



ULAŞIM SEKTÖRÜ İÇİN HİDROJEN İLE ÇALIŞAN YAKIT HÜCRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Dr. Hüseyin Turan ARAT
Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU
Meryem Gizem SÜRER



ISBN: 978-605-70717-4-3

Mayıs 2023 - İstanbul



ULAŞIM SEKTÖRÜ İÇİN HİDROJEN İLE ÇALIŞAN YAKIT HÜCRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Dr. Hüseyin Turan ARAT
Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU
Meryem Gizem SÜRER

ISBN: 978-605-70717-4-3

Mayıs 2023 - İstanbul



06 Şubat 2023 tarihinde
Kahramanmaraş merkezli
gerçekleşen ve 12 ilimizi etkileyen
deprem felaketinde; hayatlarını
kaybeden vatandaşlarımızın aziz
ruhlarına ithaf edilmiştir...

ÖNSÖZ

Koronavirüs hastalığı 2019 pandemisi ile karbon çağından hidrojen çağına geçişte; karbon salınımının minimize edilmesi ve iklim değişikliği faktörünün en aza indirilmesinde iki ana sektöre büyük görev düşmektedir. Bunlardan biri enerji sektörü bir diğeri de ulaşım sektörüdür. Ağustos 2022 verilerine göre Dünya karbon monoksit salınımının %24'ü, ulaşım sektörü tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu oranlarda kendi içinde %78'i kara araçları; %12'si hava araçları, %8 si deniz araçları ve %2'si de raylı araçlar tarafından meydana gelmektedir.

Gelişen teknoloji ve ihtiyaçlar ulaşım sektörünü de çehre değiştirmeye; daha kullanıcı odaklı, daha çevreci, daha verimli araçlar üretmeye yönlendirmiştir. Son 15 yıldır sektörün parlayan yıldızı olan elektrikli araçlar gerek düşük emisyonları gerekse daha sessiz bir sürüş ve daha az bakım maliyeti gibi sebeplerle tercih edilebilirliğini arttırmışlardır.

Paris İklim Antlaşması ve bağlamında COP21'in ardından dünya üzerindeki çoğu otomobil ve araç üreticisi, petrol yerine alternatif yakıtlar ve/veya enerji kaynaklarının kullanılması konusu üzerinde daha fazla mesai/kaynak ayırmaktadırlar. Özellikle otomotiv üreticisi ülkeler 2030-2040 planlamalarında tamamen elektrikli ve yakıt hücreli araçların üretimini planlandığını belirtmişlerdir.

Elektrikli araçların avantajları yanında; üç adet temel bariyer bulunmaktadır, ilki düşük menzil, ikincisi fiyat optimizasyonu ve elektrik şebeke altyapı stratejilerinin iyi belirlenmesi gerekliliği ve sonuncusu ise direkt olmasa da dolaylı yoldan emisyon üretimine sebep olmalarıdır (Şebeke elektriğinin büyük bir bölümü halen fosil yakıt kullanan güç santrallerinden elde edilmektedir).

Tüm ulaşım sektörlerinde hidrojenin kullanımı ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Hidrojen yüksek yanma özelliği ve içeriğinde karbon bulundurmadığından hem daha verimli hem daha çevreci bir yakıt elemanıdır. Bu yüzden içten yanmalı motor proseslerinde de yakıt hücreli elektrikli araçlarda da kullanılabilir.

Hazırlanan bu raporda; dünya genelindeki ulaşım sektöründe yakıt hücreli elektrikli araçların nasıl konumlandığı, örnekleri, önemleri, ülkeleri ve sektörü nasıl etkiledikleri; çevresel, teknik ve ekonomik olarak analiz edilmiştir. Ayrıca bu analiz kara, hava ve deniz araçları için yapılmıştır. Rapor sonunda gelecekteki çalışmaların hangi konular üzerinde yoğunlaşabileceği de öngörü olarak verilmiştir.

Türkiye'nin otomobili "Togg" dahil olmak üzere; en kısa zamanda ülkemizin de yakıt hücreli elektrikli araç kullanacak tüm sektörlerde yerini alması temennimizdir. Raporun ülkemize, ulaşım sektörüne ve ilgililere yararlı olmasını ümit ederiz.

Dr. Hüseyin Turan ARAT

Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU

Meryem Gizem Sürer

ÖNSÖZ	1
ULAŞIM SEKTÖRÜ İÇİN HİDROJEN İLE ÇALIŞAN YAKIT HÜCRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	5
1.GİRİŞ	5
2.YAKIT HÜCRELERİ	13
2.1 Yakıt Hücrelerinin Kısa Tarihçesi ve Günümüzdeki Durumu	13
2.2. Yakıt Hücrelerinin Teknik Özellikleri, Sınıflandırılması ve Kullanım alanları	14
2.3.Yakıt Hücresi Pazarı ve Önde Gelen Şirketler	20
3.KARA TAŞITLARINDA YAKIT HÜCRESİ KULLANIMI	26
3.1. Yakıt Hücreli Araçların Temel Yapısı, Avantajları ve Dezavantajları ve Diğer Araç Türleri İle Kıyaslanması	28
3.2.Yakıt Hücresi Kullanılan Kara Araçlarının Gelişimi	30
3.3.Hidrojen Dolum Tesisleri.....	33
4.HAVA TAŞITLARINDA YAKIT HÜCRESİ KULLANIMI	35
4.1.Yakıt Hücreli Hava Araçlarının Temel Yapısı, Avantajları ve Dezavantajları	35
4.2.Yakıt Hücresi Kullanılan Hava Araçlarının Gelişimi.....	36
5.DENİZ TAŞITLARINDA YAKIT HÜCRESİ KULLANIMI	41
5.1.Yakıt Hücreli Deniz Araçlarının Temel Yapısı, Avantajları ve Dezavantajları	42
5.2.Yakıt Hücresi Kullanılan Deniz Araçlarının Gelişimi	44
6. SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ	46
KAYNAKÇA	47

