebilme ve parçalarının kolayca değiştirilebilmesi gibi avantajlarından dolayı, içten yanmalı motorlara kıyasla oldukça verimlidirler.⁶⁷

Yakıt hücrelerinde verimim daha yüksek olmasının sebebi kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken hareketli parçaların olmamasıdır. Çünkü geleneksel içten yanmalı motorlarda yer alan hareketli parçaların sürtünmesi sonucu gücün bir kısmı bu kısımda harcanmaktadır. Ayrıca geleneksel motorlarda verim düşüklüğünün diğer bir nedeni de yakıt içerisinde yer alan hidrokarbonların tam yanmamasıdır. Yakıt hücrelerinde hareketli parçalar ve eksik yanma gibi durumlar yoktur⁶⁸.

İçten yanmalı motorlu araçların gürültülü çalışmasının nedeni yakıtın havadaki oksijenle yakılarak kimyasal enerjinin tahliyesi sonucunda yüksek sıcaklıktaki patlamalardır. Yakıt hücresinde ise böyle bir durum söz konusu olmadığından gayet sessiz çalışmaktadır⁶⁹.

Çalışma prensipleri benzer olsa da literatürde kullanılan elektrolit türüne göre çeşitli yakıt hücreleri bulunmaktadır⁷⁰.

➤ Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC)

Farklı çalışma sıcaklığı olan çeşitli yakıt hücreleri mevcuttur. Ancak Polimer Elektrolit Membranlı yakıt hücresi düşük çalışma sıcaklığına sahip (60 °- 80 ° C) ve

⁶⁷ Bülent Yeşilata, Feridun Demir, “Fotovoltaik ve Yakıt Pili Birleşik Sisteminin Analizi”, **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, Cilt 26, Sayı 1, (2006), S 39.

⁶⁸ Alkaya, Behçet ve İlkiliç, S 69.

⁶⁹ Ramazan Şenol, İbrahim Üçgül ve Mustafa Acar, “Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler Ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi”, **Mühendis ve Makina**, Cilt 47, Sayı 563, 2006, S 41.

⁷⁰ Selahattin Çelik, “Akiş Kanalı Tasarımının Pem Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi”, **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt 7, Sayı 1, 2018, S 408.

tasarım, işletim açısından otomotiv uygulamaları için en uygun yakıt hücresidir.⁷¹ PEM yakıt hücresinde yakıt olarak saf hidrojen, elektrolit olarak polimer membran kullanılmaktadır⁷².

İlk Polimer Elektrolit Membran (PEMFC) 1960’larda General Electric tarafından icat edilmiştir. Bu yakıt hücresinin diğer yakıt hücrelerine göre avantajları ise daha fazla güç yoğunluğunun yanı sıra düşük ağırlık ve düşük hacimdir. PEM yakıt hücreleri % 60’lık bir elektrik verimi sağlamaktadır. PEMFC’si içten yanmalı motorlara kıyasla daha verimlidir⁷³. PEMFC, benzinli motora göre 2 kat, dizel motora göre 1,5 kat daha fazla verime sahiptir⁷⁴.

PEM yakıt hücresinin çevreye herhangi bir zararı bulunmamaktadır. PEMFC’lerin yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak katalizör (platin) ve membran maliyetlerindeki düşüşün yanı sıra seri üretime geçişle birlikte bu maliyetler 10 ile 20 kat arasında azaltılabilir⁷⁵. Düşük sıcaklıkta çalışabilme ve daha hızlı tepkime avantajları nedeniyle yakıt hücreli araç teknolojisinde PEM yakıt hücreleri tercih edilmektedir⁷⁶.

⁷¹ Ulrich Eberle ve Rittmar von Helmolt, (2010), “Fuel Cell Electric Vehicles, Battery Electric Vehicles, and their Impact on Energy Storage Technologies: An Overview”, Electric and Hybrid Vehicles, S 232.

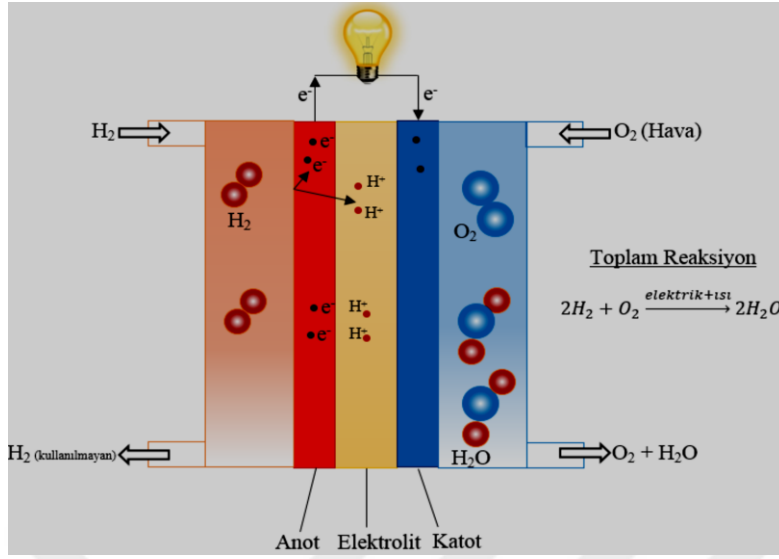
⁷² Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 100.

⁷³ Mat ve diğerleri, S 124.

⁷⁴ Alkaya, Behçet ve İlkiliç, S 69.

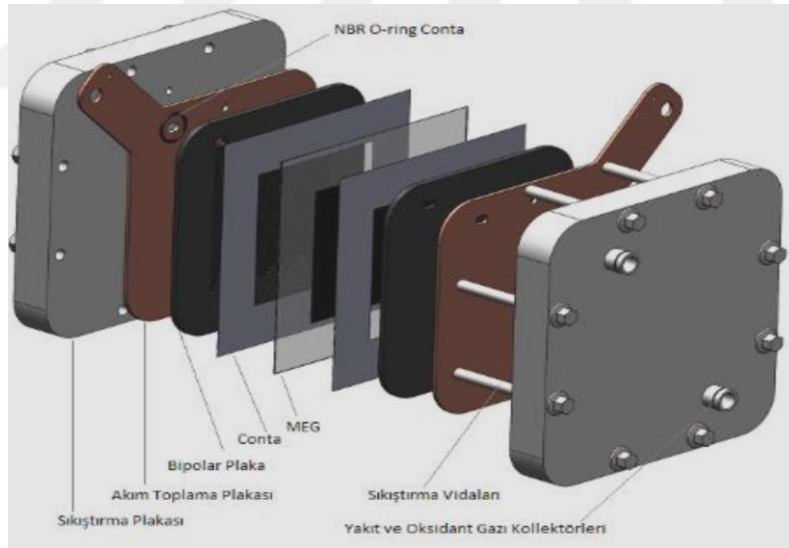
⁷⁵ İsmail. Edge AY, Abdül Kadir KOÇER, Adem YILMAZ, “Proton Change Membrane (Pem) Fuel Cells”, **International Engineering, Science and Education Conference**, December 2016, Ss 51-59.

⁷⁶ Zuraida Binti Awang Mat ve diğerleri, “Proton Exchange Membrane (PEM) and Solid Oxide (SOFC) Fuel Cell Based Vehicles-a Review”, **2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering**, 2017, S 124.



Şekil 1. PEM tipi yakıt hücresinin çalışma şeması

Kaynak: Selahattin Çelik, “Akiş Kanalı Tasarımının Pem Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi”,
Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 2018, S 408.



Şekil 2. PEM tipi yakıt hücresini oluşturan elemanlar

Kaynak: Selahattin Çelik, “Akiş Kanalı Tasarımının Pem Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi”,
Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 2018, S 408.

PEM yakıt hücresinde iki adet elektrot bulunmakta olup bu elektrotlar anot ve katottur. Bu elektrotlar birbirinden membran elektrolitle ayrılmışlardır. Ayrıca anot ve katot bir kenarlarından ince platin katalizör tabakasıyla kaplanmıştır. Yakıt olan hidrojen, yakıt

hücresine anot tarafında giriş yapmaktadır. Platin katalizör varlığında anotta, serbest elektronlar ve protonlar birbirinden ayrılırmaktadır. Serbest elektronlar dış çevrimde kullanılarak elektrik akımını oluşturmaktadır. Protonlar ise polimer membran elektrolitten geçip katoda doğru hareket etmektedir. Katotta havadaki oksijen, elektronlar (dış çevrimden gelen) ve protonlar saf su ve ısı oluşturmak üzere birleşmektedir. Şekil 1’de PEM yakıt hücresinin çalışma şeması verilmiştir. Tek bir yakıt hücresi 1 Volt civarında elektrik üretmektedir. Yakıt hücreleri istenilen elektriksel güç miktarını sağlamak için seri ya da paralel olarak birleştirilirler, bu şekilde birleştirme ile oluşan sisteme “Yakıt Hücresi Yığını” (Fuel Cell Stack) denir. Temelde yakıt hücreleri; Membran Elektrot Grubu, bipolar plaka (girdi gazları elektroda dağıtacak ve üretilen akımı bitişik hücreye geçirmeye yetecek kadar elektrik iletkenliğine sahiptir), akım toplama ve sıkıştırma plakları ve bunların bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. PEM tipi yakıt hücresini oluşturan elemanlar Şekil 2’de verilmiştir⁷⁷.

Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi; düşük çalışma sıcaklığı, kolay ve güvenli kullanım, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik, hızlı başlangıç zamanı gibi önemli avantajlarından dolayı otomotiv sektörü için umut vericidir. Ancak PEMFC’ler ekonomik, rekabetçi ve uygulanabilir olabilmeleri için fiyatlarının düşürülmesi gerekmektedir⁷⁸.

➤ Alkalın Yakıt Hücresi (AFC)

Alkali yakıt hücresi geliştirilen ilk yakıt hücresidir. 1960 yılında Apollo Uzay aracına elektrik enerjisi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Yakıt olarak saf hidrojen ve elektrolit olarak potasyum hidroksit kullanılmaktadır⁷⁹. Alkalın yakıt hücresi uzay araçlarında %60-70’ varan bir verimliliğe sahiptir. Çalışma sıcaklığı ortalama 75°C- 100°C arasındadır⁸⁰.

⁷⁷ Çelik, S 408.

⁷⁸ Omar Z Sharaf, Mehmet F Orhan, “An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 32, 2014, S 816.

⁷⁹ Mehmet Fatih Kivrak, “Hydrogen Fuel Cell Powered Electric Vehicles and an Application of Improvement for the Desorption Efficiency of a Metal Hydride Storage”, **Master Thesis**, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, February 2011, S 27.

⁸⁰ Alkaya, Behçet ve İlkiliç, S 69.

➤ Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)

En gelişmiş ticari yakıt hücresi olan fosforik asit yakıt hücreleri okullarda, otellerde, hastanelerde kullanılmaktadır. Bu yakıt hücresinde yakıt olarak hidrojen, elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanılmaktadır⁸¹. Bu yakıt hücresinin ortalama çalışma sıcaklığı 200 °C olup %40'dan daha fazla verimle elektrik üretebilmektedir⁸². Günümüzde bina uygulamalarında % 42 elektrik üretim verimiyle çalışan 400 kW'lık fosforik yakıt hücresi üniteleri kullanılabilmekte bunun yanı sıra bunların paralel çalıştırılması ile daha yüksek kapasitelere çıkılabilmektedir⁸³.

➤ Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)

Katı oksit yakıt hücresi endüstriyel alanlarda ve elektrik üretim merkezlerinde kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklığı yaklaşık 1000°C'dir⁸⁴. Elektrolit olarak stabilize zirkonyum kullanılmaktadır Yakıt olarak hidrojen, metan (CH₄), karbonmonoksit (CO) ve diğer hidrokarbonlar (karbon ve hidrojen içeren bileşikler) kullanılmaktadır⁸⁵. %45-60 arasında verimle elektrik üretebilmektedir. Ancak yüksek çalışma sıcaklığı bazı sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca ısı kayıplarını önlemek ve personeli korumak için ciddi ısı yalıtımı gerekmektedir⁸⁶.

➤ Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC)

Erimiş karbonat yakıt hücresi elektrik santrallerinde kullanılmaktadır. Elektrolit olarak erimiş karbonat kullanılan bu yakıt hücresi 650 – 700°C arasındaki sıcaklıklarda çalışmakta ve

⁸¹ Adem Yılmaz ve diğerleri, “Yakıt Pili Teknolojisi”, **Technological Applied Sciences**, Vol 12, No 4, 2017, S 187.

⁸² Hakan Çuhadaroglu ve diğerleri, “Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri Teknolojisi”, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, S 100.

⁸³ İbrahim Utku Başyazıcı, “Yakıt Pili Teknolojisinin Ticari Binalarda Kullanılabilirliğinin Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Değerlendirilmesi”, **IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongre**, İstanbul, 6-9 Mayıs 2009, S 23.

⁸⁴ Alkaya, Behçet ve İlkiliç, S 70.

⁸⁵ Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 99.

⁸⁶ Başyazıcı, S 23-24.

%60 -%75 arası yüksek bir elektrik verimi sağlamaktadır⁸⁷. Yakıt olarak hidrojen, metan (CH₄), karbonmonoksit (CO), ve diğer hidrokarbonlar kullanılmaktadır⁸⁸.

➤ Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Hücresi (DMFC)

Genellikle cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, dijital kameralar gibi düşük güç tüketimli cihazlarda kullanılmaktadır. Bu yakıt hücresinde yakıt olarak hidrojen elde edilebilen sıvı methanol, elektrolit olarak ise polimer membran kullanılmaktadır⁸⁹. Çalışma sıcaklığı ise 60-200 °C arasındadır. Ancak DMFC'in verimi (%40) hidrojen yakıt hücrelerine göre düşüktür⁹⁰.

3.3. Yakıt Olarak Hidrojenin Önemi

Otomotiv sektöründe mevcut küresel enerji tüketimi, fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Ağırlıklı içten yanmalı motor teknolojisine bağlı olan otomotiv sektörü, dünyadaki toplam CO₂ emisyonunun önemli bir bölümünü tek başına üstlenmektedir. Fosil kaynakların tüketilmesi sonucu ortaya çıkan çevre kirliliği ve sera gazı emisyonları nedeniyle artan endişeler, hidrojen gibi temiz alternatif yakıtlara olan ilgiyi artırmıştır. Ulaşım sektörü toplam enerji ile ilgili sera gazı emisyonlarının yaklaşık %23'ünden sorumludur. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, hava kirliliği ciddi çevresel risk oluşturmaktadır. Hava kirliliğinin 2012 yılı verilerine göre 3.7 milyon prematüre ölümüne neden olduğu tahmin edilmektedir. Buna ek olarak otomotiv sektörü, gayri safi yurtiçi hasılaya katkıda bulunduğu ve ekonominin diğer sektörlerini de desteklediği için ekonomik büyümenin önemli bir parçası durumdadır. Bu sektör, tek başına dünya enerji talebinin yaklaşık olarak % 25'ini ve yılda tüketilen toplam petrolün yaklaşık %62'sini oluşturmaktadır. Buna ek olarak ulaşım sektörünün, küresel enerji dağılımından aldığı payın yıllık ortalama % 1,4 oranında arttığı

⁸⁷ Alkaya, Behçet ve İlkiliç, Ss 69-70.

⁸⁸ Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 98.

⁸⁹ Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC), <http://teknikrehber.net/dogrudan-metanol-kullanilan-yakit-pili-dmfc/>, (16 ağustos 2011).

⁹⁰ Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 101.

tahmin edilmektedir. Bu tabloya bakıldığında yakıt hücreleri hayati bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır⁹¹.

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında önemli rol oynayan belli başlı özellikleri vardır. Bunlardan birincisi evrende en bol bulunan element olması, ikincisi su ve kimyasal birleşiklerin bir parçası olması, hidrojen üretiminin temiz ve sosyal olarak kabul edilir bir teknoloji olması, temiz bir şekilde üretilen hidrojen yakıtının temiz bir yakıt olarak kalması, hidrojenin kimyasal yanması sonucu sadece su ve ısı üretmesi, yakıt hücresi teknolojisinde hidrojenin kullanılabilmesi gibi özellikleri sayılabilir⁹².

İlkim değişiklikleri, artan hava kirliliği, petrol arz güvensizliği, emisyonların sağlık üzerindeki olumsuz etkileri otomotiv sektörünü ve yakıt teknolojilerini bir araya getirmiş ve radikal değişikliklere teşvik etmiştir. Otomotiv sektöründe yakıt çeşitlendirmesi benzine olan yoğun bağımlılığı azaltacaktır⁹³.

Yakıt seçimleri ve bu yakıtları çalıştırmak için gerekli ayarlamalar arasında bir koordinasyon olması gerekecektir. Mevcut alternatif yakıtların bir kombinasyonu, teknik, politik ve piyasa faktörlerinden etkilenen en olası seçeneklerle gelişmelidir. Alternatif yakıtların daha geniş bir uygulamasına izin vermek için, bir dizi engelin aşılması gerekir. Bunlara ekonomik, teknolojik ve altyapı sorunları dâhildir.⁹⁴ Benzin geçmişte boldu ve diğer yakıtlara göre önemli fiyat avantajı barındırıyordu. Ancak benzin hızla tükenmektedir ve bu nedenle alternatif yakıtlar daha uygun hale getirilmelidir⁹⁵.

Hidrojen ekonomisi, enerji taşıyıcısı olarak hidrojeni ve hidrojeni elektrik enerjisine çeviren sabit ve araçsal uygulamalar olarak tanımlanır. Hidrojen ekonomisi ifadesi mevcut enerji sistemini değiştirmek için bir seçenek olarak belirtilen enerji kullanımı, dağıtımı ve

⁹¹ Alo, Otunniyi ve Pienaar, S 152.

⁹² Mihajlo Firak, Ankica Dukic, “Hydrogen transportation fuel in Croatia: Road map strategy”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 41, No 31, (August 2016), S 13821.

⁹³ Anthony D Owen, “Externalities and Subsidies: the Economics of Hydrogen-based Transportation Technologies”, School of Economics, The University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, S 5.

⁹⁴ Michael, Horddeski, (2009), *Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power*, The Fairmont Press, S8.

⁹⁵ Horddeski, S 8.

depolanması temelli bir enerji sistemidir. Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanılması, dengeli maliyetlerle birlikte sürdürülebilir ekonomik gelişme yoluyla elde edilen enerjilerin verimli şekilde kullanılmasıyla doğrudan ilişkilidir. Hidrojen ekonomisi, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak, rekabetçi fiyat, kalite, arz güvenliğiyle ticarileşmesini sağlayan organize bir pazar olarak adlandırılmaktadır⁹⁶.

Yakıt hücreleri, geleneksel yanmalı motorlara göre daha temiz ve daha verimli bir teknolojidir. Yakıt hücreleri, yanmaya dayalı teknolojilerden daha verimli olmasından dolayı aynı miktarda güç sağlamak için daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Benzinli motorlar da verimlilik %14, dizel motorlarda %18, hibrit (melez) motorlarda %26 iken, yakıt hücresi elektrikli araçlarda %29, yakıt hücresi hibrit elektrikli araç için ise % 42 civarındadır. Yakıt hücresi araçlar verimli olmasının yanı sıra bu araçlarda emisyon neredeyse 0'dır⁹⁷. Hibrit teknolojisi, tamamen elektrik enerjisiyle çalışan (yakıt hücresi elektrikli ve akülü elektrikli araçlar) "sıfır emisyon" araçlara geçiş dönemini temsil etmektedir. Hibrit (melez) araçta, dizel veya benzinli motorun yanı sıra elektrik motoru ve akü de bulunmaktadır. Hibrit elektrikli araçlar basitçe iki farklı enerji kaynağının birlikte kullanıldığı araçlara denir. Araçtaki hibrit teknolojisi aracın verimini arttırmaktadır (örneğin; yakıt hücresi hibrit elektrikli araçlar gibi)⁹⁸.

Bir yakıt hücresine güç vermek için saf hidrojen kullanıldığında ortaya çıkan yan ürün sadece ısı ve sudur. Ayrıca hidrojenin çeşitli kaynaklardan üretilebilmesi avantajı sayesinde, yakıt hücrelerinin kullanımı sonucu, ülkelerin yakıtı olan bağımlılığı azaltabilir⁹⁹.

3.4. Hidrojen Altyapısı ve Gelişimi

Doğal kaynakların tükenme tehlikesi, artan petrol fiyatları veya olası petrol şokları, enerji güvenliği sorunu ve artan hava kirliliği nedeniyle dünya sürdürülebilir bir enerji

⁹⁶ Tatianeda Silva Veras ve diğerleri, "Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide", **International Journal of Hydrogen Energy**, Volume 42, No 4, 26 January 2017, S 2020.

⁹⁷ Owen, S 5.

⁹⁸ Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 29.

⁹⁹ Final Report Fuel Cell Economic Development Plan Hydrogen Roadmap Submitted To: Department of Economic & Community Development, January 1 2008, S 22.

sistemine ihtiyaç duymaktadır. Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, yenilenebilir ve yenilenemez çeşitli kaynaklardan üretilmesi sayesinde sürdürülebilir hedefleri karşılayabilmektedir¹⁰⁰.

Hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçların (FCEV) herkes tarafından kullanılan birer ürün olabilmesi için, fosil yakıtların mevcut alt yapı sistemi gibi benzer bir sistemle üretilmesi, depolanması ve taşınması gerekmektedir. Ayrıca FCEV'lerin yollarda yetersiz olması hidrojen altyapısının da gelişmesini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu durum altyapı çalışmalarının ve araç üretiminin aynı anda gelişme göstermesi gerektiği anlamına gelmektedir. Bu durum ise çok büyük miktarlarda finansal yatırımlara ihtiyaç olduğunu göstermektedir¹⁰¹.

Yakıt hücresi araçlar son yıllarda verimlilik ve maliyet açısından çarpıcı gelişmeler göstermiştir. Fakat altyapı paralel gelişme gösterememiş zayıf kalmıştır. Ortada tam olarak tavuk ve yumurta problemi vardır. Çünkü sürüş için uygulanabilir yakıt hücresi araçlar mevcuttur, ancak altyapı eksikliğinden dolayı satılıp yayımlanamamaktadır ve tam tersi de geçerlidir¹⁰².

3.4.1. Hidrojenin Üretilmesi

Dünyada fosil yakıt kullanımını ve emisyonu azaltabilmek için hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Hidrojen üretimi için güvenilir, uygun fiyatlı, bol ve temiz kaynakların tanımlanması gerekmektedir. Hidrojen üretim

¹⁰⁰ Marta Moreno-Benito, Paolo Agnolucci ve Lazaros G. Papageorgiou, "Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development", Computers and Chemical Engineering. Vol 102, (12 July 2017), S 110.

¹⁰¹ Firak ve Dukic, S 13821.

¹⁰² Roberto Álvarez Fernández ve diğerleri, "Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms", Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol 81, (January 2018), S 656.

potansiyelini tahmin etmek için teknolojik ve ekonomik kaynak potansiyelleri özellikle önemlidir¹⁰³.

Hidrojen yenilenebilir (rüzgar, güneş, biyokütle, jeotermal) hem de yenilenemeyen (kömür, doğalgaz), nükleer, hidroelektrik enerji kaynaklarından üretilbildiği için fosil yakıtlara önemli bir alternatif olarak görülmektedir¹⁰⁴. Hidrojen çok çeşitli kaynaklardan farklı yöntemlerle üretilir. Örneğin yenilenebilir enerji kaynaklarından elektroliz, doğalgazdan ve benzinden buhar reformu, kömürden gazlaştırma yöntemleriyle elde edilebilir. Hâlihazırda doğalgazdan buhar metan reformu yöntemiyle hidrojen üretimi en yaygın kullanılan yöntemdir¹⁰⁵.

Hidrojen temiz bir yakıt olarak adlandırılmaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklardan fosil yakıtlara kadar çeşitli kaynaklardan üretilmektedir. Ancak temel soru ise kabul edilebilir bir maliyetle, büyük miktarlarda, sürdürülebilir bir şekilde hangi kaynaktan üretilmesi gerektiğidir? Diğer önemli bir konu ise, hidrojen üretim maliyetinin fosil yakıt üretim maliyetinden daha düşük olması gerekliliğidir. Hidrojen üretmek için en sık kullanılan yöntemlerden biri suyun elektroliz (“Elektrik akımı yardımıyla bir sıvı içinde çözünmüş kimyasal birleşiklerin ayrıştırılması işlemine elektroliz denir”.) yöntemidir. Bu yöntemle 1 m³ (1 ton) sudan yaklaşık olarak 108.7 kg hidrojen üretilir ve bu ise 422 litre benzine eşdeğerdir¹⁰⁶. Dünyada hâlihazırda her yıl 7.2 EJ (553 milyar m³) hidrojen üretilmektedir. Bu üretimin %48’lik kısmı buhar reformu yöntemiyle üretilmektedir. Üretilen hidrojenin %95’lik büyük kısmı fosil yakıtlardan karşılanırken, %4’ü elektrikten ve %1 biyokütleden elde edilmektedir¹⁰⁷. Doğalgazdan buhar reformuna dayalı tipik fosil yakıtlara dayalı hidrojen üretimi çevreye zarar veren bir yöntemdir onun yerine yenilenebilir

¹⁰³ İbrahim Dincer, Canan Acar, “Innovation in Hydrogen Production”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 22, 2017, Ss 14845-14846.

¹⁰⁴ Evanthia A. Nanaki and Christopher J. Koroneos, “Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems - The Case Study of a Fuel Cell Bus”, **Sustainability**, Vol 9, No 276, 2017, S 1.

¹⁰⁵ Moataz Mahmoud ve diğerleri, “Pavlos Kanaroglou, Electric buses: A review of alternative powertrains”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol 62, 2016, S 679.

¹⁰⁶ Umar K. Mirza ve diğerleri, S 1112.

¹⁰⁷ Tiago Sinigaglia ve diğerleri, “Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 39, (28 September 2017), S 24599.

kaynaklarından biyogaz ve elektroliz yöntemleriyle hidrojen üretme gelecekte düşük karbonlu yakıt için potansiyel oluşturmaktadır¹⁰⁸. Örneğin 2015 yılında elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojenin maliyeti 3,90 \$/kilogram H₂ iken, 2020 yılında bu maliyet 2,30 \$/kilogram H₂ düşürülmesi hedeflemektedir¹⁰⁹.

Çeşitli hidrojen üretim yöntemleri mevcuttur ve bu yöntemlerin her birinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır bundan dolayı uygun hidrojen üretim yöntemini seçmek oldukça önemlidir. Seçilecek yöntem; mevcut enerji altyapısı, güvenilirlik, maliyet, coğrafi konum, nüfus, iklim ve kaynak erişebilirliği gibi özellikler dikkate alınarak yapılmalıdır¹¹⁰.

3.4.2. Hidrojenin Depolanması ve Taşınması

Üretilen hidrojen, üretim noktasından kullanım noktasında taşınırken fosil yakıtlara kıyasla depolama ve nakliye sorunları meydana gelebilir bu yüzden hidrojen yoğunlaşmış bir forma dönüştürülmelidir. Hidrojen elementler içinde en hafif olanıdır (havadan 14.4 kez daha hafif) ve oda sıcaklığında çok çabuk dağılma eğilimindedir. Ayrıca yoğunlaşmamış hidrojenin enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Yoğunlaşma basınç artırılarak ya da sıcaklık düşürülerek yapılabilir. Ayrıca bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojeni gereken yoğunluğa yükseltmek oldukça pahalı olabilir¹¹¹.

Hidrojen gaz veya sıvı halde yer altı boru hatlarıyla taşınabileceği gibi tankerlerle veya gemilerle de taşınabilir. Hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması oldukça zor süreçler oldukları için araç üreticileri, yakıt üreticileri ve hükümet arasındaki güçlü bir işbirliğine ihtiyaç duyulmaktadır¹¹². Hidrojenin taşınma ve depolama maliyetlerini önemli ölçüde etkileyen bir faktör ise üretim sahasının kullanım noktasına olan yakınlığıdır. Hidrojen kısa

¹⁰⁸ Timothy E.Lipman, Matthew Elke ve Jeffrey Lidicker, “Hydrogen fuel cell electric vehicle performance and user-response assessment: Results of an extended driver study”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 43, No 27, 2018, S 12442.

¹⁰⁹ International Energy Agency (IEA), Global Trends and Outlook for Hydrogen, December 2017, S 7.

¹¹⁰ Canan Acar, İbrahim Dincer, “Energetic and exergetic investigations of an innovative light-based hydrogen production reactor”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 43, No 22, (31 May 2018), S 10250.