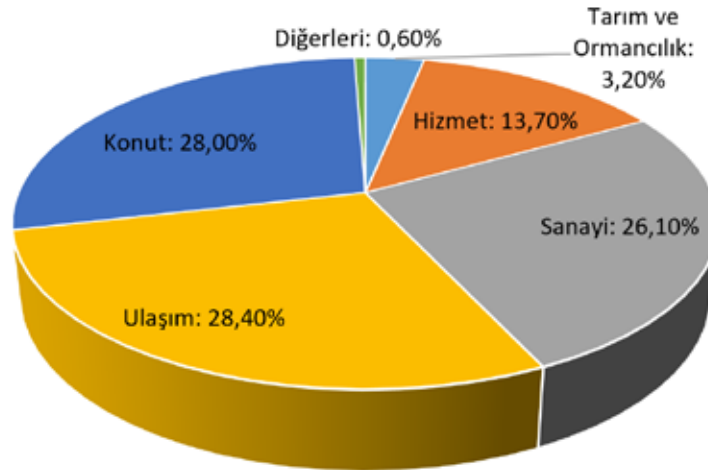
BÖLÜM 1

ULAŞIM SEKTÖRÜ İÇİN HİDROJEN İLE ÇALIŞAN YAKIT HÜCRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

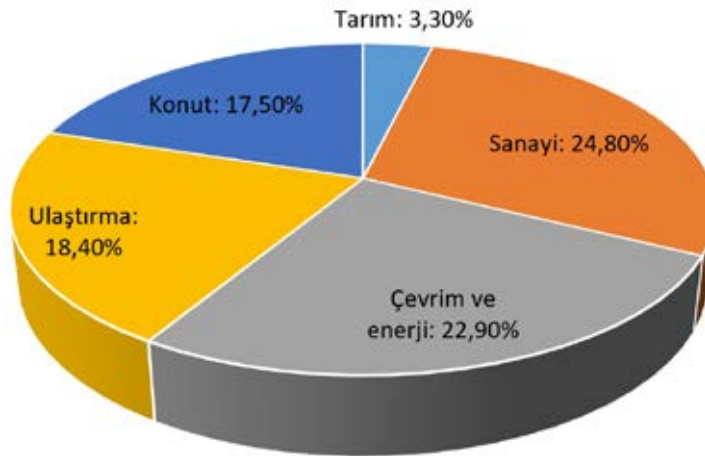
GİRİŞ

Bu bölümde ulaşım sektörü türleri ve taşımacılıktaki payları, taşımacılığın CO₂ salınımına etkileri, yeşil mutabakatlar, taşımacılık sektöründeki istihdam payı, taşımacılıkta kullanılan mevcut yakıtlar ve hidrojenin yakıt olarak kullanıldığındaki özellikleri vb konulara değinerek giriş yapılmıştır.

Enerjinin insan hayatındaki yeri ve önceliği özellikle son yıllarda artan teknolojik gelişmelerle her geçen gün artmaktadır. Hatta bu durum enerjiyi ülkeler arasında stratejik bir silah haline getirmektedir. Ülkelerin ekonomik gücü ve refahı ile doğrudan ilişkili olan taşımacılık sektörünün gelişmesi ise tamamen enerji kullanım gücüne bağlıdır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2 sırasıyla Avrupa ve Türkiye’de 2020 yılında sektörlere göre enerji tüketim yüzdelerini göstermektedir [1-2].



Şekil 1.1. 2020 yılında, Avrupa’da sektörlere göre enerji tüketimi (Veriler [1]’den alınmıştır)

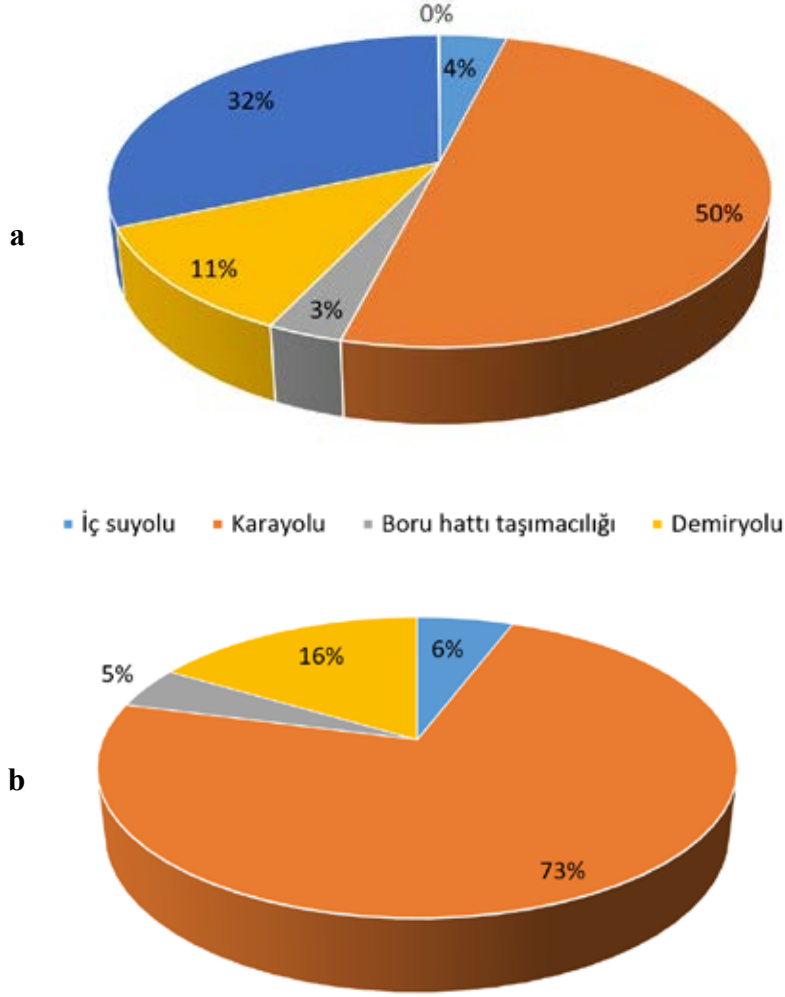


Şekil 1.2. 2020 yılında, Türkiye’de sektörlere göre enerji tüketimi (Veriler [2]’den alınmıştır)

Avrupa Birliği’nde yapılan (2020 yılında) nihai enerji kullanımına ilişkin analizde (Şekil 1.1), enerji tüketimindeki üç baskın sektör sırasıyla ulaşım (%28.4), konutlar (%28.0) ve sanayi (%26.1)’dir

[1]. Türkiye’de ise baskın 3 sektör sırasıyla sanayi (%24.8), çevrim ve enerji (%22.9) ve ulaşım (%18.4)’dır [2]. Ulaşım sektörü, enerji tüketiminde hem Avrupa’da hem de Türkiye’de ilk 3 sektör arasındadır. Özellikle ticaret ilişkilerini yürütmede kritik rol oynamaktadır.

2017 yılında AB-28’de mal taşımacılığı ve iç taşımacılığın taşımacılık türleri bazında dağılımı Şekil 1.3’te verilmiştir [3]. Mal taşımacılığı baz alındığında en çok kullanılan 3 taşımacılık türü kara-yolu taşımacılığı, denizyolu taşımacılığı ve demiryolu taşımacılığıdır. İç taşımacılık baz alındığında ise kara taşımacılığı, demiryolu taşımacılığı ve su taşımacılığıdır.