¹¹¹ Naim Afgan ve Ayfer Veziroglu, “Sustainable resilience of hydrogen energy system”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 37, No 7, (April 2012), S 5462.

¹¹² Hordiski, S 8.

mesafelerde sıvı olarak uzun mesafelerde ise sıkılaştırılmış gaz olarak taşınabilir. Günümüzde hidrojen yüksek basınçlı silindir tanklarda veya kriyojenik (çok düşük sıcaklıkta) sıvı kaplarda depolanabilmektedir. Otomotiv sektöründe son kullanım talebi için hidrojenin depolanması büyük bir endişe kaynağıdır bundan dolayı, araçlarda hidrojen kullanımında yeterli araç menzili için güvenli depolama kapasitesi sağlanmalıdır. Ayrıca hidrojen araçta depolandığında ortaya bazı sorunlar çıkabilir bu sorunlar; Hidrojen birçok ortak malzemeye kolayca nüfuz edebildiği ve kaynama noktası oldukça düşük olduğu için eğer araçta belli bir süre kullanılmazsa, tanktan kaynaklı hidrojen yakıt kaybı meydana gelebilir ayrıca bir aracı 300 mil (yaklaşık 480 km) hareket ettirmek için yeterli enerjiye sahip olan tanklar, şu anda geniş ve ağırdır¹¹³. Ancak ilerleyen teknolojiyle ve çalışmalarla bu sorunlar çözülebilir.

3.4.3. Hidrojen Maliyeti ve Dünya’da Hidrojen İstasyonları

Hidrojenin maliyeti, yakıt ikmal istasyonlarının maliyeti, yakıt ikmal kapasitesinin düşüklüğü, ölçek ekonomisi eksikliği ve yollarda hidrojen yakıt hücreli araçların az olması nedeniyle yüksektir. Örneğin; Kaliforniya’da günümüzde günlük 200 kg dağıtım kapasitesine sahip bir hidrojen istasyonunda gaz halindeki hidrojenin maliyeti 6-8\$ / kg \$, sıvı hidrojenin maliyeti ise 8-9\$ / kg’dır. Bu maliyete hidrojen üretim maliyeti, paketleme ve taşıma maliyeti de eklendiğinde dağıtılacak hidrojenin maliyeti 13-15\$ / kg arasındadır. Doğalgazdan buhar metan reformu yöntemiyle hidrojen üretimi daha ucuzdur (2-3\$ / kg). Ancak ek maliyetlerle beraber bu 10-13\$ /kg yükselmekte ve müşteriye 13-15 \$ / kg mal olmaktadır. Ancak yakıt hücreli araç pazarı genişler, yakıt ikmal istasyonu kullanım kapasitesi artarsa (hidrojene olan talep) hidrojen ikmal maliyetini önemli ölçüde azaltacaktır. Bu sayede ölçek ekonomileri yoluyla hidrojen üretim maliyeti 2\$ / kg düşürülebilir¹¹⁴.

Dünya’da taşıt üreticileri, hidrojen sağlayıcıları ve hükümetlerin destekleriyle yollardaki yakıt hücreli taşıtların sayılarının artırılması için hidrojen altyapı ağları geliştirilmeye devam edilmektedir. 2016’nın sonunda Kaliforniya, Almanya ve Japonya

¹¹³ Afgan ve Veziroglu, S 5462.

¹¹⁴ Krishna Reddi ve değerleri, “Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 34, 2017, Ss 21855-21856.

50'den fazla, dünya genelinde ise en az 150 hidrojen yakıt istasyonu kurulmuştur. Dünya çapında pek çok büyük şirket tarafından hidrojen istasyonları inşa edilmektedir. Bu şirketlerden bazıları; Air Products, Linde, Air Liquide, Shell, Total, BP ve birçok başka firma. Mevcut hidrojen altyapısının büyük kısmı son birkaç yılda kurulmuştur. 2017 yılının sonlarına doğru ABD'de 38 adet kamuya ve 24 adet özel sektöre ait olmak üzere toplamda 62 adet hidrojen istasyonu bulunmaktadır. ABD'de Kaliforniya 31 hidrojen istasyonu ile en gelişmiş hidrojen ağına sahip eyalettir. Ayrıca 25 hidrojen istasyonu daha planlama aşamasındadır. Almanya'da 23 adet hidrojen yakıt istasyonu bulunmakta ve 25 adet daha planlanma aşamasındadır. İngiltere'de 15, Danimarka'da 11, İsveç'te 4, Norveç'te 6 adet bulunmaktadır. Japonya'da 2017'de yaklaşık 90 adet çalışan hidrojen istasyonu bulunmaktadır. Ayrıca 2020 Yaz Olimpiyatlarına kadar bu sayıyı 2 katına çıkarmayı amaçlamaktadır. Çin'de ise 4 adet hidrojen yakıt istasyonu bulunmaktadır. Kore'de Hyundai Tucson ix35 yakıt hücreli araca sahip olan bir sürücü, ülkede bulunan 8 adet hidrojen istasyonu sayesinde (konumlarına bağlı olarak) tüm ülkeyi sadece hidrojen yakıtıyla seyahat edebilmektedir¹¹⁵.

¹¹⁵ Aaron Isenstadt and Nic Lutsey, "Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update", International Council on Clean Transportation, October 2017, Ss 9-12.

4. HİDROJENİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ ÖNEMİ

1880’li yıllarda Avrupa’da ilk örnekleri görülen otomotiv endüstrisi, 1900’lü yıllarda ABD’de Henry Ford’un maliyetleri seri üretim yoluyla düşürmesi ile birlikte bu endüstrinin ilk dönüm noktası olmuştur. Daha sonra 1960’larda Toyata firmasının öncülüğünde Yalın Üretime (Lean Production) geçiş endüstrinin ikinci dönüm noktası olmuştur. Bu sistem sayesinde müşteri talebine göre stoksuз, uygun fiyatlı, kaliteli otomobiller üretilmeye başlanmıştır. 2000’li yıllarda ise fosil yakıt kullanılan geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerine temiz çevre dostu araçlar üretilmeye başlanmış ve satışa sunulmuştur. Bu durumun ise otomotiv endüstrisindeki üçüncü büyük dönüm noktası olacağı iddia edilmektedir¹¹⁶.

Otomotiv sektöründe en büyük teknolojik değişim içten yanmalı motorlardan – elektrikli motorlara doğru geçiş olacaktır. Geçmişten günümüze kadar hem elektrik hem de otomotiv sektörü birbirinden bağımsız gelişme göstermiştir. Ancak günümüzde araçlara, hidrojen yakıtından yüksek verimli elektrik üretebilen yakıt hücreleriyle elektrik sağlamak mümkündür. Ancak elektrikli araçların kullanılması ve yaygınlaşması için bir elektrik şarj (akülü elektrikli araçlar için) altyapısı ve/veya hidrojen yakıt altyapısı gerekmektedir. Elektrik ve otomotiv sektörü gibi iki farklı sistemin entegrasyonu birçok sorunu çözebilir¹¹⁷.

Geçmişte yelkenlilerde kullanılan kas gücünün yerini buhar gücünün alması ve atların yerine içten yanmalı motorlu araçların kullanılmaya başlanmasıyla çığır aşan teknolojilerin meydana gelmesi gibi hidrojen ve yakıt hücresi teknolojileri de çeşitli sektörleri etkilemenin yanı sıra sosyal, ekonomik ve çevresel etkiler yaratacaktır¹¹⁸. Taşımacılık sektöründeki bu yeni teknoloji sayesinde çevrenin kirlenmesi sonucu ortaya çıkan sorunlar ve aynı zamanda petrol fiyat artışları, arz kesintilerinden dolayı meydana gelebilecek ekonomik sorunlar da çözüme kavuşturulabilir. Ayrıca elektrikli araçların geleneksel araçlara kıyasla

¹¹⁶ Ayfer Ustabaş ve Osman Simav, “Otomotiv Endüstrisindeki Dönüşüm ve Türkiye”, **ÇOMÜ Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 3, Sayı 2, (2018), S 213.

¹¹⁷ Vincent Oldenbroek, Leendert A.Verhoef, Ad J.M.van Wijk, “Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 12, (23 March 2017), Pp 8166-8167.

¹¹⁸ Lynn K. Mytelka and Grant Boyle (Ed.), **Making choices about hydrogen: Transport issues for developing countries**, International Development Research Centre, 2008, S 8.

daha az hava kirliliği maliyetine ve insan sağlığı etkilerine sahip olduğu da bilinen bir gerçektir. Bunlara ek olarak hidrojen kullanımı yalnızca enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının azaltılmasında ve küresel sıcaklık artışının 2 dereceye kadar sınırlandırılmasında önemli rol oynayabilir. Bu doğrultuda pek çok ülke otomotiv sektöründe, hidrojen teknolojisi ve yakıt hücrelerinin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması için yol haritası çizmiştir. Örneğin Avrupa'da 2020 yılına kadar yılda 400.000-1.000.800 arası hidrojen yakıtlı araç satışı hedeflenmiştir. Toplu taşıma sistemini değiştirmeyi amaçlayan pek çok Avrupa kentinde (enerji güvenliği ve emisyonları azaltma gibi amaçlar doğrultusunda) düşük karbonlu ulaşım sistemine doğru bir eğilim söz konusudur¹¹⁹.

4.1. Dünyada Enerjiye Bakış ve Otomotiv Sektöründe Hidrojenin Potansiyeli

Küresel boyutlarda artan birincil enerji kullanımı sonucu dünya petrol, doğalgaz ve akabinde kömürün tükenmesi tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır. Ayrıca buna bağlı olarak artan kirlilik seviyeleri endişe verici boyutlara ulaşmıştır. ABD, AB, Japonya gibi ülkeler, hidrojeni geleceğin enerjisi olarak görmekte ve enerji tükenmesi, iklim değişiklikleri gibi önemli konulara karşı potansiyel etkili önlemlerden biri olarak kabul etmektedir¹²⁰.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde insanların gelecekteki ulaşım ihtiyaçlarını karşılamak için prototip yakıt hücresi (FC) araçlar geliştirmiştir. Hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçlar (FCEV'ler) hidrojen ekonomisinin temel birleşenidir ve gelecek nesillere temiz sürdürülebilir enerji sağlama vizyonu ile geliştirilmeye devam etmektedir. Gelişmiş ülkeler için FCEV'ler petrol ithalatına olan bağımlılığı ve kentsel kirliliği azalttığı için büyük önem taşımaktadır. Gelişmekte olan ülkeler için ise FCEV'ler gittikçe artan petrol ithalatlarına çekici bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca FCEV'leri cazip kılan önemli bir diğer bir avantajı ise geleneksel benzinle çalışan içten yanmalı motorlara (ICE) kıyasla daha yüksek verime sahip olmalarıdır¹²¹.

¹¹⁹ Nanaki and Koroneos, Ss 1-2.

¹²⁰ Aldara da Silva César ve diğerleri, "Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers", **Journal of Cleaner Production**, Vol 207, (10 January 2019), S 752.

¹²¹ Rajesh K. Ahluwalia ve diğerleri, "Fuel economy of hydrogen fuel cell vehicles", **Journal of Power Sources**, Vol 130, No 1-2, (3 May 2004), S 192.

Yakıt hücreleri enerji dönüşümü için temiz ve verimli bir mekanizma sağlamasının yanı sıra kalkınma ve enerji güvenliği için yenilenebilir kaynaklardan sağlanabilen hidrojenle (modern enerji taşıyıcısı) uyumlu teknolojilerdir. Yakıt hücrelerinin statik yapısı titreşimsiz ve sessiz çalışmalarını sağlamaktadır¹²².

İstisnalar dışında günümüze kadar yapılan hidrojen yakıtlı araç araştırmalarının çoğu gelişmiş ülkeler tarafından yapılmaktadır. Ancak gelişmekte olan ülkeler alternatif ulaşım büyük ihtiyaç duymaktadır. Çünkü gelişmekte olan ekonomiler toplu taşımaya daha çok bağımlıdır ve enerji güvenliği, hava kirliliği sorunlarıyla karşı karşıyadır. Gelişmekte olan ülkelerin ithal enerjiye olan bağımlılıklarını ve sera gazı emisyonlarını azaltma taleplerini karşılayan önemli teknolojilerden birisi hidrojen yakıtlı araç teknolojisidir. Tarihsel eğilimlere bakıldığında, ekonomik gelişmelerin artan enerji talepleriyle birleştiği görülmektedir. Ayrıca dünyada 2000-2030 yılları arasında gerçekleşen birincil enerji talebindeki artışın %62'sinden fazlasının gelişmekte olan ülkelere meydana geleceği öngörülmektedir. Uluslararası enerji ajansına göre (IEA), Çin ve Hindistan 2030 yılında petrol ihtiyaçlarının %90'ını ithal etmek durumunda kalacağını ve ayrıca ABD Enerji Bilgi İdaresine göre ise, dünya petrol arzının 2030'da zirve yapacağı öngörülmektedir. Gelişmekte olan ülkelere mevcut otomobil bağımlılığı artmaya devam ederse, gelecekteki enerji güvenlikleri tehlikeye girecek, çevre kirliliği artacak ve bu sorunlar gelişmekte olan ülkeler için oldukça endişe verici olacaktır¹²³.

Otomotiv sektörü, gayri safi yurtiçi hasılaya katkıda bulunduğu ve ekonominin diğer sektörlerini desteklediği için ekonomik büyümenin önemli bir parçası konumundadır¹²⁴.

4.2. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçların (FCEV) Gelişimi ve Yakıt Hücreli Binek Araçlara Örnekler

1966 yılında General Motors'un "Electrovan" modelinin dünya sahnesine çıkmasıyla hidrojen yakıt hücreli araçların itici gücü oluşmuştur ve 1990'lı yıllardan sonra Daimler-Benz "NECAR" serisi araçların piyasaya sürmesiyle hidrojen yakıt hücreli araçlar ciddi gelişme göstermiştir. Yaklaşık olarak 20 yıllık araç tasarım ve geliştirme sonrasında ilk hidrojen yakıt

¹²² Sharaf ve Orhan, S 811.

¹²³ Ally and Pryor, Ss 617-618.

¹²⁴ Alo, Otunniyi ve Pienaar, S 2.

hücreli ticari hafif hizmet FCEV’li araç örnekleri geliştirilmiştir. Ancak bu araçlar 2016 yılından beri sadece yakıt ikmali altyapısının bulunduğu belli/sayıli bölgelerde kullanılmaktadır. En son geliştirilen FCEV’ler ise yaklaşık 3-5 dakikada yakıt ikmali yapabilmektedirler. Ayrıca benzin ve dizel araç kullanan tüketicilerin beklentilerini karşılayabilen 450-580 kilometre (km) kadar sürüş menziline sahiptirler. Hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV’ler) petrol kullanımını ve emisyonlarını azaltmak için yardımcı olabilecek önemli teknolojilerdir ve bu araçlar zararlı gaz emisyonu üretmez sadece su buharı üretir.¹²⁵

FCEV’ler hızla gelişmekte olan dünyanın otomotiv sektöründeki yüksek karbon kirlenmesinden korunmak için gelecekte en umut verici temiz araç teknolojisidir. Emisyonları azaltmada etkili bir yol olduğu için son yıllarda bu teknoloji büyük ilgi görmektedir. Ayrıca FCEV’lerin sıfıra yakın emisyon avantajının yanı sıra yüksek verimlilik ve sessiz çalışma performansı otomobil üreticilerinin bu alana önemli Ar-Ge yatırımları yapmalarını sağlamıştır. 2015 yılında FCEV’lerin ticarileşmesiyle gelişimleri hızla artış göstermiştir¹²⁶. Örneğin Kanada’da yapılan bir çalışmaya göre 1 milyon elektrikli otomobilin her yıl yaklaşık 3,4 milyon ton sera gazı emisyonundan kaçınma potansiyeli sağladığı tahmin edilmektedir¹²⁷. Otomobil üreticilerinin 2020 yılına kadar binlerce FCEV üretmeyi hedefledikleri tahmin edilmektedir.¹²⁸

Yakıt hücresiyle çalışan araçlarda temelde; yakıt hücresi sistemi, Alternatif Akım/Doğru Akım dönüştürücü, yakıt tankı ve elektrik motoru/motorları bulunmaktadır.

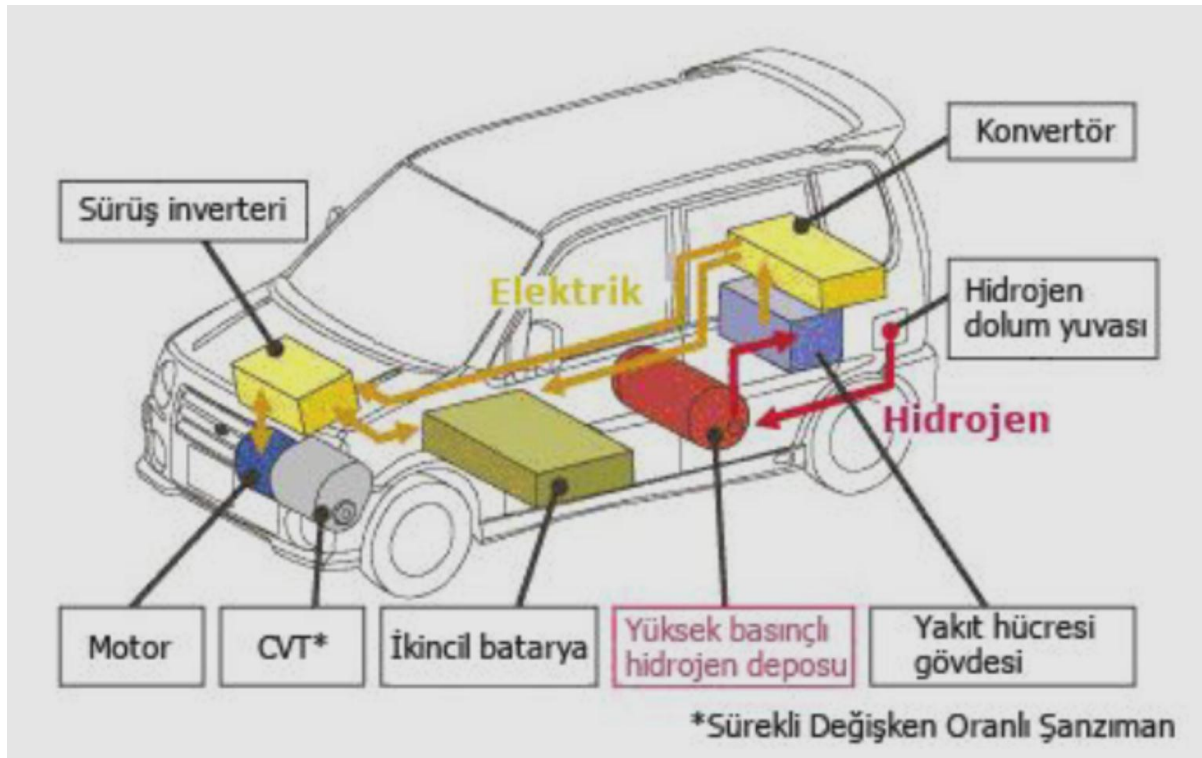
¹²⁵ Lipman, Elke ve Lidicker, Ss 12442-12443.

¹²⁶ Han HAO ve diğerleri, “Abating transport GHG emissions by hydrogen fuel cell vehicles: Chances for the developing World”, **Frontiers in Energy**, Vol 12, No 3, 2018, S 466.

¹²⁷ Osamah Siddiqui ve Ibrahim Dincer, “A Review on Fuel Cell-Based Locomotive Powering Options for Sustainable Transportation”, **Arabian Journal for Science and Engineering**, Vol 44, No 2, 2019, S 678.

¹²⁸ Awang Mat ve diğerleri, S 125.

Tamamlayıcı donanımları ise; genel kontrol ünitesi, akü, soğutma sistemi ve çeşitli aktarma organlarıdır. Şekil 3’te yakıt hücreli bir aracın ekipmanları görülmektedir¹²⁹.



Şekil 3. Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

Kaynak: Anonim, (2014), <http://www.daihatsu.com.tr/cevre-politikasi.html>, (Erişim Tarihi: 02.01.2014).

Yakıt hücreleri, hidrojen yakıtı depoya verildiği sürece, içinde barındırdığı sistemle ihtiyaç duyduğunda enerjiyi anında üretirler. Yakıt hücreli elektrikli araçların menzili, geleneksel araçlar gibi yakıt tankındaki yakıt miktarına bağlıdır. FCEV’ler, yakıt hücreli kontrol ünitesi, güç işlemci ünitesi kontrolü, tahrik ve yakıt depolama sisteminden oluşmaktadır¹³⁰.

¹²⁹ Adem Yılmaz ve diğerleri, “Usability in Vehicles of PEM Fuel Cells”, **8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17)**, Elazığ: Fırat University, 19-22 October 2017, S 2651.

¹³⁰ Kerem Alper, “Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri”, **Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 5, Sayı 1, 2014, S 6.

Yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV) gelecek vaat eden alternatif araç teknolojileridir. Hem enerji açısından verimli hem de temiz enerji olmaları dolayısıyla FCEV’ler geleneksel içten yanmalı motorlu taşıtlara (ICEV) kıyasla hem sera gazı emisyonları hem de benzine olan bağımlılığı azaltmada önemli rol oynamaktadır. Ancak FCEV’lerin ticarile mesini sınırlayan en büyük engel ise dünyada hidrojen yakıt ikmali altyapısının henüz yaygın hale gelmemiş olmasıdır. Yakıt ikmali istasyon sayısının yeterli olmaması müşterileri, FCEV alma konusunda olumsuz yönde etkileyecektir. Buna ek olarak yolda yeterli sayıda FCEV yoksa hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının artması da ekonomik olarak mümkün değildir. Yoldaki (kullanımdaki) tüm FCEV’lerin toplam s r   mesafelerine ve hidrojen yakıt tüketim oranlarına (kg/km) bakılarak yıllık yaklaşık hidrojen talebi miktarı tahmin edilebilir. Dünyanın ilk ticari FCEV’si Toyota Mirai 2014’te Japonya’da ve 2015’te ABD’de piyasaya s r lm   t r. Bu aracın hidrojen yakıt deposu kapasitesi 5 kg’dır¹³¹. FCEV Mirai içten yanmalı motorlara kıyasla daha fazla enerji tasarrufu sa lar ve  evreye CO₂ ya da herhangi bir zararlı maddeyle zarar vermez. Buna ek olarak yakıt ikmal süresi yaklaşık üç dakikadır¹³².

Kelime anlamı “Gelecek” olan Mirai İngiltere, Almanya ve Danimarka’da da satışa sunulmuştur ve devam eden süreçte hidrojen altyapısının da gelişmesiyle Avrupa’nın diğer ülkelerinde de satışa sunulması planlanmaktadır. Yakıt olarak sıkı tırılmı  hidrojen kullanılan Mirai’nin yüksek basınçlı hidrojen tankı sızıntılara karşı geleneksel araçların yakıt depolarından farklı, daha sağlam bir malzemeye üretilmiştir. Sızıntı durumunda ise hidrojen gazı havadan kat ve kat hafif olduğu için oldukça güvenli bir şekilde atmosfere karışır. Bu da yakıt hücreli araçların güvenli olduğunun bir göstergesidir. Mirai 0-100 kilometre/saat hıza 9,6 saniyede erişebilir ve maksimum 178 kilometre/saat hıza  ıkabilmektedir¹³³. Hidrojen yakıt hücreli Mirai tam dolu depoyla 500 kilometreye kadar menzile ula abilmektedir¹³⁴.

¹³¹ Xinhai Xu ve diğerleri, “Near-term analysis of a roll-out strategy to introduce fuel cell vehicles and hydrogen stations in Shenzhen China”, *Applied Energy*, Vol 196, (15 June 2017), Ss 229-230.

¹³² Powering the future, https://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle, (15 Ocak 2019).

¹³³ Toyota Mirai Avrupa yollarında, 2015, <https://www.dunya.com/sektorler/otomotiv/toyota-mirai-avrupa-yollarinda-haberi-295081>, (15 Ekim 2015).

¹³⁴ Awang Mat ve diğerleri, S 125.

Mirai Toyota Yakıt Hücresi Sistemi (Yığıcı) tarafından desteklenmektedir ve max. Çıkış gücü 113 kW'tır¹³⁵. Mirai'nin yıllık üretim kapasitesi 3000 araçtır¹³⁶.

Hyundai, Honda, Ford, Renault gibi çok sayıda firma da FCEV'ni piyasaya sunmuştur.

Temmuz 2017 itibariyle dünyada toplamda yollarda yaklaşık 4.500 adet yakıt hücreli elektrikli araç (FCEV) bulunmaktadır. Bu araçların büyük bir kısmı üç otomobil firması satmakta ve kiralamaktadır. Satılan FCEV'ların %75'ini Toyota Mirai, %11'ini Hyundai ix35, %10'luk bir oranını Honda Clarity ve önceki modeli FCX, ve son %4'lük oranını ise Renault Kangoo takip etmektedir. Yakıt hücreli elektrikli araç satışlarının %48'i Kaliforniya'da, %35'i Japonya'da, %14'ü Avrupa'da ve son %3'ü ise Kore'dedir ¹³⁷.

Kaliforniya'da Nisan 2017 itibariyle 1600'den fazla FCEV aktif olarak yollardadır. 29 adet yakıt istasyonu sayesinde Kuzey ve Güney Kaliforniya arası uzun seyahatler FCEV'larla mümkündür. Örneğin; Honda Clarity yakıt hücreli Sedan 585 km menzile sahiptir ve 2017 başlarından itibaren Kaliforniya çevresinde 12 bayi tarafından ulaşımda kullanılmak üzere kiralanmaya başlanmıştır. Kaliforniya'da 26 ton/gün sıvı ve 29 ton/gün gaz hidrojen üretilmektedir (petrol rafine etme amacı dışında üretilen hidrojen miktarı)¹³⁸.

İçten yanmalı motorlara kıyasla enerjilerini hidrojen yakıt hücresinden alan elektrikli araçlar oldukça rekabetçi teknolojilerdir. Daimler Anonim Şirketi Güç Aktarma Sistemi Hücre Geliştirme Başkanı Prof. Dr. Christian Mohrdieck'e göre 10 yıl içerisinde yakıt hücreli elektrikli otomobiller daha ucuz hale gelecektir. Bunun sebebi ise; bahsedilen süreç sonunda teknolojiye ve seri üretime hakim olan 6.000 saatten fazla çalışma ömrünü garanti eden beşten fazla yakıt hücresi üreten firma mevcuttur. Ayrıca yakıt hücreli araçların 0'dan 100 km'ye 10 saniyeden daha kısa bir sürede ulaşabilmeleri, 300'den Nm (Newton/Metre) daha yüksek bir tork, 150 kW'den (204 beygir gücü) daha yüksek güç gibi değerleri kolayca göstermeleri ve

¹³⁵ Cansın Erol, "Toyota Mirai Özellikleri", 2015, <https://www.muhendisbeyinler.net/toyota-mirai-ozellikleri/>, (9 Tem 2015).

¹³⁶ Firak ve Dukic, S 13823.

¹³⁷ Aaron Isenstadt and Nic Lutsey, "Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update", International Council on Clean Transportation, October 2017, S 2.

¹³⁸ 2017 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development, https://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2017.pdf, S 2.

100 km’de 1kg’ın altında bir hidrojen tüketimiyle (bu da 3 litreden daha az dizel demektir) iyi bir rekabetçi olduklarının kanıtıdır¹³⁹.

Hafif FCEV’lerin ticarileştirilmesi önünde herhangi bir teknik engel bulunmamaktadır. Artık otomobil üreticileri prototip araç yerine ürünleri piyasaya sürmüştür. Bu da FCEV’lere toplu pazar fırsatı sunmaktadır. Örneğin ABD’de Toyota Mirai’nin satış fiyatı 57.500\$, aylık kiralama bedeli ise 349\$’dır. Honda Clarity’nin satış bedeli ise 60.000\$’dır. FCEV’lar tank başına 250-350 mil (402-563 km) menzile sahiptir ve bu da geleneksel araçlarla karşılaştırılabilir bir performans demektir. Ayrıca Dünyada 2016’da 2 milyondan fazla elektrikli otomobil (BEV’ler (Akü Elektrikli Araçlar) ve Hibritler) satışının gerçekleştiği rapor edilmiştir (IEA Global EV Outlook 2017). Bu durum ise bize elektrikli araç pazarının geliştiğini göstermektedir. Akü Elektrikli Araçların (BEV) bu satış başarısı, FCEV’lerin muhtemel başarısının ön göstergesidir. “Evrimsel, Devrimci ve Kilit Yıkıcı Teknoloji” üzerine yapılan Küresel Otomotiv Yönetici Araştırmasına göre (2017), FCEV’lerin pazarda yer alan 3. Trend oldukları belirtilmiştir. Araştırmada yer alan yöneticilere göre (%78) FCEV’ler “elektrikli ulaşım için gerçek bir atılımdır”. IEA’ya göre hidrojen yakıtlı binek araçların, 2030’da dizel, sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) ve biyometanla çalışan araçlardan daha rekabetçi olma potansiyeli vardır¹⁴⁰.

Dünyada FCEV stoku 2017’de 7.200’ü geçmiştir. Amerika’da özellikle Kaliforniya’da 3.500 adet FCEV bulunmaktadır. Bu da FCEV filosunun neredeyse yarısıdır. Japonya 2.300 adetle FCEV Stokuna sahip ikinci ülkedir. Avrupa’da ise özellikle Almanya ve Fransa’da 2017 sonunda yaklaşık 1.200 adet FCEV dolaşıma girmiştir¹⁴¹.

¹³⁹ Andreas Burkert, “Die Brennstoffzelle kommt kräftig in Fahrt”, **MTZ - Motortechnische Zeitschrift**, Vol 76, No 9, (September 2015), Ss 9-13.

¹⁴⁰ International Energy Agency (IEA), Global Trends and Outlook for Hydrogen, December 2017, Ss 9-10.

¹⁴¹ Global EV Outlook 2018 Towards cross-modal electrification, <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/globalevoutlook2018.pdf>, sayfa 20

4.3. Yakıt Hücreli Hibrit Teknolojili Elektrikli Araçlar (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles) (FCHEV)

Hibrit araçlar, tahrik sistemi için iki ya da daha fazla güç kaynağı kullanılan araçlara denir. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar, düşük enerji verimliliği, aşırı zararlı emisyonlar, yüksek gürültü ve tek yakıt kaynağına bağımlılık gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Yakıt hücreli hibrit araçlar ise enerji krizi ve küresel ısınma gibi ciddi sorunları çözmek için önerilen çözümlerdendir. Hibrit araçlar, iki ya da daha fazla güç kaynağını tek bir tahrik sisteminde sorunsuz şekilde birleştirmesi gibi önemli bir avantaja sahiptir¹⁴².

İster hibrit ister tam elektrikli araç olsun elektrik motoruyla tahrik edilen araçlarda bir enerji depolama sistemi mevcuttur. Bu depolama sistemi ise genellikle aküdür. Geleneksel benzinli veya dizel araçlarda araç fren yaptığı durumda, aracın hareket halindeyken sahip olduğu kinetik enerji, fren balatalarında ısınarak havaya karışmaktadır. Bu ise ciddi oranda bir enerji kaybıdır. Daha açık bir ifadeyle benzin veya dizel motorlu araçta elde edilen enerjinin bir bölümü balataların ısınmasına harcanmaktadır. Elektrikli bir araçta ise elektrik motorlarının generatör olarak çalışması sayesinde frenleme enerjisi ısıya dönüşmeden sisteme geri kazandırılır ve aküler de depolanır¹⁴³.

Hibrit elektrikli araçlarda (HEV), geliştirilen rejeneratif frenleme teknolojisi sayesinde enerji kaybı azaltılır, boşta çalışma kayıpları çok azdır, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve yakıt veriminde artış meydana gelmektedir¹⁴⁴.

Yakıt hücreli hibrit elektrikli araçlarda (FCHEV) hidrojen yakıt hücre teknolojisi ve hibrit teknolojisi birleşmiştir. Amaç yakıt tüketimini optimize etmek ve geleneksel yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmaktır. Yakıt hücreli araçlar yakıtın kimyasal enerjisini yanma olmadan elektriğe dönüştüren teknoloji olduğu için dünya genelinde ilgi görmekte ve araştırılmaktadır. Ayrıca güç çıkışı iyileştirmek, kullanımını yaygınlaştırmak ve maliyetini

¹⁴² Dingyue Chen ve diğerleri, “Basal Study on Power Control Strategy for Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle”, **Telkomnıka**, Vol 13, No 2, (June 2015), S 421.

¹⁴³ Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 29.

¹⁴⁴ Alper, S 5.

düşürmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Yakıt hücresinin görece yavaş dinamik karakteristik yapısı nedeniyle FCHEV'lar geliştirilmiştir¹⁴⁵.

Hibrit teknolojisiyle yakıt hücreli araçların güç aktarma sistemi verimliliği artırılabilir ve frenleme enerjisi geri kazanılabilir. Bu durum enerji tasarrufunu artırdığı için FCHEV'ları cazip hale getirmektedir. FCHEV araçlar dizel motorlardaki titreşim ve gürültü sorununu da ortadan kaldırır. FCHEV araçların ticarileşmesi önündeki en büyük engel Yakıt Hücresi Yığını (FCS) (Fuel Cell Stack) sisteminin maliyeti ve yakıt hücrelerinin dayanıklılık sorunudur. Maliyet sorunu teknolojik ilerlemeler ve geliştirilen politikalarla çözülebilir. FCS dayanıklılığı ile ilgili şirketler araştırmalarına devam etmektedir ve sürekli olarak daha dayanıklı FCS piyasaya sürülmektedir¹⁴⁶.

Örneğin; Honda da FCX Clarity yakıt hücreli elektrikli aracını piyasaya sunmuştur. Yakıt hücreli araç olarak tasarlanmış FCX Clarity Honda'nın V Flow yakıt hücresi yığını tarafından desteklenen PEM yakıt hücresine sahiptir. Max çıkış gücü 100kW ve max. hızı 160km/ saat'tir¹⁴⁷. Ayrıca frenleme ve yavaşlamadan (hibrit teknolojisi) sağlanan 288V enerji lityum-iyon aküde depolanmaktadır. 4.1 kg hidrojen tankına sahiptir. FCX Clarity şehir içinde hidrojen başına 123.9km (77mil), şehirlerarası otoyolda 107.8km (67mil), kombine sürüşlerde 115.9 km (72mil)'dir. Sessiz çalışması da önemli özelliklerindendir¹⁴⁸.

4.4. Dünya'da Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Otobüs Projeleri (FCEB)

Yıllardır gelişmiş ülkeler özellikle nüfus yoğunluğu olan şehirlerde hava kalitesini artırmak ve ulaştırma kaynaklı hava kirliliğini azaltmak için petrole alternatif enerji kaynakları arayışında olmuştur. Hidrojen yakıt hücreli elektrikli otobüsler (FCEB) hava kalitesini artırmak ve kirliliği azaltmada önemli bir unsurdur. Geleneksel dizel ya da dizel hibrit otobüslere kıyasla yakıt hücreli elektrikli otobüslerin (FCEB) çevreye ve ekonomiye katkıları oldukça fazladır, ayrıca FCEB'ler yakıt açısından diğer alternatiflere kıyasla oldukça

¹⁴⁵ Chen ve diğerleri, Ss 421-422.

¹⁴⁶ Li.Tianyu ve diğerleri, "Design and analysis of a fuel cell supercapacitor hybrid construction vehicle", **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 41, No 28, 2016, S 12308.

¹⁴⁷ 2008 FCX Clarity, <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/2008FCXClarity.html>, (15 Ocak 2019).

¹⁴⁸ Hydrogen Transport, <https://sites.google.com/site/ee535test/farrag-el-fellah?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>, (15 Ocak 2019), S 3.

verimlidir. Sessiz çalışma, sera gazı emisyonlarını ve petrol bağımlılığını azaltmasının yanı sıra petrole bağlı fiyat dalgalanmalarının olumsuz etkilerini de azaltması diğer avantajları sayılabilir¹⁴⁹.

Geleneksel fosil yakıtla çalışan otobüslerin aksine hidrojen FCEB'ler, dünyanın en yaygın iki temel birleşeni olan oksijen ve hidrojenden enerji sağlamaktadır. Yakıt hücresi teknolojisi hidrojen ve oksijeni birleştirerek elektrik, ısı ve su üretmektedir. Ayrıca yakıt hücreleri kimyasal bir reaksiyonla üretilen enerjiyi kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürdüğü için akülere benzer yapıdadır. Bütün bunlara ek olarak fosil yakıtla çalışan otobüsler sera gazı üreterek çevremize zarar veren havayı kirleten maddeler üretmektedirler. Ancak yakıt hücreli elektrikli taşıtlar sıfır emisyonlu araçlardır. Çünkü çalıştıklarında çevreye sadece su yayarlar. Bu da daha az küresel ısınma, daha temiz hava, daha sağlıklı insanlar demektir¹⁵⁰.

Yakıt hücreli elektrikli otobüsler geleneksel otobüslerin ana gövdesi üzerine kurulmuştur ve bir yakıt hücresi sistemi bir de güç aktarım sistemini oluşturan elektrikli aküden oluşmaktadır. Bir yakıt hücresi sistemi; bir yakıt hücre yığını, yardımcı bipolar plakalar ve membran elektrot düzenekleri içermektedir. Hidrojenle çalışırken bu otobüsler çevreye sadece su buharı yayarlar. Buna ek olarak bu otobüsler uzun vadede dizel otobüslere kıyasla daha az bakım maliyeti olan taşıtlardır. Ayrıca yapılan araştırmalar hidrojen ekonomisine uzun vadeli geçiş stratejilerinin maliyetleri azaltılabileceğini ve yakıt hücreli otobüslerin performansını geliştirebileceğini ortaya koymaktadır¹⁵¹.

PEM Yakıt hücresi üreticisi Ballard Power Systems Şirketi yakıt hücreli otobüslerde bir dizi özellik sunar. Bunlar; sıfır emisyon, yakıt ikmali 7 dakika, yakıt ikmali arası yaklaşık 480 km (300 mil), dizel otobüslere kıyasla 1.5 kat daha iyi yakıt ekonomisi, dizel otobüslerle karşılaştırılabilir işletim performansı, 25.000 çalışma saatinde bir bozulma olmadan

¹⁴⁹ Thanh Hua ve diğerleri, "Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide", **Journal of Power Sources**, Vol 269, (10 December 2014), Ss 975-976.

¹⁵⁰ Hydrogen Fuel Cell Electric Bus, <https://www.octa.net/About-OCTA/Environmental-Sustainability/Hydrogen-Fuel-Cell-Electric-Bus/>, (15 Ocak 2019).

¹⁵¹ Nanaki and Koroneos, S 201.

karşılaştırılabilir bir dayanıklılık, yolda herhangi bir şarj ihtiyacı duymadan rota esnekliği, yumuşak sürüş ve sessiz çalışmadır¹⁵².

Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma isteği ve artan kirlilik endişeleri alternatif enerji araçlarına olan ilgiyi artırmaktadır. Yakıt hücresi çeşitleri içinde, düşük çalışma sıcaklıkları, hızlı başlatma ve yüksek verimlilik gibi avantajlarından dolayı Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFC), araçlar için önemli gelecek vaat eden yeşil güç kaynaklarıdır¹⁵³.

Yakıt hücreli otobüslerin ticarileşmesi hidrojen ekonomisine geçiş için en uygun yollardan biri olarak görülmektedir. Çünkü binek araçlara kıyasla daha fazla yakıt depolayabilmektedir ve otobüsler yüksek kullanım oranına sahip oldukları için yakıt hücre teknolojisinin halk tarafından tanınmasını sağlamaktadır. Bu yüzden Avrupa’da, Güney Amerika’da ve Asya’daki bazı ülkeler yakıt hücreli otobüs projelerine destek vermektedir (2003’te 65 adet yakıt hücreli otobüs çalışmaktaydı)¹⁵⁴.

Dünyada yakıt hücreli elektrikli otobüsleri desteklemek için önemli projeler geliştirilmiştir. İlk geliştirilen projeler; Avrupa’da Temiz Kentsel Ulaşım Projesi (Clean Urban Transport for Europe) (CUTE) ve HyFLEET: CUTE programı, Çin Yakıt Hücreli Otobüs Projesidir¹⁵⁵.

4.4.1. Avrupa’da Kentsel Ulaşım Projesi 2001-2006 (CUTE)

CUTE Avrupa’da Temiz Kentsel Ulaşım Projesi 9 şehirde 27 adet hidrojen yakıt hücreli otobüsün tanıtılması ve denenmesi projesidir. Bu şehirler; Hamburg ve Stuttgart (Almanya), Stockholm (İsveç), Amsterdam (Hollanda), Londra (İngiltere), Lüksemburg, Madrid ve Barselona (İspanya), Porto’dur (Portekiz). Proje Kasım 2001’de başlamış ve Mayıs 2006 bitmiştir. Bu proje katılan ortaklar, şehirler ve araç sayısı bakımından ilk büyük projesi olma özelliğine sahiptir. Buna ek olarak projede yer alan tüm şehirlerde yakıt

¹⁵² Transit Bus, <http://www.ballard.com/markets/transit-bus>, (erişim tarihi 15 ocak 2019).

¹⁵³ Dawei Gao ve diğerleri, “Comparative study of two different powertrains for a fuel cell hybrid bus”, **Journal of Power Sources**, Vol 319, 2016, S 9.

¹⁵⁴ K. Haraldsson, A. Folkesson, P. Alvfor, “Fuel cell buses in the Stockholm CUTE Project-First experiences from a climate perspective”, **Journal of Power Sources**, Vol 145, No 2, 2005, S 620.

¹⁵⁵ Center for Transportation and the Environment, **A Report on Worldwide Hydrogen Bus Demonstrations**, 2002-2007, Atlanta, 2009.

altyapısının geliştirilmesi, uygulanması, işletilmesi ve değerlendirilmesini de kapsadığı için eşsiz bir projedir. Finansal bakımdan CUTE Avrupa Komisyonu, üye şehirler ve yerel ortaklar tarafından desteklenmektedir. Bu projenin asıl amacı yakıt hücre teknolojisinin otomotiv sektöründe uygulanabilirliğini göstermek ve sektörde yer alan karar vericiler için temel oluşturmaktır. Projenin diğer önemli bir amacı ise yakıt hücre teknolojisinin başarısı için halkın yakıt hücre teknolojisi hakkında bilinçlendirmektir¹⁵⁶.

CUTE projesinin vizyonu ise modern toplumun standartlarını düşürmeden şehirler için tamamen temiz bir ulaşım sistemi geliştirmektir. Bu vizyonu, dizel ve benzinli araçların yerini yakıt hücreli araçlarla değiştirerek sağlamayı amaçlamaktadır. Hidrojen ve yakıt hücreleriyle, otomotiv sektöründe petrole olan bağımlılığı ortadan kaldırmaktır. Ayrıca bütün bunlara ek olarak hidrojen yakıt hücreli taşıtların ticarileşmesi için önünde ekonomik, teknolojik ve kamu kabulü gibi önemli zorluklar mevcuttur. Bu zorluklardan bazıları; hidrojeni üretmek, hidrojeni güvenli şekilde taşımak, yeterli miktarda hidrojeni depolamak ve geleneksel içten yanmalı motorlarla kıyasla yakıt hücrelerinin maliyet ve güvenlik açısından rekabetçi olmasını sağlamaktır¹⁵⁷.

Avrupa Kentsel Ulaşım Projesi'nin ilk aşaması; yakıt hücreli elektrikli otobüslerin gelişiminden önce şehirlerin her birinde hidrojen üretimi, dağıtımı, yakıt ikmal istasyonları ve yakıt altyapısının geliştirilmesi olmuştur. Her şehir için yerel koşullara uygun hidrojen üretim yöntemi belirlenmiş, güvenlik düzenlemeleri yapılmış ve bütçe durumu ayarlanmıştır. Bütün bunlara ek olarak yakıt hücreli elektrikli otobüs için özel tasarlanmış servisler kurulmuştur. Değerlendirme aşaması olan ikinci aşamada ise; her bir şehirde üç'er tane yakıt hücreli otobüs 2 yıllık süre boyunca test edilmiştir (2003-2005). Projenin koordinatörü DaimlerChrysler'dir. Daimler aynı zamanda CUTE projesinin yakıt hücreli otobüs sağlayıcısıdır. CUTE projesiyle iki farklı proje daha birleştirilmiş ve projelerde aynı araç kullanılmıştır. CUTE ile birleştirilen projeler; Ekolojik Şehir Ulaşım Sistemi (Ecological City Transport System) (ECTOS)

¹⁵⁶ Haraldsson, Folkesson ve Alvfor, Ss 620-621.

¹⁵⁷ The Contribution of CUTE to Clean Transport Energy: Vision, Technology and Teamwork, Stockholm, 2005, S 4.

(Reykjavik/İzlanda) ve Sürdürülebilir Ulaşım Enerji Programıdır (Sustainable Transport Energy Program) (STEP) (Perth/ Avusturalya)¹⁵⁸.

Yukarıda saydığımız projelerin uzun vadede amaçları ise; küresel sera etkisini azaltmak, hava kalitesini artırmak, fosil yakıtları korumak, yakıt hücre teknolojisini geliştirerek gerekli altyapının da paralel gelişimini sağlamak ve emisyonuz ulaşırma sistemini oluşturmaktır. Ayrıca bu projede örneğin Amsterdam, Barselona, Hamburg ve Stockholm'de elektroliz yöntemiyle hidrojen üretilirken, Madrid ve Stuttgart'ta doğalgazın buhar reformu yöntemleriyle hidrojen üretilmiştir. Bütün şehirlerde yer alan istasyonlarda yakıt ikmali süreleri 15-30 dakika arasındadır. Proje kapsamında toplam 8.900 kez yakıt ikmali gerçekleştirilmiş ve 192.000 kg hidrojen kullanılmıştır, kullanılan bu hidrojenin % 56'sı yeşil kaynaklardan sağlanmıştır. Bu projelerin hepsinde yakıt hücresiyle çalışan Mercedes Benz'in Citaro otobüs serisi kullanılmıştır. Bu otobüslerde iki adet PEM yakıt hücresi yığını mevcuttur bu yakıt hücreleri Ballard firması tarafından üretilmektedir. Sıkıştırılmış hidrojen yakıtı Citaro'nun tavanına monte edilmiş 9 Dynetek tüpte depolanmaktadır. 200-300 km (124-186 mil) menzil için 350 barda 40 kg hidrojen deposu kapasitesine, yaklaşık 70 kişilik yolcu kapasitesine ve maksimum 80 km/saat hıza sahiptir¹⁵⁹.

CUTE projesinde yer alan 9 şehirde yapılan toplam sürüş denemeleri sonucunda yakıt hücreli otobüslerin geleneksel dizel otobüslerden daha yüksek enerji tüketimi sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çünkü yakıt hücreli otobüslerin 100 km'de 20,4-30,0 kg hidrojen tüketmiştir ve bu da 100 km'de 67,8-99,7 litre dizel yakıt tüketimine eşdeğerdir (geleneksel dizel otobüslerin 100 km'de yakıt tüketimi 39-50 litre'dir). Ancak yeni geliştirilen bu yakıt hücreli otobüslerin ilk amacı belirtildiği gibi düşük yakıt tüketimi değil, yüksek güvenilirlik ve halkın yakıt hücreli araçları tanımasını sağlamaktır¹⁶⁰.

4.4.2. China Fuel Cell Bus Project (Pekin/Çin)

Çin'in ilk hidrojen yakıt hücreli elektrikli otobüs projesi, Shanghai Jiaotong Üniversitesi, Shanghai Shen-Li High Teknoloji Şirketi, Çin otomobil üreticisi Suzhou King

¹⁵⁸ Haraldsson, Folkesson ve Alvfor, Ss 621.

¹⁵⁹ Center for Transportation and the Environment, Ss 36-37.

¹⁶⁰ M Saxe, A Folkesson, P Alvfor, "Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project: Clean Urban Transport for Europe", **Energy**, Vol 33, No 5, (May 2008), S 694.

Long ve çeşitli yerel kuruluşların desteğiyle geliştirilmiştir. Bu otobüste 9 adet depolama tankı bulunmaktadır. Otobüsün 100 kW güç sağlamakta ve max. hızı 80 km/saattir. Aynı dönemde “863” programı kapsamında 2005 yılına kadar Tsinghua Üniversitesin’de (Pekin’de) Yeşil Güç Kaynakları ile çalışan yakıt hücresi elektrikli otobüs geliştirilmiştir. Farklı şehirlerde bu otobüslerle test sürüşleri yapılmıştır. Test sürüşleri FCEB’lerin iyi yakıt verimliliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur (100 km’de 12 litre gaz eşdeğer maliyet). Aynı dönemde Çin Hükümeti, Avrupa Komisyonu Çerçeve Araştırma Programına CUTE projesine katılmıştır. Amaç CO₂ emisyonlarını ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak, yeni teknolojiler geliştirmek için hidrojenle çalışan otobüsleri test etmektir. Proje kapsamında Pekin’e DaimlerChrysler 3 adet yakıt hücresi elektrikli Mercedes-Benz Citaro otobüs tedarik etmiş ve 2 yıl boyunca otobüsler test edilmiştir (2005-2007). Pekin’deki 2 yıllık test sürüşü sonunda güvenli şekilde, zararlı emisyon ve gürültü olmadan 84.000 km yol kat etmiştir. Ayrıca Şanghay’da bu proje için 3 adet daha yakıt hücresi otobüs geliştirilmiştir. Çin’deki yakıt hücresi elektrikli otobüs tanıtımı için yapılan toplam yatırım 32 milyon Dolar’dır. Proje Global Environmental Facility (GEF), Birleşmiş Milletler Kalkınma programı (UNDP), Ministry of Science and Technology (Çin Bilim ve Teknoloji Bakanlığı) (MOST), Pekin ve Şanghay Belediyesi tarafından finanse edilmiştir (12 milyon Dolar GEF ve UNDP tarafından, 20 milyon Dolar Çin hükümeti tarafından). Yakıt ikmali (BP ve Pekin Tongfang Co.Ltd.) için üretilen hidrojenin büyük kısmı doğalgazdan üretilmiştir¹⁶¹. Otobüslerin kullanılabilirlik oranı %89’dur. 100 km’de ortalama 18 kg hidrojen tüketmektedir. Yakıt ikmal süresi max. 10 dakikadır¹⁶².

4.4.3. Ecological City Transport System (ECTOS) (Reykjavik/İzlanda)

Artan enerji ve yakıt talebinin yanı sıra emisyonlarla ilgili artan endişeler nedeniyle dünya genelinde hükümetler ulaşım ve enerji sistemleriyle ilgili yol haritalarını şekillendirmektedirler. Birçok ülkenin hükümet politikasında hidrojen yerini almıştır. İzlanda da hidrojeni sadece gelecekteki bir vizyon olarak değil aynı zamanda bir enerji taşıyıcısı olarak görmektedir. İzlanda’nın yakıt olarak hidrojeni seçmesinin birincil nedeni bol miktarda

¹⁶¹ Fangzhu Zhang and Philip Cooke, “Hydrogen and Fuel Cell Development in China: A Review”, **European Planning Studies**, Vol 18, No 7, 2010, Ss 1159-1161.

¹⁶² Center for Transportation and the Environment, Ss 36-37.

tatlı su ve yenilenebilir enerji kaynağına sahip olmasıdır. Hidrojeni suyun elektroliz yöntemiyle üretmektedir. Ulusal ekonomisi büyük ölçüde balıkçılığa bağlı olan bir ülkedir. Bundan dolayı balıkçı gemileri, tarım araçları, otobüs kullanımında petrole bağımlılığı oldukça yüksektir. Ekolojik Şehir Ulaşım Sistemi projesi Mart 2001 yılında Avrupa Birliği Komisyonu'nun desteğiyle başlatılmıştır. ECTOS İzlanda'da özel bir şirket olan Icelandic New Energy Ltd. (INE) şirketi tarafından koordine edilen 2003-2005 yılları arasında İzlanda'nın Reykjavik kentinde üç yakıt hücreli elektrikli otobüsün kullanıldığı projedir. ECTOS projesi için Reykjavik'te kurulan hidrojen Shell istasyonu hem özel tasarımı (saydam hak tarafından dışarıdan izlenebilir) hem de yerinde teknik çözümleri dahil 1.000.000 Euro'ya mal olmuştur¹⁶³.

Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen projede 3.8 Milyon Avro (4.86 Milyon Dolar) hibeyle finanse edilmiştir. Kullanılan 3 otobüs toplamda 5.216 çalışma saati sonunda 89.243 kilometre (55.777 mil) yol kat edilmiştir. Proje boyunca 17.342 kg hidrojen kullanılmıştır. ECTOS projesi CUTE ve Sustainable Transport Energy Program STEP programıyla ortak yürütülmüştür ve 2006-2007 yılları arasında Global Hydrogen Bus Platform HyFLEET: CUTE projesiyle yoluna devam etmiştir¹⁶⁴.

4.4.4. Sustainable Transport Energy Program (STEP) 2004-2006 (Perth/Avusturalya)

Sürdürülebilir Ulaşım Enerji Programı Batı Avustralya Hükümeti tarafından Perth şehrinde dizel ve doğalgaz toplu taşımaya alternatif olarak hidrojen yakıt hücre otobüs teknolojilerini geliştirme programıdır ve bu program 2004-2006 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Bu programda DaimlerChrysler tarafından üretilen Ballard Power Systems yakıt hücreli motorlarla çalışan 3 otobüs kullanılmıştır. Ayrıca araçlarda kullanılan hidrojen BP Kwinana petrol rafinerisinden sağlanmıştır. STEP programı de CUTE, ECTOS ve Global Hydrogen Bus Platform (HyFLEET:CUTE) projeleriyle ortaklaşa yürütülmüştür¹⁶⁵. Deneme sürüşleri sonucunda 258.000 km yol almıştır, 46 ton hidrojen kullanılmıştır ve

¹⁶³ Maria H. Maack and Jon Bjorn Skulason, "Implementing the hydrogen economy", **Journal of Cleaner Production**, Vol 14, No 1, 2006, Ss 52-54,59.

¹⁶⁴ Center for Transportation and the Environment, S 38.

¹⁶⁵ Jamie Ally and Trevor Pryor, "Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems", **Journal of Power Sources**, Vol 170, No 2, 2007, S 401.

320.000 kişi yolcu taşınmıştır. Otobüsler günde ortalama 6,6 saat çalışmıştır ve her çalışma gününde ortalama 151 (94mil) km yol almıştır. Bu proje Batı Avustralya ve Avustralya Hükümeti tarafından finanse edilmiştir. Bu program 2006 yılında Küresel Şemsiye Programı olan Global Hydrogen Bus Platform (HyFLEET:CUTE) çerçevesinde yürütölmeye devam edilmiştir¹⁶⁶.

4.4.5. Global Hydrogen Bus Platform HyFLEET: CUTE

Küresel Hidrojen Otobüs Platformu HyFLEET:CUTE (2006-2009) dünyanın en büyük hidrojen enerjili otobüs projesidir. Bu proje 6. Çerçeve Programı aracılığıyla Avrupa Komisyonu ve 31 Sanayi ortağı tarafından ortaklaşa finanse edilmiştir. Projenin önceliğı ise; Sürdürülebilir Kalkınmada sürdürülebilir enerji sistemleri ve alternatif motor yakıtlarıdır. Bu projede hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlar ve hibrit yakıt hücreli elektrikli otobüsler test edilmiştir. CUTE projesinin yenilikçi uzantısıdır. Projenin içeriğı;

- ✓ Uygun maliyetli, güvenli hidrojen üretimi, depolanması ve dağıtımı
- ✓ Sektör ile yenilikçi teknolojiler arasındaki sinerjileri araştırmak
- ✓ Sosyo-ekonomik açıdan enerji güvenliğı, çevre ve güvenlik açısından değerlendirme ve izleme
- ✓ Hidrojenli araçların tanıtımı ve yaygınlaştırılması¹⁶⁷

HyFLEET:CUTE proje kapsamında üç kıtada on şehirde (Amsterdam, Barselona, Pekin, Hamburg, Londra, Lüksemburg, Madrid, Perth-Avustralya, Reykjavik, Pekin-China) toplam 33 adet yakıt hücresiyle çalışan ve 14 adet Hidrojenle çalışan İçten Yanmalı Motorlu Otobüs (HICEB) test edilmiştir¹⁶⁸. Projenin amacı verimli yakıt hidrojenle çalışan otobüs teknolojisini geliştirmenin yanı sıra ulaştırma sisteminin enerji tüketimini çeşitlendirmek ve taşıma yakıtı olarak hidrojenin temiz, verimli, güvenli şekilde üretimini dağıtımını sağlamaktır. Bu proje kapsamında daha yüksek yakıt verimliliğine sahip olan yeni nesil yakıt hücreli hibritli elektrikli araçlar ilk kez test edilmiştir. Bu projede çeşitli hidrojen üretim yöntemleri ve teknolojileri kullanılmıştır. Hem yerinde yakıt istasyonunda hidrojen üretilmiş

¹⁶⁶ Center for Transportation and the Environment, Ss 38-39.