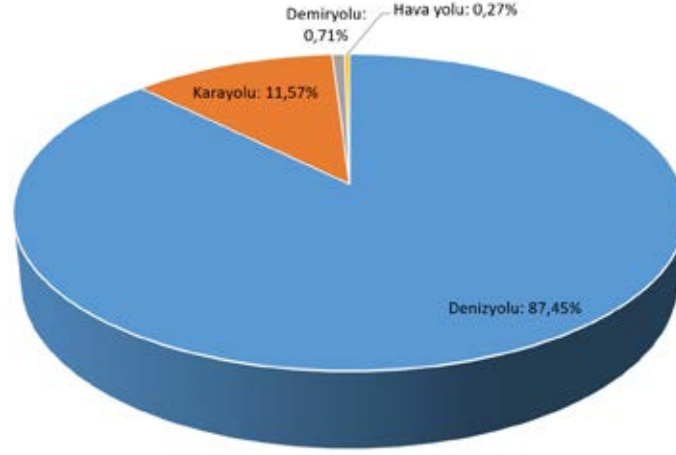


Şekil 1.3.a) AB28’de mal taşımacılığı modeli dağılımı, b) AB-28’de iç taşımacılık modeli dağılımı, 2017 (Veriler [3]’den alınmıştır)

(*) Hava ve Deniz: tahminler; sadece yurtiçi ve AB-27 içi taşımacılık.

(**) Karayolu: AB-28’de kayıtlı araçlarla ulusal ve uluslararası nakliye.

Türkiye’deki ağırlık bazında dış ticaretinin taşıma türlerine göre dağılımı – 2021 Yılı Sonu- Şekil 1.4’te verilmiştir [4].

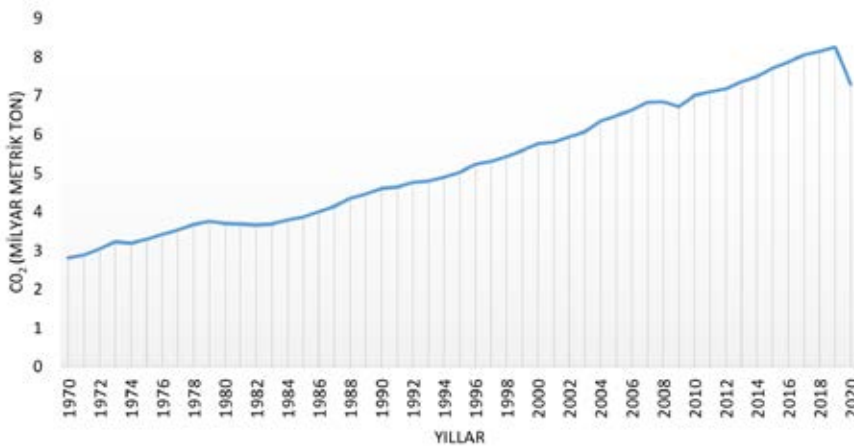


Şekil 1.4. Türkiye’de Ağırlık Bazında Dış Ticaretin Taşıma Türlerine Göre Dağılımı- 2021 Yılı Sonu (Veriler [4]’den alınmıştır)

Türkiye’de son 10 yılda gerçekleştirilen ithalat ve ihracatta taşınan malların değeri baz alındığında deniz yolu taşımacılığı en büyük paya sahiptir. Karayolu taşımacılığı dış ticaret taşımalarında ikinci sırayı alırken, havayolu taşımacılığı ise üçüncü sırada gelmektedir.

Ağırlık bazında inceleme yapıldığında da Şekil 1.3’te görüleceği gibi deniz yolu taşımacılığı önde gelmektedir. Karayolu taşımacılığı ikinci sırada gelirken, demiryolu taşımacılığı hem ithalat da hem de ihracat da son 10 yıllık dönem içerisinde ağırlık bazında %1’den az paya sahip olarak üçüncü sıradadır. Havayolu taşımacılığı kısıtlı kapasite sebebiyle en az paya sahip taşımacılık türüdür [4].

Ulaşım sektörünün dünya karbondioksit salınım miktarına da etkileri yadsınamayacak kadar fazladır. Küresel ulaşım baz alındığında, 2020 yılında 7,29 milyar metrik ton karbondioksit (GtCO₂) salınmıştır. 2019 yılında 8,25 GtCO₂ ile rekor seviyeye çıkılırken, Koronavirüs hastalığı 2019’un meydana getirdiği seyahat kısıtlaması nedeni ile 2020 yılında %12’lik bir düşüş yaşanmıştır. 1990 ile 2019 yılları arasında ise neredeyse %80’lik bir emisyon gazı artışı yaşanmıştır. 1970 – 2020 yılları arasında dünya çapında yıllık ulaşım sektörü karbondioksit emisyonları Şekil 1.6’te gösterilmiştir [5].

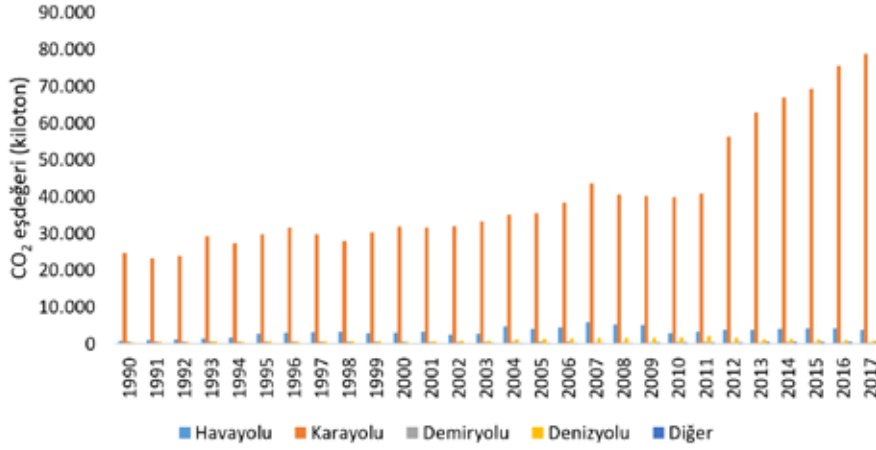


Şekil 1.6. 1970’den 2020’ye kadar dünya çapında yıllık ulaşım sektörü karbondioksit emisyonları (Veriler [5]’den alınmıştır)

TÜİK’ in sera gazı emisyon envanteri verilerine göre, Türkiye’nin toplam sera gazı emisyonu (CO₂ eşdeğeri olarak) 2017 yılında 84.659 milyon tonu ulaştırma kaynaklı olmak üzere 526,3 milyon tondur. 1990 yılında ulaştırma kaynaklı emisyonların payı %12,8 iken bu değer 2017 yılında %16,1’e çıkmıştır. Şekil 1.7’te TÜİK verileri baz alınarak ulaşım türüne göre emisyon salınımının yıllara göre değişimi verilmiştir [6].

TÜİK'in 2017 yılı sera gazı emisyon envanteri verilerine göre; ulaşırmadan kaynaklanan CO₂ emisyonunun yüzdesel oranları şu şekildedir: %93'ü karayolu, %4,5'i havayolu, %1,1'i deniz-yolu, %0,5'i demiryolu ve %0,9'i ise diğer ulaşırm türleri [6].

AB-28 ülkelerindeki duruma bakılacak olursa, 2018 yılında AB-28'deki toplam seragazı emisyonlarının %25'i ulaşımdan (uluslararası havacılık ve deniz emisyonları hariç) kaynaklanmıştır [6].