¹⁶⁷ Hydrogen Transports Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future, http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf, (October 2013), S 1.

¹⁶⁸ Center for Transportation and the Environment, S 39.

hem de saha dışındaki tesislerde üretilerek istasyonlara taşınmış, burada amaç farklı yöntemleri değerlendirmek olmuştur. Doğalgazdan buhar reformuyla, sudan elektrolizle, yenilenebilir kaynaklardan (rüzgâr bazlı elektrik) gibi çeşitli yollarla hidrojen üretimi test edilmiştir¹⁶⁹.

Proje kapsamında Mercedes-Benz'in geliştirdiği Yakıt Hücresel Hibrit Elektrikli Otobüsler (FCHEB), Citaro FuelCELL-Hybrit; yakıt hücresi teknolojisiyle hibrit teknolojinin kombinasyonundan oluşmaktadır. İlk nesil yakıt hücresel elektrikli otobüslere kıyasla bu otobüslerin yakıt tüketimi daha azdır. Servis ömrü en az 6 yıl veya 12.000 çalışma saati süresine yükselmiştir buna ek olarak servis gereksinimleri de önemli ölçüde azalmıştır. Citaro FuelCELL-Hybrit'in 35kg ilk nesil yakıt hücresel elektrikli Citaro 40 kg (9adet) hidrojen tankına sahiptir. Ancak Citaro FuelCELL-Hybrit'in depolama tank sayısı 9 dan 7'ye düşürülmüştür. Bu otobüsler de dizel motorlu hibrit otobüslerde olduğu gibi fren enerjisinin geri kazanılmasından faydalanarak enerji tasarrufu sağlamaktadırlar (rejeneratif (üretken) frenleme sistemi). Bu sayede Citaro FuelCELL-Hybrid elektrikli otobüsler, trafik ve topografya koşullarına bağlı olarak %10-25 arasında hidrojen tasarrufu sağlanabilmektedir (topografya koşullarına bağlı olarak yalnızca akü gücüyle otobüs 2-3 km mesafe yol alabilir). Citaro FuelCELL-Hybrit 100 km'de yaklaşık 11-13 kg arası hidrojen tüketmektedir. İlk yakıt hücresel Citaro ise 100 km'de ortalama 22 kg (yer şekillerine bağlı olarak değişir) hidrojen tüketmektedir. Sağlanan yakıt tasarrufuna bakıldığında Citaro FuelCELL-Hybrid hidrojen üretimi için gereken kaynaklara olan talebi azaltmada yardımcı olmaktadır. İlk yakıt hücresel elektrikli Citaro (boş ağırlık 14,2ton) göre Citaro FuelCELL-Hybrid'in (boş ağırlığı 13.2 ton) ağırlığı bir ton azaltılmıştır bu da daha düşük yakıt tüketimine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca yolcu kapasitesi ise 70'den 76'ya yükseltilmiştir. Çalışma aralığı yakıt hücresel Citaroda 200 km iken FuelCELL-Hybrid'de 250 km'ye yükselmiştir bu ise geleneksel dizel otobüslerin çalışma aralığı ile aynıdır¹⁷⁰. Citaro yakıt hücresi ünitesi 250 kW güç sağlarken Citaro FuelCELL-Hybrid 120 kW güç sağlamaktadır. Ancak Citaro FuelCELL-Hybrid ayrıca 180kW güçte Akü'ye sahiptir (High Voltage-Battery 180kW power). Citaro FuelCELL-

¹⁶⁹ Hydrogen Transports Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future, http://www.eltis.org/sites/default/files/case-studies/documents/hfc_brochure_10_12_09_4.pdf, S 7.

¹⁷⁰ The future has arrived: World premiere of the Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus, <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-future-has-arrived-World-premiere-of-the-Mercedes-Benz-Citaro-FuelCELL-Hybrid-bus.xhtml?oid=9271703>, (15 Ocak 2019).

Hybrid'in enerji verimliliği ilk nesil yakıt hücresi Citaro'ya göre yüksektir. Bunun nedeni ise Hybrid yapısı ve daha düşük ağırlığıdır¹⁷¹.

Proje kapsamında hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlu (HICEB) 14 adet otobüs geliştirilmiş ve test edilmiştir. 19. yüzyılın sonunda geliştirilen içten yanmalı motorlar günümüz karayolu taşımacılığının vazgeçilmez teknolojisi olmuştur. Günümüzde içten yanmalı motorlu araçlar çevre için ciddi sorun teşkil etseler de otomotiv sektörü için en güvenilir ve uygun fiyatlı teknolojilerdir. Hidrojeni yakıt olarak içten yanmalı motorlarda kullanmak, hidrojenin geleneksel yakıtlara kıyasla sağladığı çeşitli avantajlardan biridir. İçten yanmalı motorlu araçlarda hidrojen yakıt olarak kullanımı sonucu egzoz gazı emisyonları oldukça düşüktür. HyFLEET: CUTE projesinde kullanılan HICEB otobüslerinin motorunu (4 zamanlı 6 silindirli) Alman firması olan MAN (MAN hydrogen ICE 2876 UHO1 with 150 kW) üretmiştir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması CNG (sıkıştırılmış doğalgazın Compressed Natural Gas) içten yanmalı motorlarla kullanılmasıyla bezer şekilde çalışmaktadır¹⁷².

Proje kapsamında Mart 2008 itibariyle yer alan otobüsler; Yakıt hücresi elektrikli otobüsler 2 milyon km 'den fazla yol kat etmiştir ve toplamda 133.360 saat çalışmıştır. Bu otobüslerin kullanılabilirlik oranı % 92,6'dır.

HICEB hidrojenle çalışan içten yanmalı otobüsler ise 180.000 km yol kat etmiş ve toplamda 13.500 saat çalışmıştır. Bu otobüslerin kullanılabilirlik oranı % 92,8'dir¹⁷³. Projenin toplam maliyeti 43.160000 Euro'dur. Bu maliyetin %56'sı 31 sanayi ortağı tarafından %44'ü ise Avrupa Komisyonu tarafından karşılanmıştır¹⁷⁴.

¹⁷¹ Hydrogen Transports Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future, http://www.eltis.org/sites/default/files/case-studies/documents/hfc_brochure_10_12_09_4.pdf, S 17.

¹⁷² H2 Internal Combustion Engine (ICE) Technology, <https://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenInternalCombustionEngines.html>, (15 Ocak 2019).

¹⁷³ Center for Transportation and the Environment, S 39.

¹⁷⁴ The World's Largest Hydrogen Powered Bus Project, http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20121019_155349_39149_HyFLEET_Project_Information.pdf

4.4.6. Hindistan’da Yakıt Hücresel Otobüslerin Gelişimi

Tata Motors ve Hindistan Uzay Araştırma Örgütü (ISRO) işbirliğiyle 2006’dan beri geliştirilen Hindistan’ın ilk “sıfır emisyonlu” hidrojenle çalışan otobüsü olan Starbus Fuel Cell 2017 yılında şehirlerde kullanılmaya başlanmıştır. Yakıt hücresi teknolojisinin verimliliği, geleneksel araçlara kıyasla enerji dönüşümünde %40-60 daha yüksektir. Bu sayede yakıt tüketimini %50 azaltmaktadır.¹⁷⁵

Starbus yakıt hücresel otobüs; 114 beygir gücünde hidrojen yakıt hücre güç sistemine ve 250 beygir gücünde elektrikli bir itiş motoruna sahiptir. Yolcu kapasitesi ise 30’dur. Yakıt hücresel elektrikli araçlar Hindistan’da özellikle büyük metropollerde artan kirlilik için en uygun çözüm olarak görülmektedir. Çünkü bu araçların yan ürünleri ısı ve sudur. Starbus, Hindistan Petrol Şirketi’nin (ICO) hidrojen istasyonunda yakıt ikmali yapmaktadır¹⁷⁶.

Yakıt hücresel elektrikli otobüs Hindistan’da belli başlı şehirlerde test edilmektedir. Bilim ve Teknoloji Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Bakanlığı yakıt hücresel elektrikli otobüslerin gelişmesi için finansal destek sağlamaktadır¹⁷⁷.

Yakıt hücresel elektrikli araçlar, prize takılarak şarj edilen araçlara kıyasla daha uzun sürüş menziline sahiptir ve yakıt ikmal süresi daha kısadır. Hidrojen yakıt hücresel otobüste hidrojen sıkıştırılmış hidrojen gaz olarak depolanır. Hindistan’da yerli olarak üretilen yakıt hücresel hibrit elektrikli otobüsleri piyasaya sürülmüştür. Hindistan’daki Tata Motor Firması bunu yaparak kara yolu taşımacılığında CO₂ azaltmayı, temiz ve yeşil emisyon, sürdürülebilir büyümeye katkıda bulunmayı, yeni teknolojilere erken yatırım yaparak pazarda liderliğini artırmayı hedeflemektedir. Bunun için alternatif ulaşırma ve altyapı oluşturmaya

¹⁷⁵ Dhiyanesh Ravichandran, “Tata Starbus Fuel Cell (Next-Gen): India’s First Hydrogen Bus”, 2017, <http://wagenclub.com/2017/01/tata-starbus-fuel-cell-hydrogen-bus-specifications-review.html>, (27 January 2017).

¹⁷⁶ India’s First Fuel Cell-Powered Bus Launched, 2018, <http://www.cleanfuture.co.in/2018/03/30/indias-first-fuel-cell-powered-bus-launched/>, (30 March 2018).

¹⁷⁷ Abhilasha Singh, India’s first-ever hydrogen fuel cell powered bus by Tata Motors is here! Made in India bus emits only water, 2018, <https://www.financialexpress.com/auto/car-news/tata-motors-indianoil-corporation-flag-off-countrys-first-hydrogen-fuel-cell-powered-bus/1096895/>, (15 March 2018).

kenetlenmiştir. Bu doğrultuda hükümet ve düzenleyici makamlarla işbirliği içinde çalışmaktadır¹⁷⁸.

4.4.7. Clean Hydrogen in European Cities (CHIC)

Avrupa Şehirlerinde Temiz Hidrojen (CHIC) projesi, 2010 yılında başlamış ve 2016 yılında son bulmuştur. Bu proje yakıt hücresi elektrikli otobüslerin ticarileşmesi için atılan önemli adımlardan biridir. CHIC finansal olarak, kamu-özel ortaklığıyla Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking (Yakıt Hücresi ve Hidrojen Ortak Girişim'den) (FCH JU) (FCH JU Avrupa'da yakıt hücresi ve hidrojen enerjisi teknolojilerini araştırmak, geliştirmek ve tanıtmak için faaliyet gösteren kamu özel ortaklığı desteklenmiştir. Proje Avrupa ve Kanada'da olmak üzere 9 şehirde yürütülmüştür. Sekiz ülkede 23 ortak tarafından yürütülen projede 54 adet hidrojen yakıt hücresi elektrikli otobüs (HFCB) ve 4 adet hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlu otobüs kullanılmıştır. CHIC projesinin öncelikli amacı, Hidrojen Yakıt Hücresi Hibrit Elektrikli Otobüs teknolojisinin ticarileşmesi için hazırlık yapmak ve altyapı sorununu çözmektir. Projede 5 farklı otobüs üreticisi firma ve 2 farklı yakıt hücre tedarikçisi firma yer almıştır. Projenin toplam maliyeti 81.8 Milyon €'dur¹⁷⁹.

CHIC projesi, hidrojenle çalışan yakıt hücresi elektrikli otobüslerin (FCEB) tam olarak ticarileşmesi için atılan önemli adımlardan biridir. Bu proje yakıt hücresiyle çalışan elektrikli otobüslerin ticari olarak yaygınlaşmaya hazır olduğunu, şehirlerde toplu taşıma filosunu karbondan arındıran ve hava kirliliğiyle mücadele edebilen sıfır emisyonlu öncü otobüs projesidir. Proje kapsamında yakıt hücresi elektrikli otobüslerin yer aldığı şehirler ise; Aargua (İsviçre), Bozen (İtalya), Milan (İtalya), Oslo (Norveç), Köln (Almanya), Hamburg (Almanya), Londra (İngiltere), Whistler (Kanada)'dır. Ayrıca proje kapsamında Berlin'de (Almanya) 4 adet hidrojen içten yanmalı motorlu otobüs (HICEB) işletilmiştir. Bu proje FCEB, dizel otobüslerin yerini alacak potansiyele sahip olduklarını göstermiştir. Çünkü çalışma prensipleri fosil yakıtlı otobüslerle en çok benzerlik gösteren teknolojidir. Uzun bağımsız menzil, kısa sürede yakıt ikmali ve sokakta şarj etme altyapısına gerek olmadığından

¹⁷⁸ The Wealth Times, "Tata Motors Launches India's First Fuel Cell Bus", 2017, <http://thewealthtimes.com/2017/01/29/tata-motors-launches-indias-first-fuel-cell-bus/>, (29 January 2017).

¹⁷⁹ Clean Hydrogen in European Cities, Final Report including Part A - Final Publishable Summary Report Part B - Final Restricted Full Report, <https://ruter.no/globalassets/dokumenter/fossilfri-2020/final-report-chic-2016.pdf>, , Ss 14-17.

tam operasyonel esneklik sağlamaktadır. Projenin genel amacı 2020 yılına kadar Avrupa’da FCEB’lerin maliyetini azaltmak, sayısını artırmak ve emisyonları azaltmaktır¹⁸⁰.

Otobüs tedarikçileri Hamburg, Aargau, Bozen ve Milan için EvoBus Mercedes-Benz, Cologne ve Oslo için Van Hool, London için Wrightbus, Whistler için New Flyer firmalarıdır. Yakıt hücre üretici firma ise EvoBus MercedesBenz’in AFCC, diğer otobüslerin ise Ballard firmasıdır. Yakıt hücrelerinin güç kapasitesi ise 150 kW’dır. Yakıt tüketimi tüm FCEB otobüsler için 12.1kg/100km’dır. Sadece Whistler şehrindeki FCEB otobüsün yakıt tüketimi 9.9kg/100km’dır. Proje kapsamında toplam kat edilen yol miktarı 9.6 Milyon km ve proje kapsamında otobüslerin toplam çalışma saati ise 519.000 saat’tir. Kullanılabilirlik oranı >% 94’tür¹⁸¹. Proje sonucuna göre FCEB’lerin dizel otobüslerle karşılaştırılabilir operasyonel esnekliğe sahiptir. CO₂ emisyonları azaltılmıştır. Son kullanıcıların (sürücü ve yolcular) kullanıcı memnuniyeti oldukça yüksektir.

CHIC projesi, hidrojenle çalışan yakıt hücreli elektrikli otobüslerinin tam olarak ticarileştirilmesi için çok önemli bir adımdır¹⁸².

4.4.8. JIVE ve JIVE 2 Projeleri (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe)

Avrupa’da Hidrojenli Araçlar İçin Ortak Girişim (JIVE) projesi, Avrupa Birliği Horizon 2020 çerçeve programı ve FCH JU (Yakıt Hüresi ve Hidrojen Ortak Girişimi) 32 Milyon € hibeyle ortaklaşa finanse edilecektir. Ocak 2017’de başlatılan proje altı yıl sürecektir. Proje yedi ülkeden katılan 22 ortakla yürütülecektir. JIVE projesi 139 yeni sıfır emisyonlu yakıt hücreli elektrikli otobüsü ve beş ülkede yakıt ikmal altyapısını incelemekte ve yakıt hücreli otobüslerin ticarileşmesini kolaylaştırmayı hedeflemektedir (İngiltere 56, İtalya 12, Almanya51, Danimarka10, Letonya10). JIVE 2 ise Ocak 2018’de başlamıştır. Bu

¹⁸⁰ Clean Hydrogen in European Cities, <https://www.fch.europa.eu/project/clean-hydrogen-european-cities>, Erişim tarihi 15.01.2019.

¹⁸¹ Clean Hydrogen in European Cities, Final Report including Part A - Final Publishable Summary Report Part B - Final Restricted Full Report, <https://ruter.no/globalassets/dokumenter/fossilfri-2020/final-report-chic-2016.pdf>, , Ss 15 ve 30.

¹⁸² Eleanor Standen, Fuel Cell Buses, April 2018, http://hydrogenvalley.dk/wp-content/uploads/2018/04/11_FCB-OSLO18_ELEMENT-ENERGY.pdf, Erişim tarihi 15.02.2019.

iki proje kapsamında 2020'lerin başlarında Avrupa'da 22 şehirde yaklaşık 300 yakıt hücresel otobüs kullanmayı amaçlamaktadır¹⁸³.

JIVE, ölçek ekonomilerini açmak için (otobüslerin maliyetlerini azaltmak) tedarik faaliyetlerini düzenlemektedir. Proje kapsamında 10-30 arası büyük otobüs filolarının faaliyetleri gösterilmektedir. Bu büyük otobüs filoları, tek bir otobüs tedarikçisine büyük siparişlerin verilmesini sağlayacaktır.

Önceki uygulamalardan ziyade daha verimli tedarik zincirleri, daha verimli bakım işlemleri ve otobüs başına düşen genel maliyetlerin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda JIVE kanıtlanmış araçlara sahip otobüs üreticileriyle çalışarak ticarileşmek için güvenilirlik sağlamaktadır. Ayrıca JIVE 20'den fazla otobüs filosuna hizmet etmek için gerekli olan hidrojen ikmal istasyonları da test edilecektir. Buna ek olarak projenin, hidrojen maliyetini düşürme amacının yanı sıra FCEB'lerinin ticarileştirilmesi için gereken >% 99 güvenilirlik sunma yeteneği de test edilmek istenmektedir. Proje sonuçları kullanılarak, FCEB'lerinin otobüs operatörlerine teknik olarak hazır olduklarını ve politika yapıcılara ise sıfır emisyonlu yakıt hücresel elektrikli otobüslerin ekonomik olarak uygulanabilirliğini, gelecekteki hidrojen FCEB sektörünün gelişimi gösterilmek istenmektedir¹⁸⁴.

Kuzey İrlanda bazlı otobüs üretici Wrightbus firması JIVE projesinin bir parçası olan iki katlı ilk yakıt hücresel elektrikli otobüs Streetdeck FCEB'ü geliştirmiş ve İngiltere'nin Birmingham şehrinde düzenlenen fuarda tanıtmıştır (2018). Streetdeck FCEB'ü sipariş veren ilk şehir ise Londra'dır. Bu otobüsün yakıt hücresini Ballard firması, aktarma organı ise (motor hareketini tekerleğe iletmesini sağlayan parçaların tümü) Siemens üretmektedir. Otobüste 64 koltuk bulunmakta ve uzunluğu 10,9 metredir. 322 kilometre menzile sahip olan otobüsün yakıt ikmal süresi ise yaklaşık 7 dakikadır. Ayrıca hidrojen depolama tankları hafiftir¹⁸⁵.

¹⁸³ Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (JIVE), <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive>, Erişim tarihi 15.02.2019.

¹⁸⁴ Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe, <https://www.uitp.org/jive>, Erişim tarihi 15.02.2019.

¹⁸⁵ Wrightbus Shows World's First Fuel-Cell Double-Decker, 14 Nov 2018, <https://www.busworld.org/articles/detail/4153/wrightbus-shows-worlds-first-fuel-cell-double-decker>, Erişim tarihi 15.01.2019.

JIVE 2 projesi kapsamında, Avrupa genelinde 152 adet FCEB yer almakta ve bu otobüsler yedi ülkede konuşlandırılmaktadır (14 şehir). Bu proje ticari FCEB pazarına geçiş sürecinin bir sonraki aşamasıdır. Projelerin genel amacı olan ticarileştirme vizyonu için öncedeki projelerde kazanılan ivme devam ettirilmek istenmektedir. JIVE 2, bir yandan Avrupa'daki FCEB'lerin ticarileştirilmesini hızlandıran diğer yandan ise 2020'den itibaren daha geniş çaplı ölçek dağıtım pazarına hazırlanmaya odaklanan JIVE projesine destek vermektedir. FCEB'lerin ticarileştirilmesi için bazı zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu zorluklara karşı alınacak önlemlerden bazıları; öncelikle araca sahip olma maliyetinin azaltılması gerekmekte, hidrojen yakıt hücreli elektrikli otobüs modellerinin seçeneklerini artırmalı, büyük yakıt hücreli otobüs filolarının çalıştırılmasının uygulanabilirliği kanıtlanmalı gibi¹⁸⁶.

Yukarıda yer alan projeler incelendiğinde hidrojen FCEB'ler dünyanın birçok ülkesinde test edilmiş ve dizel otobüslerle karşılaştırılabilir bir performansa sahip oldukları anlaşılmıştır. Güvenlikli olması ve sessiz çalışma performansları sayesinde halk tarafından da büyük ilgi görmüştür. Dünyanın birçok şehrinde hidrojen üretim kapasitesi ve hidrojen istasyon sayılarının artırılması amaçlanmaktadır. İlk olarak hidrojen yakıtlı otobüslerin ticarileşmesinin istenmesinin nedeni ise daha yaygın bir kitleye hidrojen yakıt hücre teknolojisinin tanıtılmak istenmesidir. Sürekli olarak geliştirilen hidrojen yakıt hücreli elektrikli otomobil ve otobüslerle (hibrit teknolojisi) verimlilik artırılmak istenmektedir. Otobüsler artan üretimle beraber azalan maliyetlerle yaygınlaştırılmak istenmektedir. Şu an yüksek olan maliyetler uzun dönemde, günümüzde fosil yakıtlara dayalı olan otomotiv sektörüne göre karşılaştırılabilir bir maliyet gösterecektir. Çünkü otomotiv sektöründe fosil yakıtlara en iyi alternatif olarak yakıt hücresi teknolojisinin olduğu birçok araştırma ve yapılan testlerle ortaya konulmuştur. Hidrojen yakıt hücresi teknolojisinin en önemli avantajlarından biridir, her ülkenin kendi yakıtını üretebilmesidir (Görece kendine göre avantajlı olduğu kaynaktan hidrojen üretmektir). Fosil yakıtların dünyaya homojen bir şekilde yayılmamış olması, tükenebilir enerji kaynakları olması ve bir ülkeden başka bir ülkeye taşınmasının maliyetli olması nedeniyle ülkelerin kendi yerli yakıtlarını üretip kullanması fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırarak ekonomideki yükünü azaltacak ve enerji arz

¹⁸⁶ Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe 2, <https://www.uitp.org/jive-2>, Eerisim tarihi 15.01.2019.

güvenliğini artıracaktır. Bütün bu avantajlarının yanı sıra bu teknolojinin yan ürünün sadece ısı ve su buharı olması sayesinde sıfır emisyonlu (çevre dostu) bir teknoloji olması sebebiyle tercih edilebilirliğini artırmaktadır. Tüm avantajlara bakıldığında otomotiv sektöründeki artan enerji talebini karşılayabilecek itici güç hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlardır.

4.5. Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV) ile Geleneksel İçten Yanmalı Motorlu Araçların (ICE), Hibrit Elektrikli Araçların (HEV) ve Akülü Elektrikli Araçların (BEV), Karşılaştırılması

Otomotiv sektöründe gelişme gösteren akülü elektrikli araç (BEV) ve yakıt hücreli elektrikli araç (FCEV) teknolojileri ile olgunlaşmış geleneksel içten yanmalı motorlu araç (ICE) teknolojisi rekabet halindedir. Gelişen elektrikli araçlar, geleneksel içten yanmalı araçların yerini almayı amaçlamaktadır. ICE 'ler ise ilave teknolojilerle (hibrit, Plug-in Hybrid (geleneksel içten yanmalı motor ve sarj edilebilir batarya)) otomotiv sektöründeki baskınlığını korumaya çalışmaktadır. Tezin bu bölümünde yeni alternatif elektrikli araçlar ve geleneksel içten yanmalı motorlu araçların karşılaştırmaları yapılacaktır.

Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Hidrojen Birliğine göre; FCEV'lar ve BEV'lar sonunda otomotiv sektörüne hükmedecek alternatiflerdir. Çünkü enerji güvenliği, sera gazı emisyonu azaltma ve hava kalitesini artırma hedeflerini sağlayacak seçeneklerdir¹⁸⁷.

Fosil yakıtlara dayalı taşımacılık sektörü ekonomiyi, toplumu, çevreyi, küresel iklimi ve insan sağlığını önemli ölçüde etkilemektedir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar için hidrojen yakıtı özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiğinde fosil yakıtlara çekici bir alternatif oluşturmaktadır¹⁸⁸. Otomotiv endüstrisinde FCEV'ler geliştirilme aşamasındaki teknolojilerdir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar yüksek verimlilik, sıfır emisyon ve yurt içinde üretilen yakıtla çalışabilmeleri gibi önemli avantajlara sahiptirler. Bu avantajları sayesinde FCEV'ler küresel anlamda çevre, insan sağlığı, enerji güvenliği gibi birçok sorunu çözmede yardımcı olacak kapasitededir. Günümüzde Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) ve Bataryalı

¹⁸⁷ Alo, Otunniyi ve Pienaar, S 4.

¹⁸⁸ Fernández ve diğerleri, S 556.

Elektrikli Araçlar (BEV) en popüler olan iki temiz enerji alternatif teknolojidir. BEV; şarj edilebilir elektrikli araçlardır. HEV'ler ise İçten Yanmalı Motorlu Araçların (ICE) ve BEV'lerin dezavantajlarının üstesinden gelebilmek için geliştirilmiştir. Ancak bazı önemli dezavantajlarından dolayı endüstri tarafından bu teknolojiler tercih edilmemektedir. Bunlar BEV'ler için akü yüksek başlangıç maliyeti, uzun yakıt ikmal süresi (şarj), kısa sürüş menzili, azaltılmış yolcu kapasitesidir¹⁸⁹.

Tüketici açısından toplam araç maliyetini etkileyecek bakım ve onarım maliyetlerine bakacak olursak; fosil yakıtlı araçlara kıyasla, elektrikli araçların bakım ve onarım maliyetleri daha düşüktür. Örneğin on yıllık dönem için elektrikli otomobiller ile içten yanmalı motorlu otomobillerin servis ve bakım giderleri karşılaştırıldığında, dizel araçlarda bu maliyet 16.500 TL, benzinli araçlarda 15.000 TL iken elektrikli araçlarda ise 5.500 TL olarak belirlenmiştir. Bu durum tüketiciler açısından toplam araç maliyetinin azalması yönünde olumlu bir etki yaratmaktadır¹⁹⁰.

Yakıt kullanım ömrü analizi “Well-To-Wheel” (WTW) araç yakıtlarını ve teknolojilerini seçmek için hayati öneme sahiptir. WTW; kaynak çıkarma, yakıt üretimi, yakıtın araca teslimatı ve yakıtın son kullanımını kapsamaktadır. WTW analizi genellikle “Well-To-Tank” (WTT) ve “Tank-To-Wheel” (TTW) olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. WTT hammadde ve yakıt üretiminden yakıtın araç tankına verilmesine kadar olan kısmı (yakıt enerjisi ve emisyonları) değerlendirir. TTW ise taşıt işletme faaliyeti ve taşıtın çalışma esnasındaki yakıtla ilgili enerji ve emisyonları değerlendirir. Literatürde çeşitli otomotiv WTW çalışmaları bulunmaktadır¹⁹¹. Campanari ve diğerleri tarafından BEV ve FCEV'ler için WTW analizi yapılmıştır. Araştırma sonucuna göre BEV'in çok sınırlı sürüş aralığında en iyi sonuçları elde ettiğini, FCV'lerin ise uzun sürüş mesafeleri için daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır¹⁹².

¹⁸⁹ Mat ve diğerleri, Ss 123-124.

¹⁹⁰ Ustabas ve Simav, S 218.

¹⁹¹ S. Gupta ve diğerleri, “Life-cycle analysis of energy and greenhouse gas emissions of automotive fuels in India: Part 1 - Tank-to-Wheel analysis”, **Energy**, Vol. 96, (1 Feb 2016), S 684.

¹⁹² Stefano Campanari, Giampaolo Manzolini ve Fernando Garcia de la Iglesia, “Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations”, **Journal of Power Sources**, Vol 186, No 2, 2009, S 477.