Şekil 1.7. TÜİK verisine göre ulaşırm türüne göre emisyon salınımının yıllara göre değişimi (Veriler [6]'dan alınmıştır)

2019 yılında Avrupa komisyonu başkanı tarafından açıklanan “Avrupa Yeşil Mutabakatı” (European Green Deal) 2050 yılına yönelik yeni stratejik vizyonunu ortaya koymuştur. AB'nin Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında açıkladığı hedefler arasında sürdürülebilir, yeşil lojistik süreçlerin artması, sıfır emisyonlu araçların piyasaya sunulması, elektrikli araç altyapısının geliştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması yer almaktadır. Ülkemizde ise bu mutabakata uymak için 2021 yılında Resmi Gazete' de (2021/15 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ile) “Yeşil Mutabakat Eylem Planı” yayınlanmıştır [3]:

Bu eylem planında ise 9 ana başlığa ve bu ana başlıklar altında toplamda 32 hedef ve 81 eyleme yer verilmiştir. Ana başlıklar aşağıdaki gibidir [3]:

- Sınırdaki karbon düzenlemeleri,
- Yeşil ve döngüsel bir ekonomi,
- Yeşil finansman,
- Temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı,
- Sürdürülebilir tarım,
- Sürdürülebilir akıllı ulaşırm,
- İklim değişikliği ile mücadele,
- Diplomasi,
- Avrupa Yeşil Mutabakatı bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri,

Sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik birçok regülasyonlar getirilmektedir. Bunlardan biri de Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın uygulanmasına yönelik temmuz ayında (2021) Avrupa Komisyonu tarafından açıklanan “Fit for 55”dir.

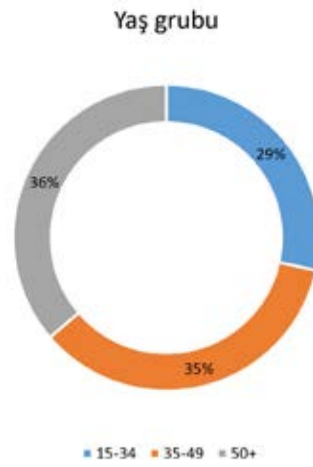
Bu pakette öne çıkan konular aşağıdaki gibidir [3]:

- Sınırdaki karbon düzenlemesi,
- Yenilenebilir enerji kullanımının artırılması,
- Enerji verimliliği,

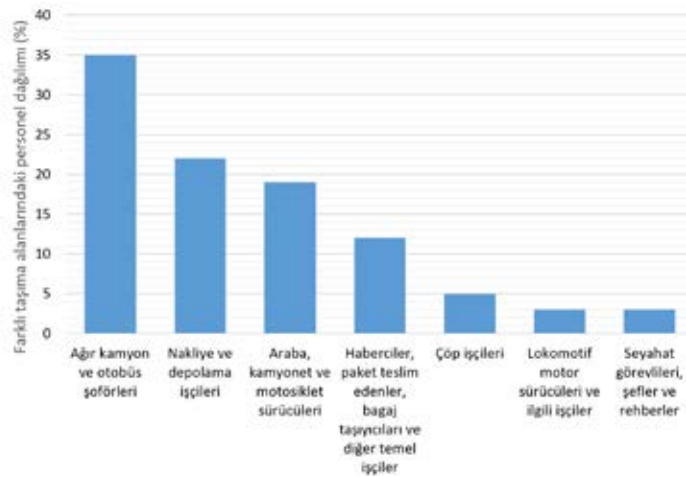
- Düşük emisyonlu ulaşım türlerinin ve bunları destekleyecek altyapı ve yakıtların daha hızlı kullanıma sunulması,
- 2035 yılı itibarı ile fosil yakıt kullanımına son verilmesi,

Dünya ekonomisi için önemli bir yere sahip olan Ulaştırma sektöründeki istihdam miktarına bakıldığında 2020’de AB’de 15 yaş üstü 10,8 milyon kişi ulaştırma mesleklerinde istihdam edildiği belirlenmektedir. Bu sayı, 2019’a (11,6 milyon) kıyasla %6 azalmıştır. 2020 yılında AB’de ulaşım sektöründeki istihdam detayları Şekil 1.8.-1.9’da verilmiştir [7].

Bu verilere göre 2020 yılında AB’de %36’lık en büyük pay ile bu çalışanların yaş grubu 50+ yaş aralığındaydı. Çalışanların %35’i 35-49, %29’u ise 15-34 yaş aralığındaydı. Ayrıca sektörde çalışanların %35’i ağır kamyon ve otobüs şoförleri, %22’si nakliye ve depolama işçileri, %19’u araba, kamyonet ve motosiklet sürücülere, %12’si haberciler, paket teslimcileri, bagaj taşıyıcıları ve diğer temel işçiler, %5’i çöp işçileri,%3’ü lokomotif motor sürücülere ve ilgili işçiler,%3’ü seyahat görevlileri, rehberler ve şefler den oluşmaktadır.



Şekil 1.8. 2020 yılında AB’de ulaşım sektöründe çalışanların yaş grubuna göre dağılımı (Veriler [7]’den alınmıştır)



Şekil 1.9. 2020 yılında AB’de ulaşım sektöründe çalışan personel dağılımı (Veriler [7]’den alınmıştır)

Petrol ve diğer sıvı yakıtlar, dünya çapında ulaşım enerjisinin baskın enerji kaynakları olmalarına rağmen rezervleri tükenmeye eğilimlidir ve bu yakıtlarla beraber artan sera emisyon parametreleri çevreyi olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden araştırmacılar alternatif enerji kaynaklarının kullanımının yeni yollarını araştırmaya başlamışlardır. Araştırmaların büyük çoğunluğunu kapsayan ve enerji taşıyıcı olan hidrojen, bütün klasik yakıtların ağırlığı başına en yüksek içeriğe sahip elementtir [9].

Hidrojenin yakıt olarak kullanımı çalışmaları 19 yy’a kadar dayanmaktadır. Ancak bilimsel plat-

forma 1974 yılında gerçekleştirilen “Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı” (THEME) ile taşınmıştır. Ardından “Uluslararası Hidrojen Birliği- (IHEA)” nin kurulması ve bazı ülkelerde ulusal hidrojen örgütlerinin oluşturulması ile yapılan çalışmalar hızlanmıştır. Türkiye’de ise İstanbul’da Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi’nin (ICHET) kurulmasına ilişkin anlaşma, T.C. Hükümetiyle Birleşmiş Milletler Sanayi Kalkınma Örgütü (UNIDO) arasında, Ekim 2003 tarihinde imzalanmıştır. Özellikle uzay araçlarında yakıt olarak kullanımı ön planda olan hidrojen diğer ulaşım araçlarında da ciddi çalışmalarda yer almıştır [10].