Yakıt hücreli elektrikli araçların en büyük avantajlarından biri 500 km'den daha fazla menzile sahip olmasıdır. Ayrıca hızlı (3-5 dakika) yakıt ikmalidir. FCEV bir araç 100 km'lik bir yolu yaklaşık 1 kg hidrojenle alabilir. Hidrojen tankının hacmini azaltmak için hafif yapıdaki yüksek basınçlı sıkılaştırılmış hidrojen yaklaşık 700 barlık bir basınçla depolanabilir. Ancak yüksek basınca rağmen yüksek voltaj aküsü ve hidrojen tankları, geleneksel araçlı bir yakıt deposundan çok daha fazla yer kaplamaktadır¹⁹³. BEV'lar emisyonlu sürüş avantajı sunan, sessiz çalışma performansına sahip olan ve emisyonları azaltmada yardımcı olabilecek bir teknolojidir. Ancak BEV'ların maksimum menzil aralığı 100-150 km aralığında sınırlıdır. Ayrıca menzili artırmak için aküde ilave bir artış sağlarsa bu da ek maliyet ve aracın ağırlığında kesin bir artış demektir. Bu sebeple ICE olduğu gibi BEV araçlardada hibrit araç teknolojisi ilave edilmiştir. Buna ek olarak sıfır emisyonlu BEV'ler ancak emisyonlu bir elektrik arzıyla gerçekleştirilebilir (Şarj için kullanılacak elektrik yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilirse)¹⁹⁴.

Yakıt hücresi teknolojisi, geleneksel içten yanmalı motor teknolojisine (benzine) daha verimlidir. FCEV'ler batarya teknolojisine benzer şekilde çalışır fakat BEV'lerdeki gibi şarj etme ihtiyacı yoktur. Yakıt hücreleri, yakıt olarak hidrojen ve oksijen olduğu sürece sorunsuz çalışan ve atık olarak sadece su üreten eşsiz teknolojidir¹⁹⁵. Hidrojenin yakıtının en önemli avantajlarından bir tanesi bölgesel yaygın olan birincil enerji kaynaklardan üretilmesi ve daha önemlisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarından büyük miktarda üretim potansiyeline sahip olmasıdır¹⁹⁶.

Hibritli elektrikli araçlar, bir elektrik motoru tarafından desteklenen geleneksel bir yanmalı motora sahiptir. Ana yanmalı motora ilave enerji desteği sağlayacak akünün sınırlı kapasitesi vardır. Akü, motor tarafından üretilen elektrik ve fren enerjisinin geri kazanılmasıyla şarj edilmektedir. HEV'lar ilk etapta ICE ve BEV performansını artırmak için geliştirilmiş teknolojidir (Günümüzde yakıt hücreli araçlarda da uygulamaları vardır).

¹⁹³ Mirko Pundt ve diğerleri, "Fahrzeugintegration eines Brennstoffzellensystems", **ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift**, Vol 120, No 2, (February 2018), S 41.

¹⁹⁴ Jürgen Ogrzewalla, Marius Walters, Axel Kuhlmann, "Brennstoffzellen als Range Extender für Elektrofahrzeuge", **ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift**, Vol 115, No 11, (November 2013), S 857.

¹⁹⁵ Abhilasha Singh, India's first-ever hydrogen fuel cell powered bus by Tata Motors is here! Made in India bus emits only water, (15 March 2018), <https://www.financialexpress.com/auto/car-news/tata-motors-indianoil-corporation-flag-off-countrys-first-hydrogen-fuel-cell-powered-bus/1096895/>.

¹⁹⁶ Alo, Otunniyi ve Pienaar, S 4.

HEV'ların en faydalı tarafı ise normalde frenlemeden kaybedilen enerjinin geri kazanılması sonucu yakıt tasarrufu sağlamasıdır. Ayrıca geleneksel ICE'lere göre daha sessiz çalışma performansı göstermektedir. HEV yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını % 35'e kadar düşürebilmektedir. Bu ise yakıt ekonomisinde % 50'lik bir artış anlamına gelmektedir. Hibrit teknolojisi geleneksel içten yanmalı araçlarda kullanıldığında emisyonları düşüktür fakat sıfır emisyonlu bir teknoloji değildir¹⁹⁷. Hibrit teknolojisi geliştirilmiş ve Plug-in Hybrid Electric Vehicles (Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar) (PHEV)'lar piyasaya sürülmüştür. Bu araçlar bir geleneksel içten yanmalı motora (benzin veya dizel) ve büyük bir şarj edilebilir bataryaya sahip, içten yanmalı motora sahip oldukları için emisyonları olan araçlardır. Ayrıca sarj için gereken alt yapının olduğu sınırlı bölgelerde kullanılabilir.

Yakıt hücreli elektrikli araçlarda da ilave hibrit teknolojisi kullanılmaktadır. Yakıt hücreli araçlar geliştirilmeye ve çeşitlendirilmeye çalışılmaktadır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte Yakıt Hücreli Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (FCPHEV) kullanılmaya başlanmıştır. Bunun ilk örneği; Mercedes-Benz GLC F-CELL'dir. Araçta bir adet hidrojenle çalışan yakıt hücresi ve bir adet şarj edilebilir batarya mevcuttur. Bu aracın CO₂ emisyonu 0 g / km'dir. Akü ve yakıt hücresini birlikte barındırdığı için, uzun menzil ve kısa yakıt ikmali süresi ve sıfır emisyon avantajıyla günlük kullanıma uygun tamamen elektrikli bir araçtır. Araçta iki adet hidrojen tankı (küresel standart haline gelmiş 700 bar tank teknolojisi) bulunmaktadır. Dolu bir depo 4.4 kg hidrojeni barındırmaktadır. Yakıt ikmal süresi max. 3 dakikadır. 1 kg hidrojenle yaklaşık 100 km yol alabilmektedir. Ayrıca şarj edilmiş bir bataryayla yaklaşık 51 km yol alabilmektedir. Aynı zamanda 155 kW'lık bir çıkışa sahiptir¹⁹⁸.

Londra'da Baptista ve diğerleri tarafından enerji tüketimi ve CO₂ ile ilgili olası alternatif araç teknolojilerinin Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) yapılmıştır. Araştırma sonucuna göre Londra'da; Plug-in Hibrit Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCPHEV) (hem yakıt hücresi hem de sarj edilebilir batarya), Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (hem sarj

¹⁹⁷ Alo, Otunniyi ve Pienaar, Ss 3-4.

¹⁹⁸ Mercedes-Benz GLC F-CELL: Market launch of the world's first electric vehicle featuring fuel cell and plug-in hybrid technology, <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-GLC-F-CELL-Market-launch-of-the-worlds-first-electric-vehicle-featuring-fuel-cell-and-plug-in-hybrid-technology.xhtml?oid=41813012>, (Erişim tarihi 15.02.2019).

edilebilir batarya hem de içten yanmalı motorlu araç) (PHEV) ve akülü elektrikli araçlar (BEV), geleneksel ICE dizel araçlara alternatif olarak kabul edilmiştir.

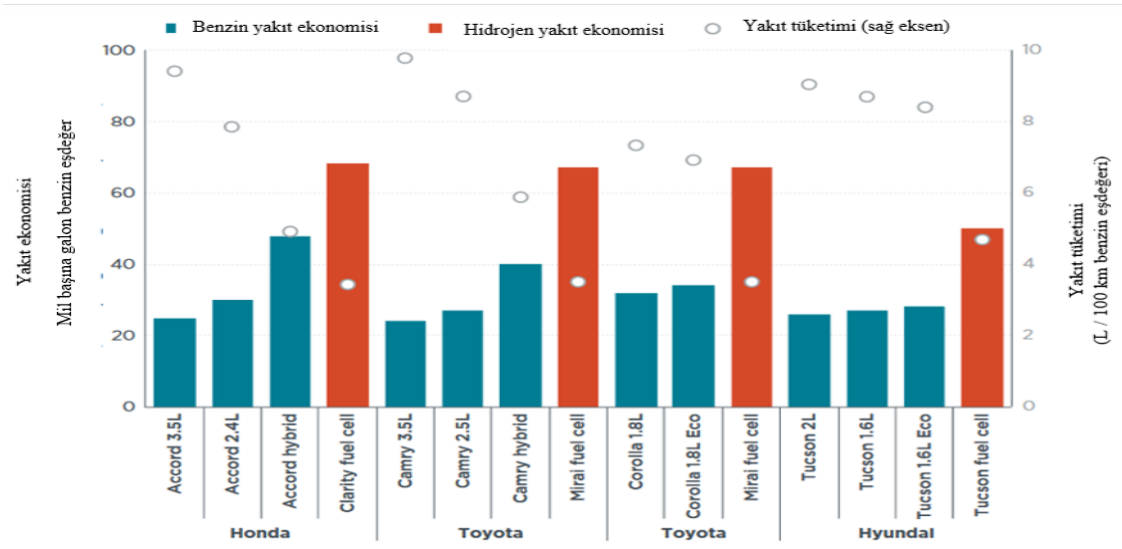
Yaşam döngüsü analizine göre; Tank-to-wheel (TTW) aşamasında; FCPHEV'lar ve FCHEV'lar geleneksel dizel ICE taksilere göre sırasıyla % 71 ve % 69 daha verimli bulunmuştur. Ayrıca TTW aşamasında dizel ICE taksilere kıyasla BEV'lar % 78 daha düşük enerji tüketimi elde etmiştir.

WTT aşamasında ise hidrojen üretmek için harcanan enerji, dizel yakıt üretmek için harcanandan % 30 daha fazladır. Elektrik üretimi ise en fazla enerji tüketiminden sorumludur (dizel'in iki katı kadar). Burada hidrojen ve elektrik üretim yollarının önemi karşımıza çıkmaktadır. Eğer yakıt olarak elektrik ve hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilirse WTT faktörleri değişir bunun sonucunda LCA sonuçları iyileşebilir. Elde edilen enerji tüketimi ve günlük taksi hizmetleri dikkate alındığında; FCHEV'lar günde bir kez yeniden doldurulmalıdır. Bunun yanı sıra FCPHEV hidrojen yakıtı dolumunun yanı sıra ek elektrik şarj süresi gerektirir, BEV'lar ise tamamen elektrikli oldukları için yakıt ikmal süreleri oldukça uzundur. Londra'da taksiler için yapılan LCA analizi sonucunda tam yaşam döngüsü çerçevesinde sürdürülebilir en iyi alternatif çözüm, gelişme potansiyeline sahip hidrojenle çalışan araçlardır¹⁹⁹.

Yakıt hücreli araçlar, geleneksel içten yanmalı taşıtlara göre verimlilikte önemli avantaj sağlamaktadır. Aşağıdaki tabloda üç ana yakıt hücreli taşıtın yakıt ekonomileri, aynı otomobil üreticisinin 2017 yılı için 4 farklı modeldeki taşıtları karşılaştırılmaktadır. Şekilde, ABD düzenleyici kurumları tarafından ortaklaşa geliştirilen ve yayınlanan araçların yakıt ekonomisi ve çevreye etkilerinden elde edilen veriler gösterilmektedir. Tabloda sol ekseninde, yakıt ekonomisi mil başına galon benzin eşdeğeri ve sağ ekseninde ise yakıt tüketimi L/ 100 km benzin eşdeğeri olarak ölçeklendirilmiştir. Örneğin; yakıt ekonomilerine baktığımızda; Toyota Mirai fuel cell bir galon benzinle yaklaşık 65 mil yol alırken, Camry hybrid 40 mil yol, Camry 2,5L ise 25 mil yol almatadır. Yakıt tüketimi açısından; Mirai fuel cell yaklaşık 2,5-3 L/ 100 km benzin eşdeğerine denk gelirken, Camry hybrid yaklaşık 6 L/ 100 km, Camry 2,5L ise 8,5

¹⁹⁹ Patricia Baptista ve diğerleri, "Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis", **Energy Policy**, Vol 39, No 9, 2011, S 4690.

L/ 100 km benzin eşdeğerine denk gelmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere yakıt hücreli araçlar, benzinli araçlara göre iki katı kadar daha verimlidir. Ayrıca hibritli araçlarla karşılaştırıldığında ise %40- %70 daha verimlidir.



Grafik 3 - Yakıt hücresi taşıtlarının ve benzeri benzinli taşıt modellerinin yakıt ekonomisi

Kaynak: Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update, OCTOBER 2017, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Hydrogen-infrastructure-status-update_ICCT-briefing_04102017_vF.pdf, Ss 3-4.

Yakıt hücreli elektrikli otobüsler (FCEB)'de dizel içten yanmalı otobüslere ve hibrit otobüslere kıyasla çok sayıda operasyonel, çevresel ve ekonomik faydalar sunmaktadır. FCEB'ler bu araçlara kıyasla daha verimlidirler. Bu otobüsler sıfır emisyon ve sessiz çalışma performanslarıyla da dikkat çekmektedirler. Ayrıca yakıt hücreli araçların kullanılması, petrole olan bağımlılığı azaltacak ve petrol fiyat dalgalanmalarının da önüne geçecektir. FCEB'ler ticarileşmeye doğru ilerliyor, yakıt hücre üreticisi ve yakıt hücreli otobüs üretici sayısı giderek artmaktadır²⁰⁰.

Yakıt hücreli araçlar daha az yakıtla daha uzun menzil (yüksek verimlilik), avantajlarının yanı sıra kısa süreli yakıt ikmali ve sıfıra yakın emisyon (yakıt olarak kullanılan hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi durumunda) gibi avantajlarıyla birlikte hem geleneksel ICE'larla hem de gelişen BEV ve HEV'larla rekabet etme potansiyeline sahiptir.

²⁰⁰ Hua ve diğerleri, Ss 975-976.

Her ne kadar yakıt hücreleri diğer bazı alternatiflerine kıyasla birtakım avantajlar sunup rekabetçi enerji piyasasına girebilecek kadar olgun olsa da, fiyatı yaygınlaşan ticarileşmeye ulaşmak için hala oldukça yüksektir. Ancak otomotiv sektöründe yakıt hücresel elektrikli araçların başarısı, hidrojenin ana enerji kaynağı olarak desteklenmesini sağlayan ve yakıt hücrelerinin performansını artırmayı (daha uzun ömür ve düşük maliyet elde etme) amaçlayan araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin başarısıyla doğru orantılıdır.

4.6. Hidrojen Enerji Sistemi Önündeki Engeller

Hidrojen enerji sisteminin geliştirilmesi önündeki en büyük engeller; altyapının geliştirilmesi sorunu ve günümüzde hala mevcut olan yüksek maliyetlerdir²⁰¹. Yakıt hücresel elektrikli araçların (FCEV) ticarileştirilmesinde, yakıt altyapısı ve FCEV'lerin arasındaki problem “tavuk ve yumurta” problemidir. Yeterli sayıda hidrojen yakıt ikmal istasyonu olmadan, müşteriler yakıt hücresel araç almak istemeyeceklerdir. Aynı şekilde yollarda yeterli sayıda FCEV olmadan, hidrojen ikmal istasyonları kurmak ekonomik açıdan uygun olmayacaktır²⁰². Yakıt hücresel elektrikli otobüsler (FCEB) projeler kapsamında oldukça geliştirilmiş ve dünya genelinde yaygınlaşmaya başlamış olsa da tam olarak ticarileşmesinin önünde; yakıt hücresi güç sistemlerinin dayanıklılığı sorunu, FCEB'lerinin nispeten ilk sermaye maliyeti, hidrojenin mevcudiyeti ve hidrojen maliyeti gibi engeller mevcuttur. Ancak bu engeller büyük miktarda hidrojen üretimi ve büyük yakıt ikmal tesislerinin (günde 1000 kg) kurulmasıyla ortadan kaldırılacaktır²⁰³.

Maliyet ve altyapı sorunun yanı sıra hidrojen enerjisinin önünde bilgi eksikliği ve yüksek teknolojik sorunları da vardır. Maliyet, teknoloji, bilgi sorunları aslında zincirleme birbirine bağlıdır. Bilginin artmasıyla birlikte araştırma geliştirme artacak ve bunun sonucu teknolojik ilerleme sağlanacaktır. Teknolojik ilerleme de hidrojenin kullanım maliyetini etkileyecektir²⁰⁴.

²⁰¹ Bas van Ruijven ve diğerleri, “The potential role of hydrogen energy in India and Western Europe”, **Energy Policy**, Vol 36, No 5, 2008, S 1654.

²⁰² Junye Wang, “Barriers of scaling-up fuel cells: Cost, durability and reliability”, **Energy**, Vol 80, 2015, S 510.

²⁰³ Hua ve diğerleri, S 976.

²⁰⁴ Münici Çakmak, Hilal ALBAL, “Global Hydrogen Bank”, **Gazi Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi**, Cilt 21, Sayı 3, S 269.

5. TÜRK OTOMOTİV SEKTÖRÜNÜN HİDROJEN EKONOMİSİNE GEÇİŞ SÜRECİ: SWOT ANALİZİ

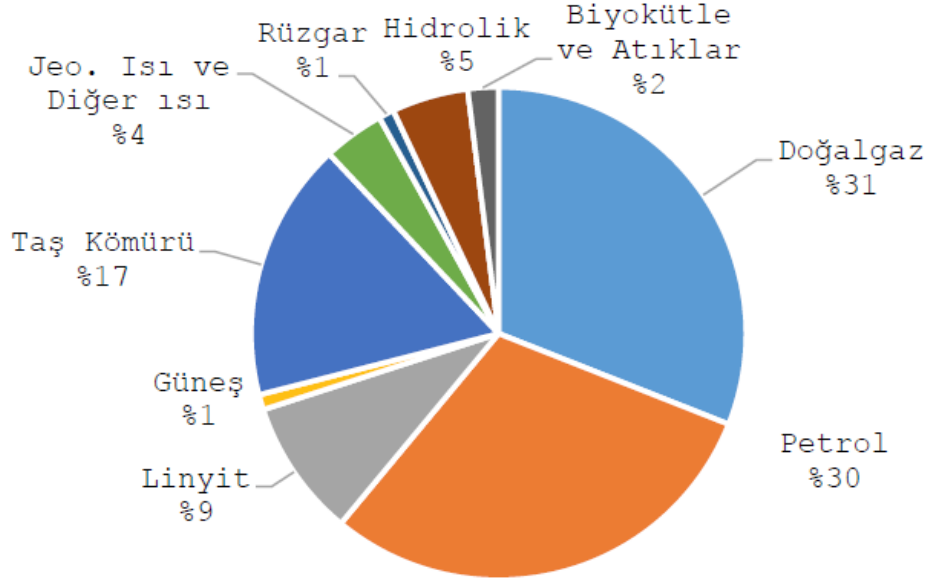
5.1. Türkiye ve Yenilenebilir Enerji

19. yüzyılda sanayileşmeyle birlikte dünyada enerji girdisinin önemi artmıştır. 1970’li yıllarda meydana gelen enerji krizleri (petrol fiyatındaki artış), enerji ithalatının fazla olduğu gelişmekte olan ülkeleri oldukça etkilemiştir. Yaşanan bu kriz sonrasında enerji tüketimiyle ekonomik büyüme arasındaki etkileşim dikkat çekmiştir. Eğer ekonomik büyüme sağlanmak isteniyorsa üretimde artışın sağlanması gerekmektedir. Üretimde artışın sağlanmasında ise enerji faktörü önemli bir girdidir. Türkiye ise enerjide yaklaşık olarak %70 oranında dışa bağımlıdır. Enerjide dışa bağımlılık oranına bakıldığında Türkiye’nin sürdürülebilir bir ekonomik büyüme sağlayabilmesi yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmasıyla doğru orantılıdır. Türkiye jeopolitik yapısının ve coğrafi konumunun sağladığı avantaj sayesinde birçok yenilenebilir enerji kaynağından faydalanma potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyele rağmen yenilenebilir enerji üretimi düşüktür. Bunun nedeni ise yasal düzenlemelerdeki hukuki kısıtlamalar, yüksek maliyetler, ekonomik sebepler vb.dir²⁰⁵.

2016 yılı verilerine göre Türkiye enerji ihtiyacının % 87’sini geleneksel fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Türkiye’de 2016’da toplamda tüketilen birincil enerji miktarı 129.27 Mtep’tir (milyon ton eşdeğer petrol). Kaynaklara göre tüketilen enerjinin dağılımı ise; Doğalgaz’da %31, Petrol’de % 30, Kömür % 26 (taş kömür %17, linyit %9), Hidroelektrik %5 ve Yenilenebilir enerjinin payı ise %8’dir. Yenilenebilir enerjinin dağılımı ise; Rüzgar %1, Güneş %1, Jeotermal % 4, Biyokütle ise % 2’dir ²⁰⁶.

²⁰⁵ Gül Dertli, Pelin Yınaç, “Yenilenebilir Enerji Tüketimi, Karbondioksit Emisyonu, Enerji İthalatı ve Ekonomik Büyüme: Türkiye Örneği”, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 15, Sayı 2, 2018, Ss 584-589.

²⁰⁶ Kadir Kaya, Mahmut Can Şenel ve Erdem Koç, “Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi”, **Technological Applied Sciences**, Vol 13, No 3, 2018, Ss 223-224.



Grafik 4 - Türkiye’de birincil enerji tüketiminin kaynaklar bazındadğılımı (2016)

Kaynak: Kadir Kaya, Mahmut Can Şenel ve Erdem Koç, “Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi”, **Technological Applied Sciences**, Vol 13, No 3, 2018, sayfa 224.

Fosil yakıt üretmeyen ülkelerin, ekonomik açıdan en büyük sorunu fosil kaynaklı yakıt ticaretinde dış ticaret açığı vermelerinin yanı sıra fosil yakıt üreticisi ülkelere bağımlı hale gelmeleridir²⁰⁷. Türkiye fosil yakıt kaynak rezervleri açısından yetersiz ve kısıtlı bir ülkedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmak kısa vadede oldukça maliyetlidir. Ancak uzun vadede enerjide dışa bağımlılığı azaltacaktır.

Türkiye 1980 sonrası dışa kapalı sanayileşme (ithal ikamesine dayalı) sürecini bırakarak ihracata dayalı sanayileşme sürecini hızlandırmış ve enerjiye olan talep artmıştır. Türkiye’de cari işlemler açığında son yıllarda meydana gelen artışın ana sebebi, dış ticaret açığıdır. Bu açığın ana nedenlerinden biri Türkiye’nin enerjiye olan bağımlılığından dolayı enerji ithalatıdır. C. Erdem HEPAKTAN tarafından Türkiye’nin 1990-2017 dönemindeki enerji tüketimi, GSYİH ve cari işlemler açığı arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre enerji tüketimi ve cari işlemler açığından, GSYİH’ya doğru tek yönlü bir ilişki ve enerji tüketimiyle cari işlemler açığı arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisine

²⁰⁷ Ayfer Ustabaş, “Mikro Ve Makro Etkileri Yönünden Elektrikli Otomobiller (Türkiye Ekonomisi Örneği)”, **Marmara Üniversitesi İ.İ.B. Dergisi**, Cilt 36, Sayı 1, (2014), S 271.

rastlanmıştır. Türkiye sürdürülebilir büyüme ve kalkınma hedefini gerçekleştirmek istiyorsa, enerji sorununu çözmesi gerekmektedir. Bunun için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmelidir²⁰⁸.

Enerji kaynakları içinde yenilenebilir enerjinin, artan enerji talebini karşılama, yerli kaynaklardan enerji ihtiyacını karşılama sonucu enerjide dışa bağımlılığı azaltma, enerjide kaynak çeşitlendirmesini sağlayarak sürdürülebilir enerji ve enerji güvenliğini sağlama, tükenmekte olan fosil yakıtlara alternatif enerji ve fosil yakıt tüketimi sonucu meydana gelen emisyonları en aza indirme gibi çok önemli avantajlara sahiptir. Dünyada fosil kaynak tüketimi artmaya devam ederken, hem dünyada hem de Türkiye’de karbon emisyonlarında da önemli artışlar görülmektedir. Çevreye ve insanlığa ciddi zarar veren geleneksel yakıtlar yerine alternatif yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının kullanımı sürdürülebilir bir büyümeyi sağlayacaktır. Aşağıda yenilenebilir enerji kaynakları içinde yer alan temiz hidrojen enerjisinin Türkiye açısından değerlendirilmesi yapılacaktır.

5.2. Türkiye ve Hidrojen Enerjisi

Türkiye gibi gelişmekte olan ekonomilerde, enerji ithalatına yüksek bağımlılık ülke ekonomisine aşırı baskı yapmasının yanı sıra enerji arz güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların kullanımı sonucu meydana gelen zararlar da ülke ekonomisinde önemli bir yüküdür (iklim değişikliği, küresel ısınmada artış, çevre sorunları, sağlık sorunları vb). Enerji, ekonomik büyümenin sürdürülebilmesi için olmazsa olmazdır. Dünyada alternatif temiz kaynaklardan enerji elde etmek için sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde birinci enerji kaynağı olmayan ancak enerji taşıyıcısı olan hidrojen, 21. yüzyılın enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Hidrojen Türkiye’de birçok yenilenebilir enerji kaynağından, Karadenizdeki hidrojen kükürt ve bor yataklarından ve sudan, temiz bir şekilde üretilir. Çeşitli kaynaklardan üretilmesi hidrojenin itici gücünü ortaya koymaktadır. Ayrıca tezin önceki bölümlerinde belirtildiği gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Ancak tezin ana konusu yakıt olarak

²⁰⁸ C. Erdem Hepaktan, “Türkiye’de Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme ve Cari İşlemler Açığı İlişkisinin Yapısal Kırımlar Altında Ekonometrik Analizi”, *Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Cilt 16, Sayı 4, (Aralık 2018), Ss 156-157.

hidrojenin yakıt hücreleri vasıtasıyla kullanılmasıdır. Hidrojen temiz ve yüksek verimli bir yakıttır. Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin yaklaşık ¼'ü ulaştırma sektörüne aittir. Bu da ulaşım sektöründe enerji tüketiminin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Otomotiv sektöründe yerli yakıt olarak hidrojenin kullanılması fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltacaktır. Ayrıca otomotiv sektörü diğer bütün sektörleri desteklediği için ekonomiye katkıda bulunacaktır.

5.2.1. Karadeniz'in Hidrojen Sülfür Potansiyeli

Nejat Veziroglu ve diğerleri tarafından Karadeniz'in derin sularında Hidrojen Sülfür (H_2S) araştırması yapılmış ve araştırma sonucuna göre; Karadeniz'de uygun teknolojiler kullanılarak 100-200 metre derinliğindeki hidrojen sülfürden, hidrojen enerjisi sağlamanın mümkün olduğu ortaya konmuştur. Karadeniz'de toplam hidrojen enerjisi potansiyelinin 4.587 milyar ton H_2S 'den üretilen yaklaşık 270 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu miktarda hidrojen yaklaşık 808 milyon ton benzin, 766 milyon ton doğalgaza, 841 milyon ton akaryakıt ve 851 milyon ton petrole eşdeğer olduğu tespit edilmiştir. Karadeniz'deki hidrojen sülfürün, bu büyük potansiyeli Karadenize komşu ülkelerin enerji talebinin yanı sıra Avrupa'nın da enerji ihtiyacını uzun yıllar karşılayabilir²⁰⁹.

Hidrojen Sülfür Karadeniz'de kirlenme sonucu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla Hidrojen Sülfür yataklarının bulunduğu bölgelerde oksijen yoktur ve buna bağlı olarak bu bölgelerde canlı varlıklara rastlanmamaktadır. Ağır bir kokuya sahip olan H_2S ayrıca yüksek oranda toksit içermektedir. H_2S 'ün çevresel zararlarını azaltmanın yolu onu birleşenlerine ayıştırmaktır. Bu işlem sonucu gaz formdaki kükürt ve hidrojen ortaya çıkmaktadır. Hidrojen üretmek için kullanılan teknikler şu anda oldukça maliyetlidir. Örneğin, suyun elektrolizi yöntemiyle hidrojeni sudan ayıştırmak için yüksek enerji gerekmektedir. Ancak H_2S 'den daha az enerjiyle hidrojen üretmek mümkündür. Yani hidrojen sülfürden hidrojen elde

²⁰⁹ Adnan Midillia ve diğerleri, "A parametric investigation of hydrogen energy potential based on H_2S in Black Sea deep waters", **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 32, No 1, 2007, Ss 122-123.

edilmesi sudan hidrojen üretmekten daha karlıdır²¹⁰. Her ülke kendine göre görece avantajlı olduğu kaynaktan hidrojen üretmelidir.

5.2.2. Sodyum Borhidrür (NaBH_4)

Türkiye dünyadaki bor (B_2O_3) rezervlerinin %72.1'ini elinde bulundurmaktadır. Türkiye bu büyük potansiyeli katma değere dönüştürmelidir. Bunun için büyük miktarlarda kullanılabilecek bor bileşikleri üretmesi gerekmektedir. Bu anlamda hidrojen enerjisinin depolanabildiği Sodyum Borhidrür (NaBH_4) üretimi iyi bir fırsat olarak önümüzde durmaktadır (hidrojen içeriği % 10.6). Geleceğin teknolojisi olan yakıt hücrelerinde enerji kaynağı olarak bor bileşiklerinin kullanılabilmesi oldukça önemlidir. Çünkü ülkemiz kaliteli bor maddeni açısından zengindir. Bu ise küresel çapta enerji hammaddesi olarak stratejik önem arz etmektedir. Ayrıca bor bileşikleri, enerji üretimi sonrasında zararlı gaz yaymazlar bu açıdan temiz enerji kaynağıdır. Yani NaBH_4 kullanarak hidrojen üretimi çevre dostu bir yöntemdir²¹¹. Sodyum borhidrür yakıt hücresi bir araçta iki şekilde kullanılabilir; hidrojen üretiminde ve yakıt hücrelerinde doğrudan kullanılabilir.

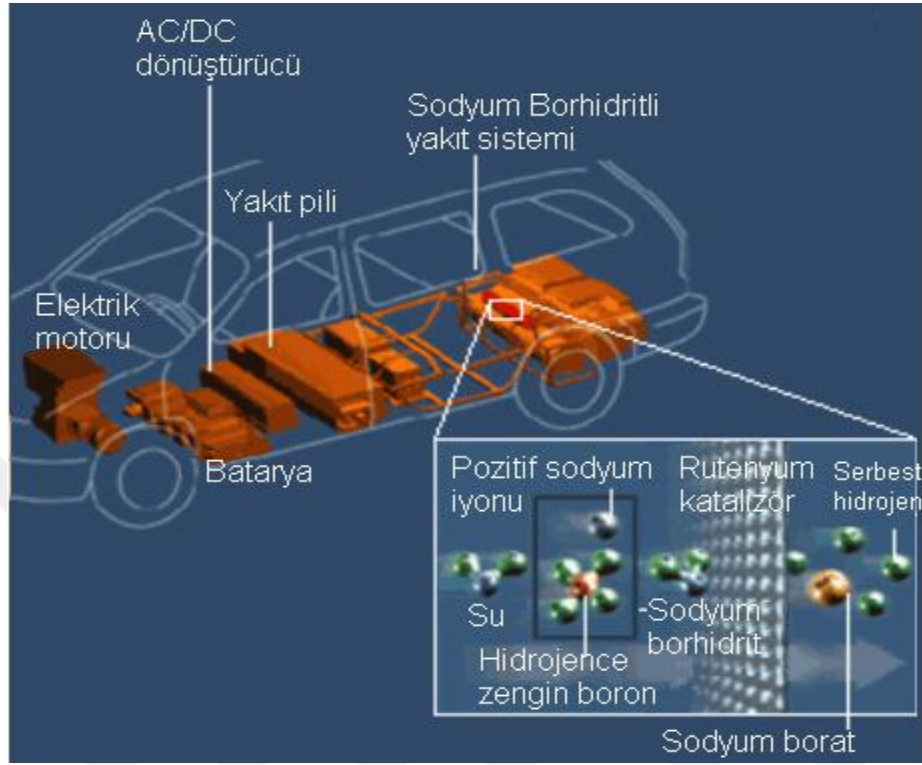
Doğrudan sodyum borhidrür yakıt hücresinde yakıt olarak doğrudan sıvı sodyum borhidrür kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yakıt hücresinin verimi hidrojenli sisteme göre daha düşüktür²¹².

²¹⁰ Nihat Öztürk, Mehmet Bilgiç ve Cemali Arslan, “Hidrojen Enerjisi Ve Türkiye’deki Hidrojen Potansiyeli”, http://www.emo.org.tr/ekler/51c5ffd6b62cc21_ek.pdf, Erişim tarihi 15.02.2019, Ss 2-3.

²¹¹ Yılmaz ve Şevik, Ss 217-218.

²¹² Osman Okur, “Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili Anot ve Katot Elektrokatalizörünün Sentezi ve Karakterizasyonu”, Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi, 2012, Ss. 18-19.

5.2.2.1. Sodyum Borhidrür'ün Yakıt Sisteminde Kullanılması



Şekil 4. Bir araca yerleştirilen yakıt hücresi ve ekipmanları

Kaynak: Adem Yılmaz ve diğerleri, "Usability in Vehicles of PEM Fuel Cells", 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), Elazığ: Fırat University, 19-22 October 2017, S 2652.

Araçta bir karışım olarak depolanan Sodyum Borhidrür su içerisinde çözülebilmektedir. Araçta enerjiye ihtiyaç duyulduğunda hidrojen üretmek için NaBH_4 karışımı (katalizör vasıtasıyla) kimyasal reaksiyona girmektedir. Gerçekleşen reaksiyon sonucu serbest kalan gaz halindeki hidrojenin yakıt hücresinden geçmesi sonucu elektrik enerjisini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca yine bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan diğer ürün ise sodyum bor tuzu'dur (sodyum metaborat). Sodyum bor tuzu atık olarak araçta birikmektedir. Sistem ihtiyaç duyulduğunda sorunsuz şekilde hidrojen üretmektedir. Bu teknolojinin avantajlarına bakacak olursak bunlar; Karışım içinde çözelti halinde bulunana sodyum borhidrür ve sodyum metaborat çözeltileri yanıcı değildir. Araçta kullanılan hidrojenin bir kısmının sodyum borhidrürden diğer kısmının ise sudan sağlanmaktadır. Sodyum borhidrür ağırlık/enerji oranı benzindeki orana yakındır. Kullanılan katalizör sürekli kullanıma uygundur. Ayrıca reaksiyon sonrası ortaya çıkan sodyum bor tuzu tekrar kolaylıkla sodyum borhidrür üretiminde kullanılabilir. Bu önemli özellikleri sayesinde bu yeni teknoloji dikkat çekicidir. Bor'un yaygın kullanılmasına imkan sağlayan sodyum borhidrür'ün hidrojen taşıyıcısı olarak

kullanılması, Türkiye'nin zengin bor kaynaklarından daha fazla yararlanmasına imkan sağlayacaktır²¹³.

5.3. Türkiye ve Yakıt Hücresi Teknolojisi

Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt hücre teknolojisi, hidrojen enerjisinin en önemli kullanım alanlarından bir tanesidir. Hidrojen yakıt hücresi teknolojinin enerji bağımsızlığı savaşında gelecek vaateden bir teknoloji olduğu inkâr edilemez²¹⁴.

Ülkemizde yakıt hücresi ve çeşitleri geliştirilmeye çalışılmakta bunun için, TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü Yakıt Pili Teknolojileri Laboratuvarında, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezinde çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca BOREN (Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü) ile TÜBİTAK işbirliğinde yakıt hücreleri üzerinde çeşitli projeler geliştirmektedir.

Çeşitli yakıt hücresi geliştirmek için birçok üniversite bünyesinde laboratuvarlar kurulmuştur ve çalışmalar yapılmaktadır. Temiz ve verimli hidrojen yakıtının kullanımının yaygınlaşabilmesi için, yakıt hücre sistemlerinin veriminin artırılması ve dayanıklı yakıt hücrelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun için ülkemizde bu alandaki Ar-Ge faaliyetlerinin artırılması gerekmektedir. Türkiye'de geliştirilen bazı yakıt hücreleri ve projeler;

BOREN tarafından desteklenen Sodyum borhidrür yakıt hücresi araç konulu projede % 95 oranında yerli yakıt hücresi üretimi yapılmıştır. Proje kapsamında yakıt hücresi sistemine üretilen katalizör, membrane elektrot ünitesi ve plaka entegre edilmiştir. Bor Mobil; dolu depoyla 150 km menzile, maksimum 80 km/saat hıza sahiptir ve 1kg borhidrür ile 50 km yol alabilmektedir²¹⁵.

²¹³ Hatice Atmaca ve İbrahim Sevim, "Bor'un Otomobil Yakiti Olarak Kullanılması", **Mühendis ve Makina**, Cilt 48, Sayı 564, (Ocak 2007), S 29.

²¹⁴ Gürsel Şefka ve Mert Ali Özel, "PEM Yakıt Pili'nin Simulink Modeli ve Analizi", **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, Cilt 23, Sayı 2, 2018, S 352.

²¹⁵ Çiğdem Karadağ ve diğerleri, "Boren-Tübitak Mam Bor Ve Hidrojen Teknolojileri Yetkinlik Merkezi", **Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi**, İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi, 20-23 Aralık 2015, S 2.

BOREN-TÜBİTAK MAM tarafından, İnsansız Hava Aracı (İHA) İçin Bor Temelli Hidrojen ve Yakıt Pili Sistemi Geliştirilmesi Projesi kapsamında insansız hava aracına sodyum borhidrürden hidrojen üretim sistemi, yakıt hücresi sistemi geliştirilerek bu sistemlerin İHA'na entegrasyonu ve testlerin yapılması hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda İHA, yakıt hücresi ve hidrojen üretim sistemi beraber geliştirilmiştir. Geliştirilen membran elektrot ünitesi ve bipolar plaka geliştirilen hava soğutmalı ve kendinden nemlendirmeli yakıt hücresi sistemiyle birleştirilmiştir. 200 W güce sahip İHA'ı sodyum borhidrür yakıtla 4 saat uçabilmektedir²¹⁶.

Elektrikli Araçlar İçin Bor Temelli Yakıt Pilli Menzil Arttırıcı bu proje de TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü ve BOREN tarafından ortaklaşa yürütülmektedir. Bu proje sodyum borhidrürden sağlanan hidrojenin Polimer Elektrolit Membran (PEM) tipi yakıt hücresinde kullanılması ve Spor Amaçlı Araç (SUV) tipi araca entegre edilmesini kapsamaktadır. Bu projenin elektrikli araçların pazar payını artırmada önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir²¹⁷. Projenin amacı; sodyum borhidrür'den hidrojen üretmek için katalizör/sistem ve özgün yakıt hücresi bileşenleri geliştirmek ve geliştirilen hidrojen üretim sistemi ve yakıt hücresi sistemlerinin SUV tipi araca entegre edilmesi ve aracın test edilmesidir. Elektrikli aracın menzilin tek bir şarjla ve sodyum borhidrürün kullanıldığı yakıt hücresiyle 450 km'ye ulaşması amaçlanmaktadır. Projede DMA firması tarafından üretilen 300 km menzile sahip akülü elektrikli aracın sodyum borhidrür destekli yakıt hücresi sistemiyle birleştirilerek menzilin 150 km daha artırılması amaçlanmaktadır²¹⁸.

Yakıt Hücresi Konsorsiyum Projesi; “Yerli yakıt hücresi birleşenlerinin yerli imkanlarla geliştirilmesi ve prototip üretimlerin gerçekleştirilmesi” için Ford Otosan, Araçelik, Tofaş, Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, TÜBİTAK, DemirDöküm, Aygaz birlikte çalışmalarını yürütmektedir²¹⁹.

²¹⁶ Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (boren), **Enerji**, Ankara, S 8.

²¹⁷ Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (boren), **Enerji**, Ankara, S 9.

²¹⁸ Çiğdem Karadağ ve diğerleri, Ss 4-5.

²¹⁹ Ahmet Murat Yıldırım, “Ford Otosan”, http://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/TEYDEB/etkinlikler/firma_sunumlari/9_FORD.pdf, S 16 (15 Ocak 2019).

Prof. Dr. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ile Vestel Savunma Sanayi'nin iş birliğinde, yapılan Ar-Ge çalışmaları sonunda lityum bataryalardan 10 kat daha verimli, tamamen sessiz çalışan ve %50 verimle elektrik enerjisi elde edebilen hidrojenle çalışan yerli katı oksit yakıt hücresi geliştirilmiştir²²⁰. Vestel 20 milyar Doları aşan yatırımıyla, geliştirdiği katı oksit yakıt hücresini piyasaya sürme aşamasına gelmiştir.

Dünya hidrojen teknolojisine geçiş sürecini hızlandırmış ve bu enerjiye yapılan yatırımlar artmıştır. Eğer ülke olarak bu geçiş sürecinde geç kalan taraf olmak istemiyorsak ve CO₂ azaltmayı, temiz ve yeşil emisyonun yanı sıra sürdürülebilir büyümeye katkıda bulunmak istiyorsak ülke olarak hidrojene geçiş sürecini hızlandırmalıyız.

Türkiye'de de diğer öncü ülkelerde olduğu gibi öncelikle bir pilot bölge seçilmeli, seçilen bölgede hidrojen yakıtı için gereken altyapıyı ve yakıt hücreli otobüs için özel tasarlanmış servisler kurulmalı, hidrojen yakıt hücreli otobüsler geliştirilip bu bölgede test edilmelidir. Yakıt hücreli otobüslerin ticarileşmesi hidrojen ekonomisine geçiş için en uygun yollardan biri olarak görülmektedir. Çünkü otobüsler, binek araçlara kıyasla daha fazla yolcu kapasitesinin yanı sıra daha fazla yakıt depolayabilmekte ve bu sayede yakıt ikmali gerekmeden daha uzun yol gidebilmektedir. Ayrıca Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelere daha çok toplu taşıma tercih edildiği için yakıt hücre teknolojisinin halk tarafından tanınması ve desteğinin alınması sağlanabilir. Özellikle gelişmiş ülkelerde yakıt hücresi teknolojisi oldukça gelişmiş olsa da ülkemizde de bu teknolojiye ciddi anlamda bir eğilim vardır. Bunun için membran geliştirme, katalizör miktarını düşürme, yakıt hücresi verimini artırma ve maliyeti azaltma çalışmaları devam etmektedir. Bu yeni teknoloji Türkiye'ye tamamen yerli aracını üretme fırsatının yanı sıra zengin bor kaynaklarını katma değere dönüştürme fırsatı da sunmaktır. Türkiyede otomotiv sektöründe yakıt hücreli araçların başarılı olabilmesi, enerji kaynağı olarak hidrojenin desteklenmesi ve yakıt hücrelerinin geliştirilmesi ve performansının artırması (daha uzun ömür ve düşük maliyet elde etme) amaçlayan araştırma ve geliştirme faaliyetlerine bağlıdır. Ayrıca hidrojene geçişin sağlanması için kamu kuruluşlarının desteği, sanayi- üniversite organizasyonları ve düzenleyici makamların işbirliklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

²²⁰ Enerji Panorama, Türkiye Enerji Vakfı, Cilt 6, Sayı 64, (KASIM 2018), <http://www.tenva.org/wp-content/uploads/2013/08/EnerjiPanorama-KAPAK-KASIM-2018-SMALL-1.pdf>, Erişim tarihi 15.02.2019, S 55.

Gelecek vaad eden yakıt hücre teknolojisi, Türkiye’de özellikle enerji alanında yer alan firmalara yeni fırsatlar yaratabilir. Ülkemizde enerji pazarında yer alacak olan yakıt hücrelerine kayıtsız kalmak demek Türkiye gibi önemli bir enerji pazarını kendi ellerimizle başkalarına sunmak demektir. Türkiye’de uygulama projeleri şeklinde yürütülen yakıt hücreleri projeleri, bilgi ve tecrübe transferi anlamında bu alanda faaliyet gösteren firmalar için önemli kaynak sağlayabilir. Hızlı bir şekilde gelişen hidrojen teknolojileri ve aynı hızda ticarileşen yakıt hücreleri konusundaki eğilimler firmalara önemli yeni fırsatlar, yeni iş alanları, yeni pazarlar yaratacaktır²²¹.

5.4. Türkiye’de Otomotiv Sektörü

Otomotiv sektörü, teknolojik gelişmeleri hızlandığı, üretimde bulunduğu ekonomiye yüksek katma değer yarattığı, ihracat yoluyla döviz girdisi sağladığı ve birçok sektörün gelişimine destek verdiği için lokomotif niteliğinde olan sektörlerden biridir. Otomotiv sektörü 2016 yılı itibariyle dünyanın en büyük 4. ekonomisi durumdadır ve dünya ekonomisinin % 5’ini oluşturmaktadır.

Türkiyenin ilk otomobille tanışması, İstanbul’un işgal altında olduğu Birinci Dünya Savaşı sonrası "American Foreign Trade" şirketi ABD’nin Ford ve Chevrolet otomobil, kamyonlarını ayrıca özel bir büro vasıtasıyla da İtalyan Fiat marka otomobillerin Türkiye piyasasına girişiyle olmuştur. 1929’da Ford Motor Company İstanbul’da üretim denemesine başlamıştır. Modern sayılabilecek imkanlara sahip fabrikada 450 işçi çalışmaktaydı ve fabrika günlük 48 adet kamyon ve otomobil yapım kapasitesine sahipti. Gerçekleştirilen üretimin bir bölümü Sovyetler Birliğine ihraç edilecekti. Ancak 1930’lardaki Büyük Buhran’ın olumsuz etkileri nedeniyle hedeflenen ihracat gerçekleştirilememiş ve bu girişim başarısız olmuştur²²².

Türkiye’nin otomotiv sanayisine yönelik ilk girişimlerinden biri, Koç Ticaret Şirketi’nin Ford Motor Company’nin Türkiye genel temsilciliğini almasıyla gerçekleşmiştir. 1956’da Ford tarafından Koç T.Ş.’ne montaj hakkına sahip bayi (Dealer Assembler) statüsü verilmiştir. Aynı yıl içerisinde Ford-Koç işbirliğiyle otomobil ve kamyon montaj fabrikası

²²¹ Polat ve Kiliç, S 59.

²²² Sercan Pişkin, Otomotiv Sektör Raporu: Türkiye Otomotiv Sanayii Rekabet Gücü ve Talep Dinamikleri Perspektifinde 2020 İç Pazar Beklentileri, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, Ekonomik Araştırmalar, Ocak 2017, S 7-25-26.

kurulmuştur. Fabrika günlük 8 adet kamyon, 4 adet binek otomobil üretim kapasitesine sahipti. Ayrıca verilen bu imtiyazın devamında 1959'da Ford ortaklığında İstanbul'da kurulan Otosan fabrikası da ticari araç üretimine başlamıştır²²³.

1954'te ilk Türk ortaklı Türk Willys Overland Ltd. (Amerikan otomobil şirketi) fabrikası kurulmuş ve orduya jip ve kamyonet üretmek için faaliyete geçmiştir. 1955'te Türk Otomotiv Endüstrisi A.Ş. ile kamyon, 1963'te İstanbul Otobüs Karoseri Sanayi A.Ş. ile ise otobüs üretimi için girişimde bulunulmuştur²²⁴.

1950 ve sonrası karayolu altyapısının gelişmesi, karayolu ulaşım ve taşımacılığa ağırlık verilmesi, kentleşmede ve gelir seviyesindeki artış gibi etkenlerden dolayı otomotiv ürünlerine talep artmış ve bu talep daha çok ithalatla karşılamıştır. 1954'te otomobil başına nüfus (kişi) sayısı ABD'de 3, Fransa'da 16, Brezilya'da 141, Türkiye'de ise 804'tü. Türk otomotiv sanayisinin temelleri 1950'li yıllarda atılmış olsa da otomotiv sanayisinin tam olarak kurulması ise 1960'ta geniş çaplı bir ithal ikamesi programıyla gerçekleşmiştir. Sadece yüksek gümrük tarifleri değil aynı zamanda ithalatı sınırlayan ithalat lisans belgeleri, vergi muafiyetleri, teknoloji ithalinde kullanılan tercihli döviz kurlarıyla Türk otomotiv sektörü çok boyutlu koruma altına alınmıştır. Türk otomotiv sanayinin kurulmasının 5. yılında %85 yerli parça kullanma zorunluluğu getirilmiştir. Amaç ithal ikamesini tamamlayıp, yerli üretime geçmektir. 1960-1980 ithal ikamesi dönemi olarak değerlendirilmektedir. Ancak Türk otomotiv sektörüne yönelik korumacılık daha uzun sürmüştür şöyle ki 1980'de ihracata yönelik açık ekonomiye geçildiği halde, 1989'da hala otomobil için gümrük duvarları varlığını sürdürmekteydi ve binek araba ithalatında %72- %150 kadar gümrük tarifleri uygulanıyordu.

1961'de Eskişehir Devlet Demiryolları fabrikasında ilk Türk otomobili olan “Devrim” otomobil üretilmiştir. Dört adetlik örnek model üretimiyile sınırlı devrim otomobiller aynı yıl talebin 5.000 adedin altında kalmasıyla talep yetersizliğinden üretimi

²²³ Gökhan Özdamar ve Mesut Albeni, “Türkiye Otomotiv Sanayisidiş Ticaret Rekabet Gücü Üzerine Bir İnceleme”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, Sayı 13, (2011), Ss 194-195.

²²⁴ Türk Otomotiv Sanayi ve TAYSAD'ın tarihçesi, 2017, <https://www.taysad.org.tr/tr/sayfa/Turk-Otomotiv-Sanayi-ve-TAYSADin-tarihcesi>, (Erişim Tarihi 25.08.2017).

durdurulmuştur. 1966'da Otosan tarafından fiberglass dolgulu "ANADOL" marka yerli otomobil üretilmiştir. 18 yılda toplamda 87 bin adet ANADOL marka otomobil üretilmiştir²²⁵.

1970'li yıllarda Türkiye'deki büyük holdingler tek başına otomotiv sektörüne girmektense yabancı yerli ortaklığı şeklinde firmalar kurmayı tercih etmişlerdir. 1971'de İtalyan Fiat lisansı ile TOFAŞ ve Fransız Renault lisansı ile OYAK-Renault firmaları kurdukları Bursa'daki fabrikalarda imalata başlamışlardır²²⁶.

Yerli firmalar ithal ikamesi ve korumacılığı sürdürme eğiliminde olmuşlar, yatırım gerektirmeyen eski teknoloji ve yüksek getiri oranlarını korumak istemişlerdir. Ancak 1 Ocak 1996'da yapılan Gümrük Birliği anlaşmasının etkileri ve dünya çapında küreselleşen otomobil endüstrisi karşısında bu artık mümkün değildir. Türkiye'de otomotiv sektöründe korumacılık sona ererken üretilen arabalar yabancı ortaklıydı. Ayrıca Gümrük Birliği'ne girişle beraber Avrupa pazarında ihracat sorunları olan Asyalı otomotiv firmaları Türkiye'de yeni fabrikalar kurmuş (Honda, Toyota, Hyundai) ve bu firmalar Türkiye'de ürettikleri araçları kolaylıkla Avrupa pazarına sunabilmişlerdir. Ayrıca Gümrük Birliğiyle birlikte Türk otomotiv sanayisinde ithalat artışının yanı sıra uluslararası standartlarda gerçekleştirilen üretim ihracatı da artmıştır²²⁷.

Ülke ekonomisinde stratejik önemi olan ve yüksek katma değer yaratabilen otomotiv sektörü teknolojik ilerlemelere bağlı olarak ara malına ve dış sermayeye bağımlı hale gelmiştir. 1990'lara kadar otomobil imalatı için gerekli olan girdilerin büyük kısmı Türkiye'de üretilmekteydi ancak hızlı ilerleyen teknoloji ve rekabetin artmasıyla maliyetleri azaltmak için girdiler ana firmanın bulunduğu ülkelerden sağlanmaya başlanmıştır. Bu durum sonucunda ise otomobil sektöründe girdi ithalatı ve dışa bağımlılık oranı yükselmiştir²²⁸.

Otomotiv sektöründe talebin ithal malı motorlu araçlara kayması ana ve yan sanayiye etkilemekte yerli parça kullanımını azaltmakta ve ithalatı artırmaktadır. Türk otomotiv sektöründeki yüksek ithalat oranları döviz çıkışına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda dış

²²⁵ Pişkin, Ss 26-27.

²²⁶ Özdamar ve Albeni, S 195.

²²⁷ Pişkin, Ss 27-28.

²²⁸ Selim Inançlı ve Ali Konak, "Türkiye'de İhracatın İthalata Bağımlılığı: Otomotiv Sektörü", **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi**, Cilt 6, Sayı 2, (Ekim 2011), S 344.

ticaret dengesi açık vermekte bu durum iç piyasayı daraltmaktadır. Bunun yanı sıra ulusal otomotiv sanayinin oluşmasında en büyük engeller, yerli parça kullanım oranının azalması, ana ve yan sanayide yabancı sermaye oranının artmasıdır²²⁹.

Çin, Hindistan, Rusya, Brezilya, Türkiye gibi, büyük ve demografik açıdan genç nüfusa sahip olan, gelir seviyesi hızlı yükselen ve araç sahiplik oranlarının doygunluk seviyesinden uzak olduğu ülkelerde motorlu araçlara talep hızla artmaktadır. Artan yaşlı nüfusa ve yüksek gelir seviyesine sahip gelişmiş ülkelerde ise, araç sahiplik oranı doygunluk seviyesine yaklaşmıştır. Bundan dolayı talep gelişmiş ülkelerden gelişmekte olan ülkelere kaymaktadır. Büyük otomotiv firmaları ticaret bariyerlerden kaçınmak istemelerinin yanı sıra yüksek taşıma maliyetlerinden dolayı araçlarını satılacağı pazarlara yakın ülkelerde montajlamayı tercih etmektedir²³⁰.

2000-2010 yılları Türk otomotiv sanayisi, global firmalar için önemli üretim ve ihracat üstlerinden biri konumundadır. Şöyle ki 2010 yılı itibariyle yıllık 1 milyon 60 bin adet otomobil olmak üzere toplamda 1.5 milyon adet araç üretim kapasitesine sahiptir²³¹. Türkiye'nin her ne kadar kendi otomotiv markası olmasa da, dünya üretim sıralamasında 2016'da 14. sırada yer almıştır. Bu ise Türk otomotiv sektörünün gücünü ortaya koymaktadır. Sektörel bazda bakıldığında otomotiv sektörü %17'lik payla Türkiye'nin ihracat alanındaki en büyük sektördür²³².

Forbes dergisine göre, dünyadaki en büyük otomotiv şirketleri Toyota, Mercedes-Benz, Honda, Ford, Hyundai, FCA Fiat Chrysler, Renault ve Isuzu firmalarıdır. Küresellemeyle birlikte bu firmaların tüm dünya pazarında Türkiye dahil üretim yapmaktadır. Türkiye'de ayrıca Alman Man firması ve Türkiye menşeli Hattat, Karsan, Otakar, Temsa, Türk Traktör firmaları da üretim yapmaktadır. En yüksek gayri safi yurtiçi hasılaya sahip

²²⁹ Suna Muğan Ertuğral, "Otomotiv Sektörü Ve Gümrük Birliği Sonrası Gelişmeleri", **Sosyal Bilimler Dergisi**, Sayı 2, (2011), S 82.

²³⁰ Pişkin, S 23.

²³¹ Özdamar ve Albeni, S 196.

²³² World Bank Data, 2017, http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?contextual=default&end=2016&locations=US-CN-DE-JP-GB-FR-IN-IT-BR-CAKR-RU-ES-AU-MX-ID-TR&start=2016&view=bar&year_high_desc=true, (Erişim Tarihi: 06/08/2017).

ülkelere bakıldığında bu ülkelerin dünya otomotiv üretimini elinde bulunduran ülkeler oldukları görülmektedir (ABD, Almanya, Japonya gibi).

2016 yılı Türk otomotiv endüstrisi perakende satışlarına bakıldığında, %32’lik satış oranıyla Alman menşeli firmalar birinci, %26’lık satış oranıyla Fransız menşeli firmalar ikinci toplamda %58’le bu iki ülkenin Türkiye otomotiv Pazarına hakim olduklarını söyleyebiliriz. Japon, Amerikan, İngiliz menşeli firmaların oranları ise %10’dur. Ayrıca yine perakende satışlara göre toplam satışların %67’si ithalat ile karşılanmaktadır. İthalatın ise yarısı Alman menşeli araçlardan oluşmaktadır. Türkiye’de üretilen araçların satışlarda sadece %33’te kaldığı görülmektedir²³³.

Türk otomotiv sektöründe 12 firma ve toplamda 18 fabrika faaliyet göstermektedir. Ayrıca 500 büyük sanayi kuruluşu (İstanbul Sanayi Odası tarafından açıklanan) içersinde ilk 10’da Ford Otosan, OyakRenault ve Tofaş yer alırken, listenin devamında Hyundai Assan, Mercedes-Benz Türk, Toyota Otomotiv Türkiye yer almaktadır²³⁴. Bu listeden de anlaşılacağı üzere Türkiye ekonomisi için otomotiv sektörü çok önemli bir kaynaktır.