Bugün yakıt seçimindeki kriterler değerlendirildiğinde; hidrojenin bu ailede önemli bir yerinin olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu kriterlerden bazıları aşağıdaki gibidir [9-14]:

- Sıfır emisyonla sudan üretilebilmesi,
- Yüksek enerji dönüşüm etkinliğine sahip olması,
- Evrende bol miktarda mevcut olması
- Farklı formlarda depolanabilmesi,
- Uzun mesafeli taşımaya uygun olması,
- Enerjinin diğer formlarına kolay dönüştürülebilmesi,
- Fosil yakıtlardan daha yüksek ısı değerlerine sahip olması.

Hidrojenin kullanımında dezavantajlı yönlerinden bazıları ise [9-14]:

- Günümüz teknolojisi ile üretiminin pahalı olması,
- Depolama zorluğu,
- Mevcut altyapıyı değiştirme zorluğu,
- Yüksek tutuşma riski,
- Büyük ölçekli üretiminde fosil yakıtların kullanılıyor olması; olarak sıralanabilir.

Hidrojenin diğer yakıtlarla karşılaştırması Tablo 1.1’de verilmiştir. Sıvı hidrojeni baz aldığımızda; birim kütesinin ısı değeri 141,9 MJ/kg olup, petrolden 3,2 kat daha fazladır. Sıvı hidrojenin birim hacminin ısı değeri ise 10,2 MJ/m³ tür ve petrolün % 28’i kadardır. Gaz hidrojen baz alındığında ise birim kütesinin ısı değeri sıvı hidrojenle aynı olup, doğal gazın 2,8 katı kadardır. Bir motorun yakıt olma özelliğinin ölçülerinden biri olan devindirme-tahrik etme (motivity) faktörü önemli olup, bu faktör yakıtın kütlesi ve buna karşılık olan hacmine bağlı biçimde, en yüksek ısı değerli yakıtla analitik karşılaştırması sonucu hesaplanır [10].

Tablo 1.1 Hidrojenin diğer yakıtlarla kıyaslanması (Normal Şartlar Altında) (Veriler [10]’dan alınmıştır)

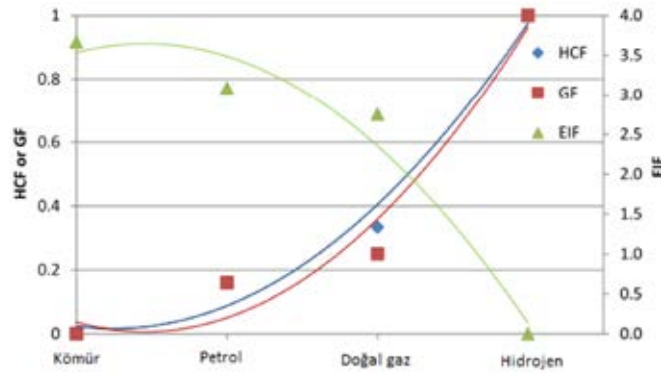
Yakıt	Birim Kütle Enerjisi (MJ/kg)	Birim Hacim Enerjisi (MJ/kg)	Motivity Faktörü (ϕ_M)
Sıvı Yakıtlar			
Sıvı hidrojen	141,9	10,10	1,00
Fuel-oil	45,5	38,65	0,78
Benzin	47,4	34,85	0,76
Jet yakıtı	46,5	35,30	0,75
LPG	48,8	24,4	0,62
LNG	50,0	23,0	0,61
Metanol	22,3	18,10	0,23
Etanol	29,90	23,60	0,37
Gaz Yakıtlar			
Gaz Hidrojen	141,9	0,013	1,00
Doğal gaz	50,0	0,040	0,75

Hidrojen kirleticilik açısından diğer yakıtlar ile kıyaslandığında ise önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Aşağıdaki denklemler aracılığı ile Çevresel Etki Faktörü (EIF), Yeşilleştirme Faktörü (GF) ve Hidrojen İçeriği Faktörü (HCF) açısından hidrojen diğer geleneksel yakıtlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya ait veriler Şekil 1.10'da grafik haline getirilmiştir [15]:

$$EIF = \frac{\text{kg CO}_2 \text{ yanma reaksiyonu ürünü}}{\text{kg fuel}} \quad (1)$$

$$GF = \frac{EIF_{max} - EIF}{EIF_{max}} \quad (2)$$

$$HCF = \frac{\text{kg H}_2 \text{ (yakıttaki)}}{\text{kg fuel}} \quad (3)$$

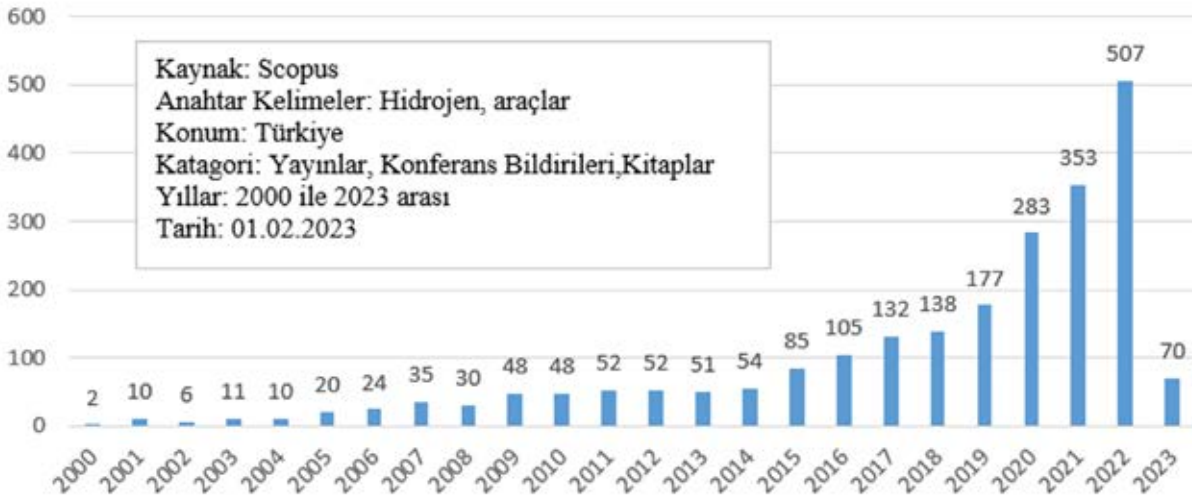


Şekil 1.10. Hidrojen ve diğer fosil yakıtların Hidrojen İçeriği Faktörü (HCF), Yeşilleştirme Faktörü (GF) ve Çevresel Etki Faktörü (EIF) açısından kıyaslanması ([15])

Şekil 1.10'dan görülebileceği gibi, artan hidrojen içeriği (HCF) ile enerji kaynakları daha yeşil hale gelir (artan GF) ve çevresel etki (EIF) azalır. Bu, karbonla ilgili emisyonların azaltılması açısından hidrojenin açık bir avantajıdır [15].