Türkiye’de Mart sonu 2018 itibariyle trafiğe kayıtlı 11 milyon 493 bin 249 adet otomobilin %39’u likit petrol gazlı, %34,1’i motorin yakıtlı (dizel), %26,5’i ise benzin yakıtlıdır. Ayrıca toplamda 502 adet akülü ve 7,580 adet hibrit araç bulunmaktadır. Türkiye’deki elektrikli araç sayısı diğer ülkelere kıyasla oldukça düşüktür. Ayrıca verilerden de anlaşılacağı üzere Türkiyedeki otomobillerin %99.6’sında fosil yakıt kullanılmaktadır²³⁵. Örneğin; 2011 yılındaki dış ticaret açığı 105,9 milyar dolardır. Bu açığın %24.6’sı net petrol gideridir. Bu tablodan da anlaşılacağı üzere Türkiye’nin cari açığının en önemli nedenlerden biri petrol ithalatıdır²³⁶. Fosil yakıt kullanım maliyetinin ülke ekonomisi üzerindeki baskısı oldukça yüksektir. Türkiye alternatif yakıtlı araçlara yönelmeli ve petrol tasarrufu sağlamalıdır.

²³³ Sinan Yılmaz ve diğerleri, “Otomotiv Sektörünün Dünyadaki ve Türkiye’deki Değişimi”, **Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi**, Cilt 7, sayı 3, (Kasım 2017), Ss 690-691.

²³⁴ KPMG Company, “Otomotiv”, **Sektörel Bakış**, 2018, S 15.

²³⁵ Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Mayıs 2018, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24598>. (Erişim Tarihi 04.05.2018).

²³⁶ Ustabaş, S 287.

Ülkemizin yüksek genç nüfus oranı, gelir seviyesindeki artış vb. nedenlerden dolayı otomobilde iç talep yüksektir. Bu talep ithalat ağırlıklı değil yerli üretimle karşılanmalıdır. Türkiye ihracatının öncüsü olan otomotiv sektörü yeni ileri teknolojilerle desteklenmelidir. Dünyada hızla yükselen ve yüksek teknoloji gerektiren yakıt hücresi elektrikli araç teknolojilerine gereken yatırım yapılırsa yüksek teknolojili ürün üretimimiz artar, enerji kaynaklı dış ticaret açığımız da azalır. Bu teknolojiyle ülke olarak ulusal otomotiv sanayimizi oluşturabilmemiz için önümüzde büyük bir fırsat olarak durmaktadır.

Küresel rekabettin önemli oyuncularından olan Türk otomotiv sektörü, Türkiye'nin otomotivdeki enerji sorunu başta olmak üzere birçok sorununu çözecek ve onu bir adım öteye taşıyacak olan dünyada hızla gelişen, ilerleyen hidrojen yakıt hücresi elektrikli araç teknolojilerine yönelmelidir. Dünya artık içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara doğru bir dönüşüm içerisinde. Eğer Türkiye de bir an önce bu dönüşüm içerisinde yer almazsa, ülkemiz ekonomisi için önem taşıyan otomotiv sektörünün geleceği tehlike altında olacaktır.

5.5. Türkiye’de Otomotiv Sektörü Açısından Hidrojen Teknolojisinin Potansiyeli: SWOT Analizi

Hidrojen ekonomisi, enerji taşıyıcısı olarak hidrojeni ve hidrojeni elektrik enerjisine çeviren sabit ve araçsal uygulamalar olarak tanımlanmaktadır²³⁷. Türk otomotiv sektöründe hidrojenin yakıt olarak yakıt hücreleri vasıtasıyla kullanılmasının güçlü - zayıf yönleri, fırsat - tehditleri SWOT Analizi (Strengths-Weakness, Opportunities-Threats) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

²³⁷ Veras ve diğerleri, S 2020.

Tablo 2
Türkiye’de Otomotiv Sektörü Açısından Hidrojen Ekonomisinin SWOT Analizi

Güçlü Yönleri	Zayıf yönleri
✓ Hidrojen, evrende en az karmaşık halde olan ve en bol bulunan elementtir. Hidrojen aynı zamanda gezegen yüzeyinin % 60'ından fazlasını kaplayan suyun önemli bir bileşenidir²³⁸. ✓ Hidrojen yenilenebilir veya yenilenemez birçok enerji kaynağından elde edilebildiği için sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır²³⁹. Çeşitli kaynaklardan üretilbildiği için fosil yakıtlara önemli bir alternatif olarak görülmektedir²⁴⁰. Türkiye coğrafi konumu gereği çok çeşitli kaynaklardan hidrojen üretme potansiyeline sahiptir. ✓ Hidrojen temiz enerji kaynağıdır. Fosil yakıtların en iyi ikamesidir²⁴¹. ✓ Yakıt olarak hidrojen, otomotiv sektöründe yakıt hücresi teknolojileri yoluyla kullanılabilir (Yakıt hücresi yüksek verimlilik, sessiz çalışması, düşük emisyon, güvenilir olması, hızlı enerji dönüşümü gibi önemli avantajlara sahiptir)²⁴². ✓ Hidrojen, yüksek enerjili bir yakıttır²⁴³. Hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçları cazip kılan önemli bir avantajı ise geleneksel benzinle çalışan²⁴⁴ ve diğer	✓ Hidrojen doğada bileşikler halinde bulunduğu birincil enerji kaynağı değildir²⁵⁷. Bu da hidrojeni üretmek için ek enerji ihtiyacı anlamına gelmektedir²⁵⁸. ✓ Hidrojen enerjisinin önünde bilgi eksikliği ve ileri teknoloji sorunu vardır²⁵⁹. ✓ Hidrojen elementler içinde en hafif olanıdır ve oda sıcaklığında çok çabuk dağılma eğilimdedir ayrıca yoğunlaşmamış hidrojenin enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Enerji taşıyıcısı olarak hidrojeni gereken yoğunluğa yükseltmek oldukça pahalı olabilir²⁶⁰. ✓ Hidrojen altyapısının geliştirilmesi oldukça yüksek maliyetlidir²⁶¹. ✓ Hidrojenin üretim maliyeti, yüksektir²⁶². ✓ Hidrojen yakıt hücresi teknolojilerinin ekonomik, rekabetçi ve uygulanabilir olmamasının sebebi yüksek maliyetler²⁶³ ve yakıt hücresinin dayanıklılığı sorunudur²⁶⁴.

²³⁸ Umar K. Mirza ve diğerleri, S 1112.

²³⁹ Moreno-Benito, Agnolucci ve Papageorgiou, S 110.

²⁴⁰ Nanaki and Koroneos, S 1.

²⁴¹ Ural ve Karaca, S 147.

²⁴² Yakıt Pilleri, <https://www.elektrikport.com/universite/yakit-pilleri/10188#ad-image-0>, (29.11.2013).

²⁴³ Demirbaş, S 172.

²⁴⁴ Ahluwalia ve diğerleri, S 192.

Güçlü Yönleri	Zayıf yönleri
araçlara kıyasla verimliliklerinin yüksek olmasıdır²⁴⁵. ✓ Hidrojen yakıt hücreli araçlar içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla oldukça rekabetçi teknolojilerdir²⁴⁶. ✓ Taşıma esnasında enerji kaybı azdır ve güvenli şekilde taşınabilir. Hidrojen gazı havadan kat ve kat hafif olduğu için oldukça güvenli şekilde atmosfere karışır. Bu da yakıt hücreli araçların ne kadar güvenli olduğunun bir göstergesidir²⁴⁷. ✓ Elektrikli araçların bakım, onarım ve servis maliyetlerinin içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla düşük olması²⁴⁸. ✓ Türkiye petrol’de yüksek oranda dışa bağımlı bir ülkedir. Hidrojen gittikçe artan petrol ithalatlarına çekici bir alternatif oluşturmaktadır²⁴⁹. Türkiye’nin otomotiv sektöründeki yakıt çeşitlendirmesi benzine olan yoğun bağımlılığını azaltacaktır²⁵⁰. ✓ Hidrojen, petrole bağlı fiyat dalgalanmalarının olumsuz etkilerini de azaltabilecektir²⁵¹.	

²⁵⁷ Demirbaş, S 172.

²⁵⁸ Firak ve Dukic, S 13821.

²⁵⁹ Çakmak, Albal, S 269.

²⁶⁰ Afgan ve Veziroğlu, S 5462.

²⁶¹ Ruijvena ve diğerleri, S 1654.

²⁶² Reddi ve diğerleri, Ss 21855-21856.

²⁶³ Sharaf ve Orhan, S 816.

²⁶⁴ Tianyu ve diğerleri, S 12308.

²⁴⁵ Owen, S 5.

²⁴⁶ Burkert, Ss 9-13.

²⁴⁷ Toyota Mirai Avrupa yollarında, 2015, <https://www.dunya.com/sektorler/otomotiv/toyota-mirai-avrupa-yollarinda-haberi-295081>, (15 Ekim 2015).

²⁴⁸ Ustabas ve Simav, S 218.

²⁴⁹ Ahluwalia ve diğerleri, S 192.

²⁵⁰ Owen, S 5.

²⁵¹ Hua ve diğerleri, Ss 975-976.

Güçlü Yönleri	Zayıf yönleri
✓ Hidrojen, Türkiye'ye kendi yerli yakıtlarını üretme imkânı sağlayarak, yakıtta dışa olan bağımlılığını ve dış ticaret açıklarını azalacaktır²⁵². ✓ Hidrojen yeni bir enerji teknolojisi olmasından dolayı Türkiye için ihracat potansiyeli oluşturacaktır²⁵³. ✓ Karadenizin Hidrojen Sülfür potansiyeli²⁵⁴. ✓ Yakıt hücresi teknolojisinde bor birleşiklerinin kullanılabilmesi (bor kaynaklarını katma değere dönüştürme fırsatı). Türkiye'nin dünya kaliteli bor rezervlerinin %72.1'ini elinde bulundurması²⁵⁵. ✓ Ülkelerin yerli ulaştırma yakıtına erken geçişi, fosil kaynaklı yakıtların tükenmesiyle birlikte gelecekte meydana gelebilecek jeopolitik mücadeleleri engelleyebilir²⁵⁶.	

Fırsatlar	Tehditler
✓ AB'de Avrupa Komisyonu tarafından desteklenen hidrojen yakıt hücreli otobüs projeleri ✓ Fosil yakıtların ömrünün azalmış olması²⁶⁵, dünyada homojen şekilde	✓ Hidrojen ekonomisine geçişteki yüksek maliyetler. ✓ Hidrojen ekonomisinin sınırlı sayıda kitle tarafından bilinmesi. ✓ Yetersiz yasal çerçeve²⁷⁴.

²⁵² Aslan ve Özcan, S 157.

²⁵³ Aslan ve Özcan, S 157.

²⁵⁴ Midillia ve diğerleri, Ss 122-123.

²⁵⁵ Yılmaz ve Şevik, Ss 217-218.

²⁵⁶ Ally ve Pryor, S 618.

²⁶⁵ Üren ve Soylu, S 36.

Fırsatlar	Tehditler
dağılmamış fosil yakıtların biryerden başka yere taşınmasının ek maliyet oluşturması²⁶⁶. ✓ Fosil yakıt rezervleri açısından yetersiz olan Türkiye'nin fosil yakıt ticaretinde dış ticaret açığı vermesi²⁶⁷. ✓ Türk Otomotiv endüstrisindeki perakende satışların %67'si ithalatla karşılanması²⁶⁸. Türkiyede otomotiv sektöründeki yüksek ithalat oranlarının ülkeden büyük miktarlarda döviz çıkışına sebep olması²⁶⁹. ✓ Türk otomotiv sektöründe iç talebin yüksek olması ve araç sahiplik oranının doyumluk seviyesinden uzak olması²⁷⁰. ✓ Dünyada endişe verici boyutlara ulaşan CO₂ emisyonları, temiz hidrojen teknolojisine geçişini hızlandırabilir²⁷¹. ✓ Hidrojen teknolojisi çevreyi koruduğu için ülke ekonomisine destek olacaktır²⁷². ✓ Yeni bir teknoloji olan yakıt hücreleri hidrojen pazarı ve hidrojen ekonomisi için önemli teknolojik ürün ve potansiyel pazar olarak nitelendirilmesi. ✓ Hızlı bir şekilde gelişen hidrojen teknolojileri ve aynı hızda ticarileşen yakıt	

²⁷⁴ Michael Ball, Martin Wietschel, **The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges**, Cambridge University Press, (October 30, 2009), S 185.

²⁶⁶ Alternatif yakıt olarak hidrojen, gazi.edu.tr/posts/download?id=116880, erişim tarihi 12.02.2019.

²⁶⁷ Ustabaş, S 271.

²⁶⁸ Yılmaz ve diğerleri, Ss 690-691.

²⁶⁹ Muğan Ertuğral, S 28.

²⁷⁰ Pişkin, S 23.

²⁷¹ Alo, Otunniyi ve Pienaar, S 152.

²⁷² Özgür ASLAN, Burcu Özcan, S 157.

Fırsatlar	Tehditler
hücreleri konusundaki eğilimler Türkiye’de yer alan enerji alanındaki firmalara yeni fırsatlar, yeni iş alanları, yeni pazarlar yaratacaktır ²⁷³ .	

SWOT Analizde de anlaşılabileceği üzere hidrojen ekonomisinin güçlü yönleri oldukça fazladır. Bu da onun 21.yüzyılın enerjisi olarak nitelenilmesini sağlamaktadır. Hidrojenin çok çeşitli kaynaklardan farklı yöntemlerle üretilebilmesi onun itici gücüdür. Türkiye coğrafi konumu gereği çeşitli kaynaktan hidrojen üretme potansiyeline sahiptir. Bu sayede Türkiye kendine göre görece avantajlı olduğu kaynaktan hidrojen üretebilir. Örneğin; Karadeniz’deki Hidrojen Sülfür yataklarının toplam hidrojen enerjisi potansiyelinin yaklaşık 270 milyon ton olduğu ve 851 milyon ton petrole eşdeğer olduğu tahmin edilmektedir.

Yakıt olarak hidrojenin kullanılması tükenme tehlikesiyle karşı karşıya olan fosil kaynaklara önemli bir alternatif oluşturmasını sağlamaktadır. Temiz hidrojen, otomotiv sektöründe yakıt hücresi teknolojileri yoluyla kullanılabilir. Yakıt hücresi yüksek verimliliği ve hızı enerji dönüşümü gibi önemli avantajları barındıran teknolojilerdir. Ayrıca yakıt olarak hidrojen otomotiv sektöründe kullanılması, Türkiye’nin artan petrol ithalatına çekici bir alternatif olarak karşımızda durmaktadır. Türkiye’deki otomobillerin %99.6’sında fosil yakıt kullanılmaktadır ve dış ticaret açığının yaklaşık % 25’i net petrol gideridir ve cari açığın en önemli nedenlerinden biri petrol ithalatıdır. Türkiye’ye kendi yerli yakıtını üretme imkanını sunan hidrojen sayesinde yakıtta dışa olan bağımlılığını ve dış ticaret açığını azaltabilir.

Hidrojenin verimli bir yakıt olması sayesinde geleneksel motorlu araçlarla rekabet edebilecek potansiyele sahiptir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar benzinli araçlara göre yaklaşık 2 kat dizel araçlara göre ise 1,5 kat daha verimlidir. Ayrıca elektrikli araçların bakım, onarım ve servis maliyetleri içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla oldukça düşüktür.

Türkiye dünya bor rezervlerinin büyük bir kısmını elinde bulundurmaktadır. Bor birleşiklerinden (Sodyum Borhidrür) zararlı gaz yaymadan hidrojen üretebilme ve sodyum

²⁷³ Polat ve Kiliç, S 59.

borhidrür'ün (hidrojen depolamada yada doğrudan yakıt hücresinde) yakıt hücreli elektrikli araç teknolojisinde kullanılabilmesi Türkiye için zengin bor yataklarını katma değere dönüştürecek bir fırsattır.

Yeni bir enerji kaynağı olan hidrojen Türkiye için ihracat potansiyeli oluşturacaktır. Otomotiv sektörü ise ekonominin diğer sektörlerini desteklediği ve gayri safi yurtiçi hasılaya katkıda bulunduğu için ekonomik büyümenin önemli bir parçasıdır. Türkiye'nin otomotiv sektöründe alternatif yakıt olarak hidrojeni kullanması hem ekonomideki yakıt yükünü azaltacak hemde büyümeyi destekleyecektir. Bütün bunlara ek olarak yakıt olarak hidrojen Türkiye'yi petrole bağlı fiyat dalgalanmalarından koruyacaktır.

Zayıf yönleri ise; Hidrojen birincil enerji kaynağı değildir. Bu ise üretilmesi için ek enerji ihtiyacı anlamına gelir buda ek maliyet demektir. Türkiye açısından hidrojenin yakıt hücresi vasıtasıyla otomotiv sektöründe kullanılması önündeki en büyük engeller ileri teknoloji sorunu, başlangıç için yüksek altyapı maliyetleri ve bilgi eksikliğidir. Ayrıca otomotiv sektöründe kullanılacak yüksek verimli ve dayanıklı yakıt hücreleri geliştirilmelidir.

Fırsatlara bakacak olursak; Yeni bir teknoloji olan yakıt hücresi dünyada potansiyel bir rekabet alanı ve pazar olarak görülmektedir. Türkiye'de otomotiv sektöründe iç talep yüksektir ve araç sahiplik oranı doygunluk seviyesinden oldukça uzaktır. Türkiye'nin otomotiv sektörü %17'lik pay ile ihracat alanındaki en büyük sektördür. Ancak gerçekleşen ihracatın büyük kısmı ithalatla karşılanmaktadır. Otomotiv sektöründeki bu yüksek ithalat oranları ülkeden büyük miktarda döviz çıkısına sebep olmaktadır. Bundan dolayı Türkiye'nin ihracat öncüsü otomotiv sektörü yeni ileri teknolojilerle desteklenmelidir. Dünyada hızla gelişen yakıt hücresi teknolojisi Türk otomotiv sektörü için büyük fırsattır. Çünkü bu yeni teknoloji Türkiye'ye tamamen yerli araçlarını üretme imkanı sunmaktadır. Türkiye kendi hidrojen yakıt hücreli elektirikli araçlarını geliştirise; iç talebi karşılayabilir, ihracat potansiyeli oluşturur ve yeni istihdam alanları yaratabilir. Öte yandan hidrojen temiz bir yakıttır ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin otomotiv sektöründe yakıt hücreli elektrikli araçlarda kullanılması egzoz emisyonlarını da azaltacaktır.

Hidrojen çevreji koruyan temiz enerji kaynağı olduğu için ülke ekonomisine destekte bulunacaktır. Önümüzdeki yıllar içerisinde hidrojenli araçların dünyada pazar payı artacak ve

otomotiv sektörüne yeni bir soluk katacaktır. Türkiye’nin otomotiv sektöründe hidrojenden faydalabilmesi önündeki en büyük tehdit unsurları ise; Bu teknolojiye geçişteki yüksek maliyet ve hidrojen teknolojinin sınırlı bir kitle tarafından bilinmesidir.



6. SONUÇ

2017 yılı verilerine göre dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık %86'sını dünyaya homojen şekilde dağılmamış olan petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenemez enerji kaynakları oluşturmaktadır. Dünya nüfusu her geçen gün hızla artmakta ve enerjiye olan talep de buna bağlı olarak artış göstermektedir. Tükenme tehlikesiyle karşı karşıya kalan fosil kaynaklar uzun dönemde bu artan enerji talebini karşılayamayacaktır. Fosil kaynak kullanımı sonucu artan endişeler nedeniyle dünya enerji sektöründe alternatif, yenilenebilir, temiz enerji kaynakları aramaya yönelmiştir. Bu anlamda hidrojen umut verici bir enerji taşıyıcısı olarak ortaya çıkmıştır. Hidrojen, bol miktarda rezervi ve kullanım aşamasında sıfır emisyon avantajları sayesinde yeni enerji alanında önemli bir rol oynayacaktır. Hidrojen ekonominin tüm sektörlerinde çeşitli uygulamalarla kullanılabilir.

Hidrojen temiz bir enerji olarak adlandırılmaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklardan fosil yakıtlara kadar çeşitli kaynaklardan farklı yöntemlerle üretilmektedir. Ancak temel soru ise kabul edilebilir bir maliyetle, büyük miktarlarda, sürdürülebilir bir şekilde hangi kaynaktan üretilmesi gerektiğidir? Seçilecek hidrojen üretim yöntemi maliyet, nüfus, mevcut enerji altyapısı, ülkenin coğrafi konumu, kaynağa erişebilirlik gibi özellikler dikkate alınarak yapılmalıdır.

Dünyadaki mevcut otomotiv sektörü, fosil yakıtlara dayanmaktadır. Taşımacılık sektörü dünya enerji talebinin yaklaşık % 25'inden ve sera gazı emisyonlarının ise yaklaşık % 23'ünden sorumludur. Fosil yakıtların tükenmesini, çevre kirliliğini ve artan kirletici sera gazı emisyonları endişeleri nedeniyle, hidrojen gibi alternatif temiz ulaşım yakıtlarına olan ilgi artmakta ve yakıt hücreleri vasıtasıyla da hidrojen yakıt olarak otomotiv sektöründe kullanılabilmektedir. Geçmişten günümüze hem elektrik hem otomotiv sektörü birbirinden bağımsız gelişme göstermiştir. Ancak otomotiv sektöründe ki en büyük değişim içten yanmalı motorlardan elektrikli motorlara geçişle olacaktır. Yapılan sayısız araştırma hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçların geleneksel içten yanmalı araçlar ve alternatif diğer elektrikli araçlara kıyasla oldukça verimli ve rekabetçi olduklarını göstermiştir.

Polimer Elektrolit Membran (PEM) teknolojisine dayanan hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarını azaltmada etkili bir yoldur ve en önemli hidrojen uygulamalarıdır. Hidrojen yakıt hücresi araçların herkes tarafından kullanılan birer ürün olabilmesi için, fosil yakıtların mevcut alt yapı sistemi gibi benzer bir sistemle üretilmesi, depolanması ve taşınması gerekmektedir. Halihazırda dünyada hidrojenin maliyeti, yakıt ikmal istasyonlarının maliyeti, yakıt ikmal kapasitesinin düşüklüğü, ölçek ekonomisi eksikliği ve yollarda hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçların az olması nedeniyle yüksektir. Dünyada taşıt üreticileri, hidrojen sağlayıcıları ve hükümetlerin destekleriyle yollardaki yakıt hücresi taşıtların sayılarının artırılması için hidrojen altyapı ağları geliştirilmeye devam edilmektedir. Bunun için birçok ülkede hidrojenin üretim maliyeti düşürülmeye çalışılmakta ve her geçen gün yollardaki yakıt hücresi elektrikli araç sayısı artırılmaktadır. Günümüze kadar istisnalar dışında geliştirilen hidrojen yakıt hücresi elektrikli araç araştırma ve uygulamaları gelişmiş ülkeler tarafından yapılmaktadır. Ancak gelişmekte olan ülkeler alternatif ulaşım büyük ihtiyaç durmaktadır. Çünkü enerji ithalatına yüksek bağımlılıkları söz konusudur. Bu ise ekonomileri için büyük bir yükür.

Türkiye de enerji ihtiyacının büyük bir kısmını fosil yakıtlardan sağlamaktadır. Ayrıca enerjide yaklaşık % 70 oranında dışa bağımlı bir ülkedir. Bu yüksek bağımlılık ülke ekonomisine aşırı baskı yapmanın yanı sıra enerji arz güvenliğini de tehlikeye atmaktadır. Türkiye'deki toplam enerji tüketiminin % 20'den fazlası otomotiv sektörüne aittir. Yakıt olarak hidrojenin yakıt hücresi vasıtasıyla otomotiv sektöründe kullanılması ülkemiz için gelecek vaat eden bir teknolojidir. PEM yakıt hücresi tasarım ve işletim açısından otomotiv sektörüne en uygun yakıt hücresi türüdür. Ülkemizde otomotiv sektöründe temiz ve verimli hidrojen yakıtının kullanılabilmesi için verimli ve dayanıklı PEM yakıt hücreleri geliştirilmelidir. Bunun için ise bu alandaki Ar-Ge faaliyetlerinin hızlandırılması gerekmektedir.

Türkiye coğrafi konumu gereği çeşitli kaynaklardan hidrojen üretme potansiyeline sahiptir. Türkiye dünya kaliteli bor rezervlerinin % 72'sini elinde bulundurmaktadır ve bor birleşikler kullanılarak hidrojeni araçta depolamak ve yakıt hücresi teknolojisinde doğrudan kullanmak mümkündür. Bu Türkiye için zengin bor yataklarını katma değere dönüştürecek bir fırsattır.

Hidrojen ekonomisine geçiş başlangıçta oldukça maliyetli olsa da uzun dönemde birçok sorunu çözecektir. Hidrojen ekonomisi Türkiye’ye hem yerli yakıtı üretme fırsatı sunmakta hem de yakıt hücresi teknolojisi uygulamasıyla Türk otomotiv sektörüne yerli yakıt hücreli elektrikli araçlarını geliştirme fırsatı da sunmaktadır.

Hidrojen yakıtı Türkiye’nin otomotiv sektöründe petrole olan yoğun bağımlılığını azaltabilir, Türkiye’yi petrole bağı fiyat dalgalanmalarından koruyabilir, ekonomideki yakıt yükünü azaltarak ekonomik büyümeyi destekleyebilir ve dolayısıyla yakıtta dışa olan bağımlılığı azaltacağı için Türkiye’nin dış ticaret açığını da azaltabilir. Ayrıca yeni bir enerji kaynağı olan hidrojen Türkiye için ihracat potansiyeli de oluşturacaktır.

Türkiye’nin ihracat öncüsü otomotiv sektöründe gerçekleştirilen ihracatın ve iç talebin büyük bir kısmı ithalatla karşılanmaktadır. Otomotiv sektöründeki yüksek ithalat oranları ülkeden büyük miktarlarda döviz çıkışlarına sebep olmaktadır. Dünyada hızla gelişen yakıt hücresi teknolojisi Türk otomotiv sektörü için büyük fırsattır. Çünkü bu yeni teknoloji Türkiye’ye tamamen yerli araçlarını üretme imkanı sunmaktadır. Türkiye kendi hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlarını geliştirirse; iç talebi karşılayabilir, ihracat potansiyeli oluşturur ve yeni istihdam alanları yaratır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin otomotiv sektöründe yakıt hücreli elektrikli araçlarda kullanılması Türkiye’nin egzoz emisyonlarını da azaltacaktır.

Otomotiv sektöründe yakıt hücreli elektrikli araçların başarısı, hidrojenin ana enerji kaynağı olarak desteklenmesini sağlayan ve yakıt hücrelerinin performansını artırmayı (yüksek verimlilik, daha uzun ömür ve düşük maliyet) amaçlayan araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin başarısıyla doğru orantılıdır.

Dünya enerji savaşında ülke olarak geç kalan taraf olmak istemiyorsak bir an önce verimli ve temiz hidrojen enerjisinden faydalanmamız gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

Hordeski Michael, “**Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power**”, The Fairmont Press, 2009.

Markov Sergei A, “**Hydrogen economy**”, Encyclopedia of Environmental Issues, Salem Press, Editor: Craig W. Allin, 2011.

Zohuri Bahman, “**Hydrogen Energy Technology, Renewable Source of Energy, Hybrid Energy Systems**”, Springer International Publishing, 2018.