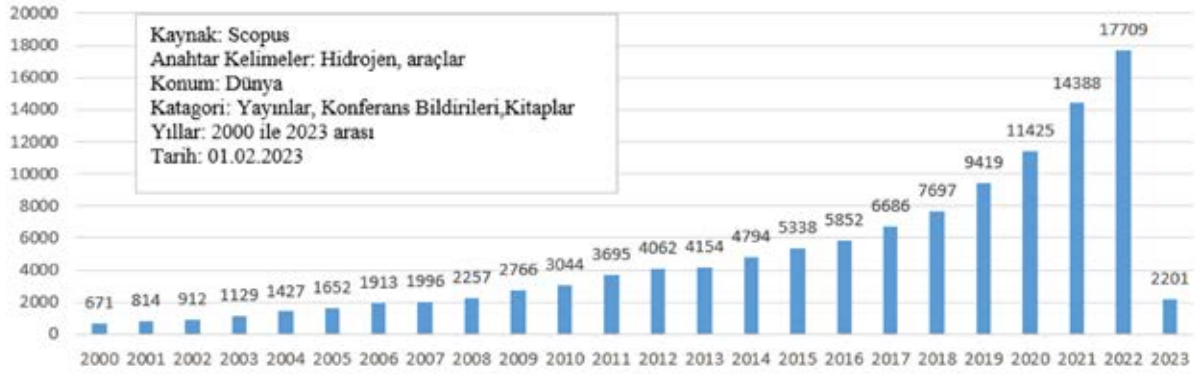
Akademik alandaki çalışmalarda gerek ülkemizde gerek Dünya'da her gün artarak ilerlemektedir. Şekil 1.11 de 2000-2023 yılları arasında Türkiye'de; Şekil 1.12 de ise 2000-2023 yılları arasında Dünya'da; hidrojenin araçlarda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar yayın skalasında değerlendirildiğinde, özellikle son yıllarda çalışmaların katlanarak arttığı görülmektedir.

"Hidrojen ve Araçlar" Yayın Sayısı



Şekil 1.11- Türkiye'de son 23 yılda hidrojen ve araçlarla ilgili yapılan yayınların sayısı [76]

"Hidrojen ve Araçlar" Yayın Sayısı



Şekil 1.11- Dünya’da son 23 yılda hidrojen ve araçlarla ilgili yapılan yayınların sayısı [76]

Bu raporun ana konusu ulaşım sektöründe hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlar olup, 2. Bölümde yakıt hücrelerinin detaylı anlatımına, 3. Bölümde örneklerle birlikte kara araçlarında yakıt hücresi kullanımına, 4. ve 5. bölümlerse ise sırasıyla hava ve deniz yolu taşımacılığında yakıt hücrelerinin kullanımına değinilmiştir. Avantajları, dezavantajları, kullanım metodolojisi gibi birçok açıdan değerlendirme yaparak literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

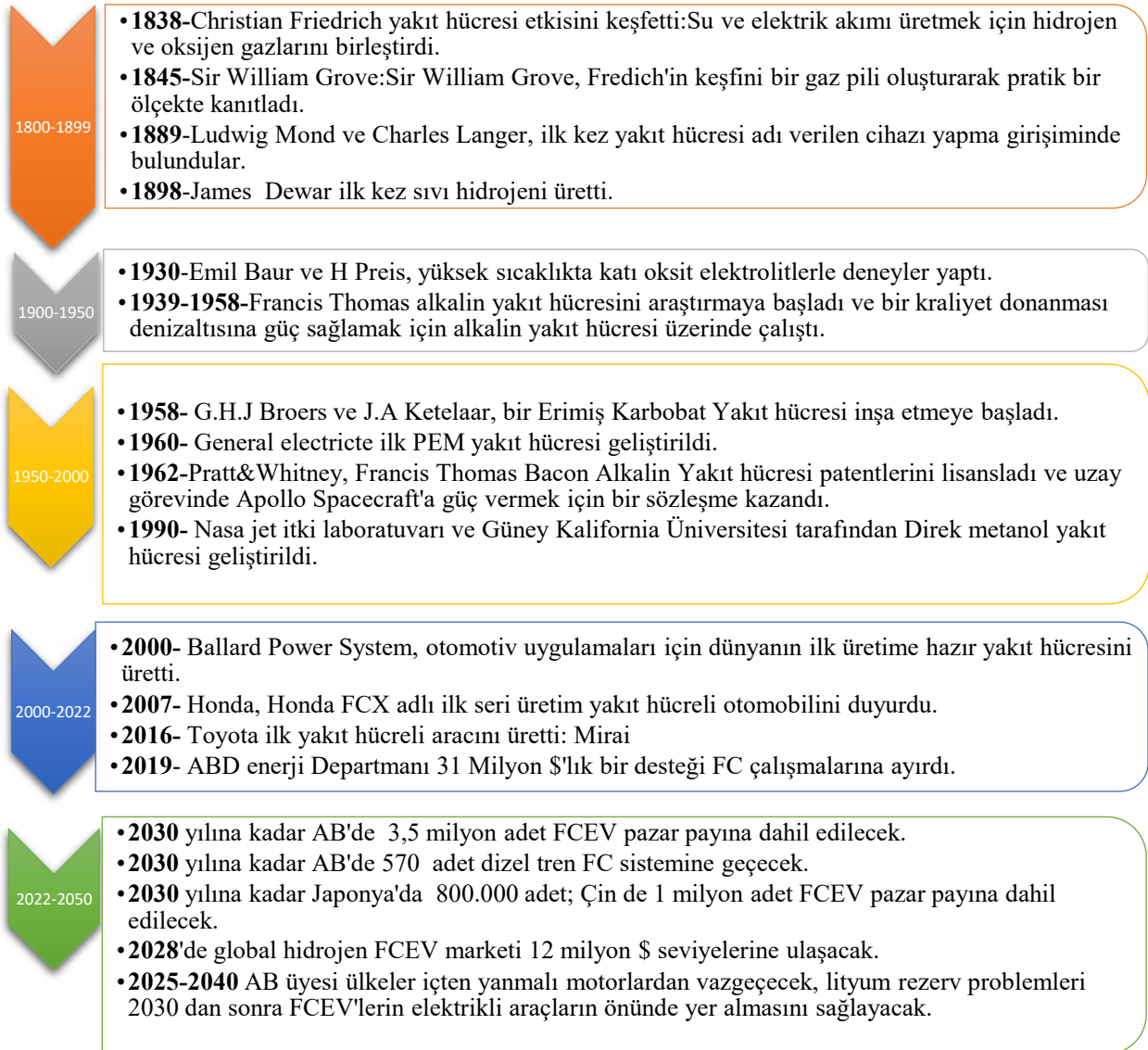
BÖLÜM 2

YAKIT HÜCRELERİ

Bu bölümde öncelikle yakıt hücrelerinin tarihçesi ve günümüz durumu kısaca özetlenmiştir. Daha sonra yakıt hücrelerinin teknik özellikleri detaylandırılmış, sınıflandırılması yapılmış ve kullanım alanlarına değinilmiştir. Son olarak ise yakıt hücresi pazarı ve önde gelen şirketler tartışılmıştır.