Sürelî Yayınlar

- Acar Canan ve İbrahim Dincer, “Energetic and exergetic investigations of an innovative light-based hydrogen production reactor”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 43, No 22, (31 May 2018), S 10250.
- Afgan Naim ve Ayfer Veziroglu, “Sustainable resilience of hydrogen energy system”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 37, No 7, (April 2012), S 5462.
- Ahluwalia Rajesh K. ve diğerleri, “Fuel economy of hydrogen fuel cell vehicles”, **Journal of Power Sources**, Vol 130, No 1–2, (3 May 2004), S 192.
- Ally Jamie and Trevor Pryor , “Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems”, **Journal of Power Sources**, Vol 170, No 2, 2007, S 401.
- Ally Jamie ve Trevor Pryor, “Accelerating Hydrogen Implementation by Mass Production of a Hydrogen Bus Chassis”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol 13, No 3, 2009, S 618.
- Alper Kerem, “Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri”, **Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 5, Sayı 1, 2014, S 6.
- Altuğ Tekin ve Füsun Özkan, “Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi, Doğrulanması ve Raporlanması”, **Verimlilik Dergisi**, Cilt 0, Sayı 2, (2015), Ss 74-75.
- Aslan Özgür ve Burcu Özcan, “Sürdürülebilir Kalkınma ve Hidrojen Enerjisi”, **e-Journal of New World Sciences Academy**, Cilt 3, Sayı 2, (2008), S 157.
- Atmaca Hatice ve İbrahim Sevim, “Bor’un Otomobil Yakıtı Olarak Kullanılması”, **Mühendis ve Makina**, Cilt 48, Sayı 564, (Ocak 2007), Ss 27-31.
- Baptista Patricia ve diğerleri, “Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis”, **Energy Policy**, Vol 39, No 9, 2011, S 4690.
- Bayraç H.Naci, “Enerji Kullanımının Küresel Isınmaya Etkisi ve Önleyici Politikalar”, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 11, Sayı 2, (2010), S 231.
- Bozkurt Cuma, Aslı Şentürk, “Yenilenebilir Enerji ve Ekonomik Büyüme: Avrupa Birliği ve Türkiye Üzerine Bir Araştırma”, **Journal of International Trade and Economic Researches**, Cilt 1, Sayı 2, 2017, Ss 223-242.

- Burkert Andreas, “Die Brennstoffzelle kommt kräftig in Fahrt”, **MTZ - Motortechnische Zeitschrift**, Vol 76, No 9, (September 2015), Ss 9-13.
- Çakmak Münci ve Hilal Albal, “Global Hydrogen Bank”, **Gazi Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi**, Cilt 21, Sayı 3, S 269.
- Campanari Stefano, Giampaolo Manzolini ve Fernando Garcia de la Iglesia, “Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations”, **Journal of Power Sources**, Vol 186, No 2, 2009, S 477.
- Çelik Selahattin, “Akiş Kanali Tasariminin Pem Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi”, **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt 7, Sayı 1, 2018, S 408.
- César Aldara da Silva ve diğerleri, “Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers”, **Journal of Cleaner Production**, Vol 207, (10 January 2019), S 752.
- Chen Dingyue ve diğerleri, “Basal Study on Power Control Strategy for Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle”, **Telkomnika**, Vol 13, No 2, (June 2015), Ss 421-422
- Chitragar Parashuram R, K V Shivaprasad ve Kumar G N, “Use of Hydrogen in Internal Combustion Engines: A Comprehensive Study”, **Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics**, Vol 1, No 3, (2016), S 85.
- Çıtar Emre ve Buket Kılıç Pala Pınar, “Yenilenebilir Enerjinin Enerji Güvenliğine Etkisi”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, Cilt 3, Sayı 25, 2016, Ss 79-102.
- Demir İlknur, Cem Emeksiz, “Potential and Use of Renewable Energy Resources in Turkey”, **Journal of New Results in Science**, Cilt 5, Sayı 12, (2016), Ss 81-87.
- Demirbaş Ayhan, “Future hydrogen economy and policy”, **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, Vol 12, No 2, 2017, S 172.
- Dertli Gül ve Pelin Yınaç, “Yenilenebilir Enerji Tüketimi, Karbondioksit Emisyonu, Enerji İthalatı ve Ekonomik Büyüme: Türkiye Örneği”, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 15, Sayı 2, 2018, Ss 584-589.
- Dincer İbrahim ve Canan Acar, “Innovation in Hydrogen Production”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 22, 2017, Ss 14845-14846.
- Fernández Roberto Álvarez ve diğerleri, “Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms”, **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Vol 81, (January 2018), S 656.

- Firak Mihajlo ve Ankica Dukic, “Hydrogen transportation fuel in Croatia: Road map strategy”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 41, No 31, (August 2016), S 13821.
- Gao Dawei ve diğerleri, “Comparative study of two different powertrains for a fuel cell hybrid bus”, **Journal of Power Sources**, Vol 319, 2016, S 9.
- Gultekin, A.H. ve Orgun, Y, “Natural Gas and Environment”, **Ecology Environment Magazine**, Cilt 9, 1993, Ss 37-41.
- Güngör Afşin, Beste Şimşek, Ali Ö. Akyüz, “Global Enerji Eğilimleri ve Yenilenebilir Enerji Dinamikleri Üzerindeki Etkileri”, **Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)**, Cilt 7, Sayı 2, 2018, Ss 341-347.
- Gupta S. ve diğerleri, “Life-cycle analysis of energy and greenhouse gas emissions of automotive fuels in India: Part 1 - Tank-to-Wheel analysis”, **Energy**, Vol. 96, (1 Feb 2016), S 684.
- Hao Han ve diğerleri, “Abating transport GHG emissions by hydrogen fuel cell vehicles: Chances for the developing World”, **Frontiers in Energy**, Vol 12, No 3, 2018, S 466.
- Haraldsson K, Folkesson A. and Alvfor P, “Fuel cell buses in the Stockholm CUTE Project-First experiences from a climate perspective”, **Journal of Power Sources**, Vol 145, No 2, 2005, S 620.
- Hepaktan C. Erdem, “Türkiye’de Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme ve Cari İşlemler Açığı İlişkisinin Yapısal Kırımlar Altında Ekonometrik Analizi”, **Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 16, Sayı 4, (Aralık 2018), Ss 156-157.
- Hua Thanh ve diğerleri, “Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide”, **Journal of Power Sources**, Vol 269, (10 December 2014), Ss 975-976.
- Inançlı Selim ve Ali Konak, “Türkiye’de İhracatın İthalata Bağımlılığı: Otomotiv Sektörü”, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi**, Cilt 6, Sayı 2, (Ekim 2011), Ss 343-362.
- International Energy Agency (IEA), Global Trends and Outlook for Hydrogen, December 2017, S 7.
- Kahraman Nafiz, Orhan Akansu Selahattin ve Bilge Albayrak, “İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanılması”, **Mühendis ve Makina Dergisi**, Cilt 48, Sayı 569, (Haziran 2007), S 9.
- Kaya Kadir, Mahmut Can Şenel ve Erdem Koç, “Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi”, **Technological Applied Sciences**, Vol 13, No 3, 2018, Ss 223-224.

- Külekçi, Özlem Candan, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi”, **Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi**, Ankara, Cilt 1, Sayı 2, 2009, Ss 83-91.
- Kum Hakan, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Dünya Piyasalarındaki Son Gelişmeler Ve Politikalar”, **Erciyes University Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences**, Cilt 0, Sayı 33, (2009), Ss 207-223.
- Levent Alkaya, Behçet Rasim ve İlkiliç Cumali, “Yakıt Pilleri ve Uygulama Alanları”, **Doğu Anadolu Araştırma ve Uygulama Merkezi (DAUM)**, Cilt 6, Sayı 3, (HAZİRAN 2008), Ss 68-70.
- Lipman Timothy E, Elke Matthew ve Jeffrey Lidicker, “Hydrogen fuel cell electric vehicle performance and user-response assessment: Results of an extended driver study”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 43, No 27, 2018, S 12442.
- Maack Maria H. and Jon Bjorn Skulason, “Implementing the hydrogen economy”, **Journal of Cleaner Production**, Vol 14, No 1, 2006, Ss 52-54,59.
- Mahmoud Moataz ve diğerleri, “Pavlos Kanaroglou, Electric buses: A review of alternative powertrains”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol 62, 2016, S 679.
- Midillia Adnan ve diğerleri, “A parametric investigation of hydrogen energy potential based on H₂S in Black Sea deep waters”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 32, No 1, 2007, Ss 122-123.
- Mirza Umar K. ve diğerleri, “A vision for hydrogen economy in Pakistan”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 13, No 5, (June 2009), Pp 1111-1115.
- Muğan Ertuğral Suna, “Otomotiv Sektörü Ve Gümrük Birliği Sonrası Gelişmeleri”, **Sosyal Bilimler Dergisi**, Sayı 2, (2011), Ss 75-83.
- Nanaki Evanthia A. and Christopher J. Koroneos, “Exergetic Aspects of Hydrogen Energy Systems - The Case Study of a Fuel Cell Bus”, **Sustainability**, Vol 9, No 276, 2017, S 1.
- Ogrzewalla Jürgen, Marius Walters and Axel Kuhlmann, “Brennstoffzellen als Range Extender für Elektrofahrzeuge”, **ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift**, Vol 115, No 11, (November 2013), S 857.
- Oldenbroek Vincent, Leendert A Verhoef, Ad J.M.van Wijk, “Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 12, (23 March 2017), Pp 8166-8167.

- Önal Eylem ve Rahmiye Zerrin Yarbay, “Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği”, **İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt 9, Sayı 18, 2010, Ss 77-96.
- Özdamar Gökhan ve Mesut Albeni, “Türkiye Otomotiv Sanayisidış Ticaret Rekabet Gücü Üzerine Bir İnceleme”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, Sayı 13, (2011), Ss 193-216.
- Pundt Mirko ve diğerleri, “Fahrzeugintegration eines Brennstoffzellensystems”, **ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift**, Vol 120, No 2, (February 2018), S 41.
- Reddi Krishna ve diğerleri, “Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 34, 2017, Ss 21855-21856.
- Ruijvena Bas van ve diğerleri, “The potential role of hydrogen energy in India and Western Europe”, **Energy Policy**, Vol 36, No 5, 2008, S 1654.
- Şanlı Bahar ve Halil Özekicioğlu, “Küresel Isınmayı Önlemeye Yönelik Çabalar ve Türkiye”, **Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi**, Cilt 2007, Sayı 2, (2007), S 459.
- Saxe M, Folkesson A and Alvfors P, “Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project: Clean Urban Transport for Europe”, **Energy**, Vol 33, No 5, (May 2008), S 694.
- Şefka Gürsel ve Mert Ali Özel, “PEM Yakıt Piliinin Simulink Modeli ve Analizi”, **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, Cilt 23, Sayı 2, 2018, S 352.
- Şenol Ramazan, İbrahim Üçgül ve Mustafa Acar, “Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler Ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi”, **Mühendis ve Makina**, Cilt 47, Sayı 563, 2006, S 41.
- Sharaf Omar Z ve Mehmet F Orhan, “An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 32, 2014, S 816.
- Siddiqui Osamah ve Ibrahim Dincer, “A Review on Fuel Cell-Based Locomotive Powering Options for Sustainable Transportation”, **Arabian Journal for Science and Engineering**, Vol 44, No 2, 2019, S 678.
- Sinigaglia Tiago ve diğerleri, “Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 39, (28 September 2017), S 24599.

- Tianyu Li ve diğerleri, “Design and analysis of a fuel cell supercapacitor hybrid construction vehicle”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 41, No 28, 2016, S 12308.
- Tolga Ural ve Karaca Gülşah, “Hidrojen Ekonomisi”, **Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi**, Cilt 3, Sayı 2, (2016), S 146.
- Tutar Filiz ve Mehmet Vahit Eren, “Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye”, **Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi**, Cilt 3, Sayı 6, (Kış 2011), Ss 1-26.
- Uçan Okyay ve Ekrem Kaçar, “ENERJİ Tüketimi, Ekonomik Büyüme ve Nüfus İlişkisi: Türkiye: Örneği”, **Verimlilik Dergisi**, Sayı 2, (2017), Ss 109-120.
- Üren Emre ve Esra Soylu, “Türkiye’nin Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine Bir Değerlendirme”, **Sosyal Bilimler Dergisi ICEBSS**, Özel Sayısı, (Kasım 2016), Ss 31-45.
- Ustabaş Ayfer, “Mikro Ve Makro Etkileri Yönünden Elektrikli Otomobiller (Türkiye Ekonomisi Örneği)”, **Marmara Üniversitesi İ.İ.B. Dergisi**, Cilt 36, Sayı 1, (2014), Ss 269-291.
- Ustabaş, Ayfer ve Osman Simav, “Otomotiv Endüstrisindeki Dönüşüm ve Türkiye”, **ÇOMÜ Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi**, Cilt 3, Sayı 2, (2018), Ss 211-231.
- Veras Tatianeda Silva ve diğerleri, “Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Volume 42, No 4, 26 January 2017, S 2020.
- Veras, Tatiane da Silva ve diğerleri, “Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide”, **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol 42, No 4, (Jan 2017), Pp 2018-2033.
- Wang Junye, “Barriers of scaling-up fuel cells: Cost, durability and reliability”, **Energy**, Vol 80, 2015, S 510.
- Yakıncı Zehra Deniz, Mediha Kök, “Yenilenebilir Enerji ve Toplum Sağlığı”, **İ.Ü. Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi**, Cilt 5 Sayı 1, (2017), Ss 43-55.
- Yaman Murat, Fatih Haşıl, “Türkiye’deki Hidroelektrik Santrali (Hes) Uygulamalarına Çevre Açısından Bakış”, **Uluslararası Afro-Avrasya Araştırmaları Dergisi**, Sayı 5, Ss 145-156.
- Yeşilata Bülent, Feridun Demir, “Fotovoltaik ve Yakıt Pili Birleşik Sisteminin Analizi”, **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, Cilt 26, Sayı 1, (2006), S 39.
- Yiğit Emre, “Renewable Energy Resources and Environment”, **Journal of International Management, Educational and Economics Perspectives**, Vol 4, No 2, 2016, Pp 17-25.

Yılma Adem ve diğerler, “Yakıt Pili Teknolojisi”, **Technological Applied Sciences**, Cilt 12, Sayı 4, (October 2017), s186.

Yılmaz Adem ve diğerleri, “Yakıt Pili Teknolojisi”, **Technological Applied Sciences**, Vol 12, No 4, 2017, S 187.

Yılmaz Adem ve Seyfi Şevik, “Sodyum Borhidrür (NaBH₄) Destekli Bir Hidrojen/Hava PEM Yakıt Hücresi İle Elektrik Üretiminin Deneysel Analizi”, **Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi**, Cilt 7, Sayı 2/2, 2017, S 220.

Yılmaz Mutlu, “Türkiye’nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi”, **Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi**, Cilt 4, Sayı 2, 2012, Ss 33-54.

Yılmaz Sinan ve diğerleri, “Otomotiv Sektörünün Dünyadaki ve Türkiye’deki Değişimi”, **Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi**, Cilt 7, sayı 3, (Kasım 2017), Ss 685-695.

Yudum Bıyık, Gökhan Civelekoğlu, “Ulaşım Sektöründen Kaynaklı Karbon Ayak İzi Değişiminin İncelenmesi”, **Bilge International Journal of Science and Technology Research**, Cilt 2, Sayı 2, (2018), Ss 158-162.

Zhang Fangzhu and Philip Cooke, “Hydrogen and Fuel Cell Development in China: A Review”, **European Planning Studies**, Vol 18, No 7, 2010, Ss 1159-1161.

Diğer Yayınlar

2008 FCX Clarity, <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/2008FCXClarity.html>, (15 Ocak 2019).

2017 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development, https://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2017.pdf, S 2, 6, 68.

Alo O, Otunniyi A. ve O.Pienaar I, HCvZ, Fuel Cell Targets, Achievements and Improvement Drivers, S 152.

Alternatif yakıt olarak hidrojen, gazi.edu.tr/posts/download?id=116880, erişim tarihi 12.02.2019.

Asit yağmurları ve sebepleri, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/75264/mod_resource/content/0/Asit%20ya%C4%9Fmurlar%C4%B1%20ve%20sebepleri.pdf, (Erişim tarihi 15.03.2019).

Ay İsmail Edge, Koçer Abdül Kadir ve Yılmaz Adem, “Proton Change Membrane (Pem) Fuel Cells”, **International Engineering, Science and Education Conference**, December 2016, Ss 51-59.

Başyazıcı İbrahim Utku, “Yakıt Pili Teknolojisinin Ticari Binalarda Kullanabilirliğinin Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Değerlendirilmesi”, **IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongre**, İstanbul, 6-9 Mayıs 2009, S 23.

Center for Transportation and the Environment, **A Report on Worldwide Hydrogen Bus Demonstrations**, 2002-2007, Atlanta, 2009.

Clean Hydrogen in European Cities, Final Report including Part A - Final Publishable Summary Report Part B - Final Restricted Full Report, <https://ruter.no/globalassets/dokumenter/fossilfri-2020/final-report-chic-2016.pdf>, , Ss 14-17.

Clean Hydrogen in European Cities, Final Report including Part A - Final Publishable Summary Report Part B - Final Restricted Full Report, <https://ruter.no/globalassets/dokumenter/fossilfri-2020/final-report-chic-2016.pdf>, , Ss 15 ve 30.

Clean Hydrogen in European Cities, <https://www.fch.europa.eu/project/clean-hydrogen-european-cities>, Erişim tarihi 15.01.2019.

Creti Anna ve diğerleri, A cost benefit analysis of fuelcell electric vehicles, (2015), hal-01116997, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01116997/document>, S 4.

Çuhadaroğlu Hakan ve diğerleri, “Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri Teknolojisi”, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, S 100.

Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC), <http://teknikrehber.net/dogrudan-metanol-kullanilan-yakit-pili-dmfc/>, (16 ağustos 2011).

Dr. Mahir E. Ocak, Asit Yağmuru Nasıl Oluşur?, (14 Temmuz 2016), <http://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/asit-yagmurlari>.

Eberle Ulrich ve Helmolt Rittmar von, (2010), “Fuel Cell Electric Vehicles, Battery Electric Vehicles, and their Impact on Energy Storage Technologies: An Overview”, Electric and Hybrid Vehicles, S 232.

Emerging Occupations and Skills in the Hydrogen/ Fuel Cell Economy and Associated Education and Training Requirements, Cavendish Energy LLC http://www.cavendish-e.com/uploads/7/5/7/3/75738781/hydrogen_and_fuel_cell_economy_jobs_1.pdf, September 2016.

Enerji Panorama, Türkiye Enerji Vakfı, Cilt 6, Sayı 64, (KASIM 2018), <http://www.tenva.org/wp-content/uploads/2013/08/EnerjiPanorama-KAPAK-KASIM-2018-SMALL-1.pdf>, Erişim tarihi 15.02.2019, S 55.

Enerji ve çevre elele, **2. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı**, İstanbul, 13-14 Ocak 2011, S 100.

Erol Cansın, “Toyota Mirai Özellikleri”, 2015, <https://www.muhandisbeyinler.net/toyota-mirai-ozellikleri/>, (9 Tem 2015).

Final Report Fuel Cell Economic Development Plan Hydrogen Roadmap Submitted To: Department of Economic & Community Development, January 1 2008, S 22.

Global EV Outlook 2018 Towards cross-modal electrification, <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/globalevoutlook2018.pdf>, sayfa 20

H2 Internal Combustion Engine (ICE) Technology, <https://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenInternalCombustionEngines.html>, (15 Ocak 2019).

Hydrogen Fuel Cell Electric Bus, <https://www.octa.net/About-OCTA/Environmental-Sustainability/Hydrogen-Fuel-Cell-Electric-Bus/>, (15 Ocak 2019).

Hydrogen Transport, <https://sites.google.com/site/ee535test/farrag-el-fellah?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>, (15 Ocak 2019), S 3.

Hydrogen Transports Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future, http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf, (October 2013), S 1.

Hydrogen Transports Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future, http://www.eltis.org/sites/default/files/case-studies/documents/hfc_brochure_10_12_09_4.pdf, S 7.

Hydrogen Transports Bus Technology & Fuel for Today and for a Sustainable Future, http://www.eltis.org/sites/default/files/case-studies/documents/hfc_brochure_10_12_09_4.pdf, S 17.

India's First Fuel Cell-Powered Bus Launched, 2018, <http://www.cleanfuture.co.in/2018/03/30/indias-first-fuel-cell-powered-bus-launched/>, (30 March 2018).

International Energy Agency (IEA), Global Trends and Outlook for Hydrogen, December 2017, Ss 5-6.

International Energy Agency (IEA), Global Trends and Outlook for Hydrogen, December 2017, Ss 9-10.

Isenstadt Aaron and Lutsey Nic, "Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update", International Council on Clean Transportation, October 2017, Ss 9-12.

Isenstadt Aaron and Lutsey Nic, "Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update", International Council on Clean Transportation, October 2017, S 2.

Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (JIVE), <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive>, Erişim tarihi 15.02.2019.

Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe 2, <https://www.uitp.org/jive-2>, Erisim tarihi 15.01.2019.

Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe, <https://www.uitp.org/jive>, Erisim tarihi 15.02.2019.

Karadağ Çiğdem ve diğerkleri, "Boren-Tübitak Mam Bor Ve Hidrojen Teknolojileri Yetkinlik Merkezi", **Ulusal Hidrojen Teknolojileri Kongresi**, İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi, 20-23 Aralık 2015.

Kıvrak Mehmet Fatih, "Hydrogen Fuel Cell Powered Electric Vehicles and an Application of Improvement for the Desorption Efficiency of a Metal Hydride Storage", **Master Thesis**, İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, February 2011, S 27.

KPMG Company, "Otomotiv", **Sektörel Bakış**, 2018, S 15.

Kumbur H ve diğerkleri, "Türkiye'nin Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyeli ve Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması", Mersin Üniversitesi, (2005).

Kurtuluş Gülbahar, Tabakoğlu F. Öznur ve Türe İ. Engin, "Türkiye'de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve Unido-Ichet", **Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi**, İstanbul.

Mat Zuraida Binti Awang ve diğeri, “Proton Exchange Membrane (PEM) and Solid Oxide (SOFC) Fuel Cell Based Vehicles-a Review”, **2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering**, 2017, S 124.

Mercedes-Benz GLC F-CELL: Market launch of the world's first electric vehicle featuring fuel cell and plug-in hybrid technology, <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-GLC-F-CELL-Market-launch-of-the-worlds-first-electric-vehicle-featuring-fuel-cell-and-plug-in-hybrid-technology.xhtml?oid=41813012>, (Erişim tarihi 15.02.2019).

Moreno-Benito Marta, Agnolucci Paolo ve Papageorgiou Lazaros G, “Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development”, *Computers and Chemical Engineering*. Vol 102, (12 July 2017), S 110.

Mükerrem Şahin, Enerji Problemine Çözüm: Hidrojen Enerjisi, MTA, hydrogen.cankaya.edu.tr/sunum/sunum4.ppt -

Mytelka Lynn K. and Boyle Grant (Ed.), **Making choices about hydrogen: Transport issues for developing countries**, International Development Research Centre, 2008, S 8.

Mytelka, Lynn , *New Wave Technologies: Their Emergence, Diffusion and Impact. The Case of Hydrogen Fuel Cell Technology and the Developing World*, February 2003, https://www.researchgate.net/publication/4777817_New_Wave_Technologies_Their_Emergence_Diffusion_and_Impact_The_Case_of_Hydrogen_Fuel_Cell_Technology_and_the_Developing_World, sayfa 8.

Okur Osman, “Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili Anot ve Katot Elektrokatalizörünün Sentezi ve Karakterizasyonu”, Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi, 2012.

Owen Anthony D, “Externalities and Subsidies: the Economics of Hydrogen-based Transportation Technologies”, School of Economics, The University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, S 5.

Öztürk Nihat, Bilgiç Mehmet ve Arslan Cemali, “Hidrojen Enerjisi Ve Türkiye’deki Hidrojen Potansiyeli”, http://www.emo.org.tr/ekler/51c5ffd6b62cc21_ek.pdf, Erişim tarihi 15.02.2019, Ss 2-3.

Panasonic aims to commercialise fuel cell generator in 2021, **Fuel Cells Bulletin**, Volume 2018, No 11, (November 2018), Pp 6-7.

Pişkin, Sercan, “Türkiye Otomotiv Sanayii Rekabet Gücü ve Talep Dinamikleri Perspektifinde 2020 İç Pazar Beklentileri”, **Otomotiv Sektör Raporu**, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, Ekonomik Araştırmalar, Ocak 2017.

Polat Cihat ve Kiliç Nurcan, Enerji Pazarında Yeni Alternatifler ve Yeni Fırsatlar: Hidrojen Pazarı ve Yakıt Hücreleri, <https://slidex.tips/download/dosya-dosya-enerj-pazarinda-yen-alternatifler-ve-yen-firsatlar-hidrojen-pazari-ve>, S 56, Erişim tarihi 15.01.2019.

Powering the future, https://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle, (15 Ocak 2019).

Ravichandran Dhiyanesh, “Tata Starbus Fuel Cell (Next-Gen): India’s First Hydrogen Bus”, 2017, <http://wagenclub.com/2017/01/tata-starbus-fuel-cell-hydrogen-bus-specifications-review.html>, (27 January 2017).

Şenaktaş Buğra, “Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları”, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2005, S 36.

Singh Abhilasha, India’s first-ever hydrogen fuel cell powered bus by Tata Motors is here! Made in India bus emits only water, 2018, <https://www.financialexpress.com/auto/car-news/tata-motors-indianoil-corporation-flag-off-countrys-first-hydrogen-fuel-cell-powered-bus/1096895/>, (15 March 2018).

Singh Abhilasha, India’s first-ever hydrogen fuel cell powered bus by Tata Motors is here! Made in India bus emits only water, (15 March 2018), <https://www.financialexpress.com/auto/car-news/tata-motors-indianoil-corporation-flag-off-countrys-first-hydrogen-fuel-cell-powered-bus/1096895/>.

Standen Eleanor, Fuel Cell Buses, April 2018, http://hydrogenvalley.dk/wp-content/uploads/2018/04/11_FCB-OSLO18_ELEMENT-ENERGY.pdf, Erişim tarihi 15.02.2019.

The Contribution of CUTE to Clean Transport Energy: Vision, Technology and Teamwork, Stockholm, 2005, S 4.

The future has arrived: World premiere of the Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus, <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-future-has-arrived-World-premiere-of-the-Mercedes-Benz-Citaro-FuelCELL-Hybrid-bus.xhtml?oid=9271703>, (15 Ocak 2019).

The Wealth Times, “Tata Motors Launches India’s First Fuel Cell Bus”, 2017, <http://thewealthtimes.com/2017/01/29/tata-motors-launches-indias-first-fuel-cell-bus/>, (29 January 2017).

The World’s Largest Hydrogen Powered Bus Project, http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20121019_155349_39149_HyFLEET_Project_Information.pdf

Toyota Mirai Avrupa yollarında, 2015, <https://www.dunya.com/sektorler/otomotiv/toyota-mirai-avrupa-yollarinda-haberi-295081>, (15 Ekim 2015).

Transit Bus, <http://www.ballard.com/markets/transit-bus>, (erişim tarihi 15 ocak 2019).

Türk Bilim İnsanı, Elektrikli Araçların 5 Dakikalık Şarj ile 480 KM Yol Katedebileceği Yakıt Pili Geliştirdi, <http://eratun.org/?p=1012>, Erişim tarihi 15.02.2019.

Türk Otomotiv Sanayi ve TAYSAD'ın tarihçesi, 2017, <https://www.taysad.org.tr/tr/sayfa/Turk-Otomotiv-Sanayi-ve-TAYSADin-tarihcesi>, (Erişim Tarihi 25.08.2017).

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Mayıs 2018, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24598>. (Erişim Tarihi 04.05.2018).

Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (boren), **Enerji**, Ankara, Ss 8-9.

Weltpremiere: Alstoms Wasserstoff-Züge starten im öffentlichen Linienverkehr in Niedersachsen, 16 Sep 2018, <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2018/9/weltpremiere-alstoms-wasserstoff-zuege-starten-im-oeffentlichen>.

World Bank Data, 2017, http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?contextual=default&end=2016&locations=US-CN-DE-JP-GB-FR-IN-IT-BR-CAKR-RU-ES-AU-MX-ID-TR&start=2016&view=bar&year_high_desc=true, (Erişim Tarihi: 06/08/2017).

Wrightbus Shows World's First Fuel-Cell Double-Decker, 14 Nov 2018, <https://www.busworld.org/articles/detail/4153/wrightbus-shows-worlds-first-fuel-cell-double-decker>, Erisim tarihi 15.01.2019.

Xu Xinhai ve diğerleri, “Near-term analysis of a roll-out strategy to introduce fuel cell vehicles and hydrogen stations in Shenzhen China”, Applied Energy, Vol 196, (15 June 2017), Ss 229-230.

Yakıt Pilleri, <https://www.elektrikport.com/universite/yakit-pilleri/10188#ad-image-0>, (29.11.2013).

Yıldırım Ahmet Murat, “Ford Otosan”, http://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/TEYDEB/etkinlikler/firma_sunumlari/9_FORD.pdf, S 16 (15 Ocak 2019).

Yılmaz Adem ve diğerleri, “Usability in Vehicles of PEM Fuel Cells”, **8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)**, Elazığ: Firat University, 19-22 October 2017, Ss 2647-2655.