2.1 Yakıt Hücrelerinin Kısa Tarihçesi ve Günümüzdeki Durumu

Enerji dönüşüm sistemleri olarak yakıt hücrelerinin icadı 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. Yakıt hücrelerinin icadı Sir William Grove'a atfedilir, ancak ilk kez, Sir Grove ile yakın ilişki içinde olan Profesör Christian Friedrich Schönbein tarafından keşfedilmiştir [16-17]. Yakıt hücrelerinin gelişiminin kısa bir özeti Şekil 2.1'de gösterilmiştir [16-19].



Şekil 2.1. Yakıt hücresi gelişimi (Veriler [16-19]'dan alınmıştır)

Günümüzde çeşitli alanlarda kullanılan Katı Oksit Yakıt Hücre (KOYH) için ilk çalışmalar İsveçli bilim adamı Emil Baur ve meslektaşı H. Preis tarafından, 1930'ların sonlarında zirkonyum, itriyum, seryum, lantan ve tungsten gibi malzemeleri kullanarak yapıldı. Tasarımları umulduğu kadar elektriksel olarak iletken değildi ve bildirildiğine göre elektrolitler ile karbon monoksit dahil çeşitli gazlar arasında istenmeyen kimyasal reaksiyonlar yaşadı. 1950'lerin sonlarında, katı oksit teknolojisine yönelik araştırmalar Hollanda'nın Lahey kentindeki Central Technical Institute, Pennsylvania'daki Consolidation Coal Company ve New York Schenectady'deki General Electric'te hızlanmaya başladı. Yakıt pilleriyle ilgili 1959 tarihli bir tartışma, katı elektrolitlerle ilgili sorunların nispeten yüksek iç elektrik direnci, erime ve yarı iletkenlikten dolayı kısa devreyi içerdiğini kaydetti. O dönem birçok araştırmacı, erimiş karbonat yakıt hücrelerinin daha kısa vadeli umut vaat ettiğine inanmaya başladı [19].

Yakıt hücreleri arasında özellikle ulaşım sektöründe anahtar rolde olan Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücre (PEMYH) teknolojisi, 1960'ların başında General Electric'te Thomas Grubb ve Leonard Niedrach'ın çalışmalarıyla icat edildi. GE, 1960 yılının ortalarında, şirketin ABD Donanması Gemi Bürosu (Elektronik Bölümü) ve ABD Ordusu Sinyal Birlikleri ile bir program için küçük bir yakıt hücresi geliştirdiğinde ilk başarısını duyurdu. Ünite, su ve lityum hidritin karıştırılmasıyla üretilen hidrojen ile beslendi. Bu yakıt karışımı, sahadaki personele kolaylıkla temin edilebilecek tek kullanımlık bidonlarda bulunuyordu. Hücre kompakt ve taşınabilirdi, ancak platin katalizörleri pahalıydı [19].

1990'ların başında geliştirilen doğrudan metanol yakıt hücresi ise, NASA Jet Propulsion Laboratuvarı ve Güney Kaliforniya Üniversitesi'nde (USC) icat edilip geliştirilmiştir ve dünya çapında 56 adet yayınlanmış ve 62'den fazla bekleyen patentiyle koruma altına alınmıştır [19].

Günümüzde çok farklı yapıdaki yakıt pili uygulamaları üzerinde çalışan birçok üretici vardır. Örneğin, otomotiv sektöründe doğrudan uygulama ile yakıt hücrelerinin birçok kullanımı bulunmaktadır. En yaygın kullanımı uçaklarda, gemilerde, trenlerde, otobüslerde, arabalarda, motosikletlerde, kamyonlarda ve forkliftlerde bulunabilir. Bir yakıt hücresi tarafından çalışan otomatlar, elektrikli süpürge makineleri ve trafik işaretleri de vardır. Öte yandan, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve taşınabilir elektrikli cihazlar için yakıt pilleri için büyüyen bir pazar bulunmaktadır. Daha büyük ölçekte, tesislerinde elektrik enerjisi üretmek için yakıt hücresi sistemine sahip hastaneler, polis karakolları ve bankalar bulunmaktadır [17].

Günümüzde yakıt pilleri güç sistemlerinde şu şekilde uygulanabilmektedir [24]:

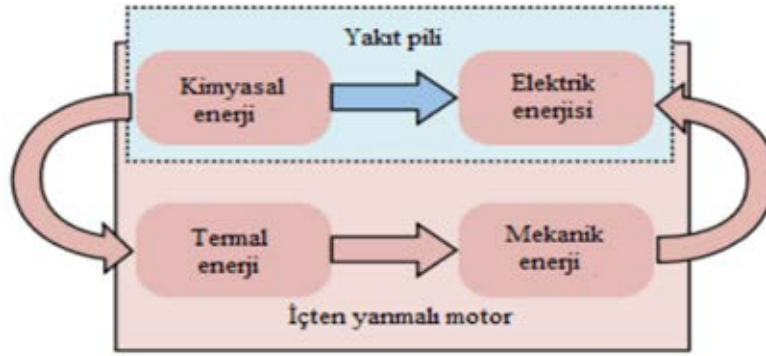
1. 1 W–10 kW aralığında: cep telefonları, kişisel bilgisayar ve kişisel elektrik ekipmanları;
2. 1-100 kW aralığında: elektrikli araçlar ve toplu taşıma;
3. 1–10 MW: enerji için güç sistemleri

2.2. Yakıt Hücrelerinin Teknik Özellikleri, Sınıflandırılması ve Kullanım alanları

Yakıt hücresi, bir yakıttaki kimyasal enerjisi tek adımda doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir cihazdır. Yakıt hücreleri ve bataryalar benzerlik göstermektedirler. Yakıt hücreleri ve bataryalar, bir elektroliti saran ve kimyasal enerjisi elektrik enerjisine dönüştürmek için süreçte iç oksidasyon-redüksiyon reaksiyonlarını kullanan iki elektrotlu elektrokimyasal hücrelerden oluşması nedeniyle oldukça benzerdir. Ancak, batarya kapalı bir enerji deposuna sahiptir. Bu yüzden harici bir elektrik kaynağı ile şarj/deşarj yapılarak elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi zorunludur. Öte yandan bir yakıt hücresi, harici bir kimyasal enerji kaynağı kullanır. Bir hidrojen kaynağı ve bir oksijen kaynağı ile süresiz olarak çalışabilmektedir [14]. Ayrıca, geliştirilmiş şarj edilebilir piller

modül seviyesinde 150 Wh/kg enerji yoğunluğuna ulaşabilirken, rejeneratif yakıt hücreleri sistem seviyesinde >800 Wh/kg ve rejeneratif olmayan yakıt hücreleri >1000Wh/kg enerji yoğunluğuna ulaşmaktadır [20].

Yakıt hücrelerinin batarya ve içten yanmalı motorlar ile şeklen kıyaslanması Şekil 2.2.a ve Şekil 2.2.b’te verilmiştir. Yakıt hücreleri ve bataryalar elektriği direk olarak kimyasal enerjiden üretir. İçten yanmalı motorlar ise ilk önce kimyasal enerjiyi ısıya dönüştürür ve daha sonra mekanik enerjiye çevirir. Yakıt hücreleri, bataryalar ve ısı motorları arasındaki benzerlik ve farklılıkların özeti Tablo 2.1’de verilmiştir.



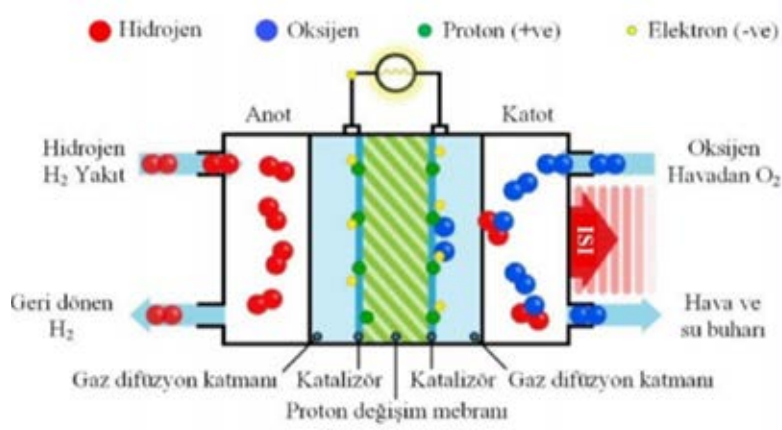
Şekil 2.2 Yakıt hücresi batarya ve içten yanmalı motorların şematik karşılaştırılması ([21]’den alınmıştır)

Tablo 2.1. Yakıt hücreleri, bataryalar ve ısı motorları arasındaki benzerlik ve farklılıkların özeti (Veriler [13]’den alınmıştır)

Karşılaştırma	Yakıt hücresi	Batarya	İçten yanmalı motor
İşlev	Enerji dönüşümü	Enerji depolama ve dönüştürme	Enerji dönüşümü
Teknoloji	Elektrokimyasal reaksiyonlar	Elektrokimyasal reaksiyonlar	Yanma
Tipik yakıt	Genellikle saf hidrojen	Depolanan kimyasallar	Benzin, dizel
Faydalı çıktı	DC elektrik	DC elektrik	Mekanik Güç
Ana avantajlar	Yüksek verim Azaltılmış zararlı emisyonlar	Yüksek verim Yüksek olgunluk	Yüksek olgunluk Düşük maliyet
Ana dezavantajlar	Yüksek fiyat Düşük dayanıklılık	Düşük operasyonel döngüler Düşük dayanıklılık	Önemli zararlı emisyonlar Düşük verimlilik

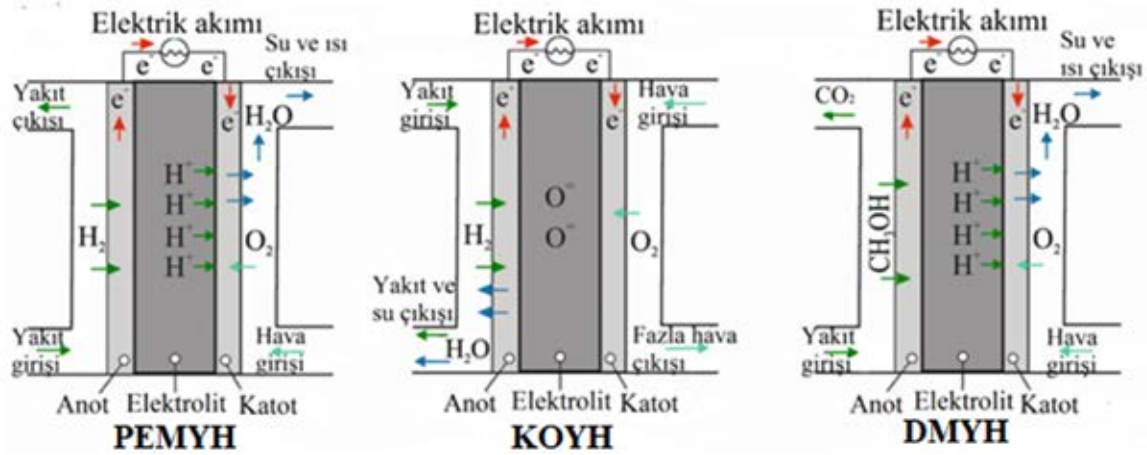
Anot ve katot isimleri verilen iki elektrot ve bunların arasına yerleştirilmiş bir elektrolitten oluşan yakıt hücreleri elektrokimyasal bir reaksiyon ile elektrik üretir. Anot, katot ve elektrolitten oluşan her bir gruba ‘Membran Elektrot Grubu’ denir. Tek bir birim hücre potansiyeli 0,5-0,8 V arasında değişirken, yakıt hücresi yaygını oluşturmak için seri olarak birkaç birim hücre eklemek gerekir [22].

Temel yakıt hücresi, Şekil 2.3’teki gibi iki akışlı veya iki kutuplu plaka ve bir merkezi elektrolitin her iki yanında iki katalizör yüklü elektrot içerir. Hidrojen ve oksijen, reaksiyon bölgesine akar ve kimyasal enerjiyi serbest bırakırken su oluşturmak üzere reaksiyona girer. Üretilen elektrik enerjisi daha sonra genellikle bipolar plakalar yoluyla çıkarılır. [23].



Şekil 2.3. Temel bir yakıt hücresi tasarımı ([23]'den alınmıştır)

Temelde 6 farklı tip (*Alkali; Katı oksit; Proton Değişim Membranlı; Doğrudan Metanol; Fosforik Asit; Erimiş Karbonat*) yakıt hücresi olmakla birlikte, PEMYH (Proton Değişim Membranlı Yakıt hücresi), KOYH (Katı Oksitli Yakıt Hücresi) ve DMYP (Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi) araçlarının hibritleşme çalışmalarında en çok kullanılan yakıt hücreleridir. Yakıt hücrelerinin çalışma prensipleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Ayrıca bu üç tip yakıt hücresinin karşılaştırmalı özellikleri Tablo 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Yakıt hücrelerinin çalışma prensipleri ([14]'den alınmıştır)

Tablo 2.2. PEMYH, KOYH ve DMYP'nin karşılaştırmalı özellikleri [13,22-25]

	PEMYH	KOYH	DMYP
Yakıt	Hidrojen	Hidrokarbon	Metanol
Çalışma sıcaklığı (°C)	30-100	500-1000	20-90
Verim (%)	40-60	30-50	20-30
Yığın güç yoğunluğu (W kg-1)	>500	>800	>70
Sistem güç yoğunluğu (W kg-1)	>150	>100	>50
Reaksiyon	Anode: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Anode: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	Anode: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ Cathode: $\frac{3}{2} O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
Elektrolitteki yük taşıyıcısı	H^+	O^{2-}	H^+
Elektrolit	Polimerik H + iyon değişim membranı	Seramik	Polimerik H + iyon değişim membranı

Polimerik Yakıt Hücreleri (PEMYH) Yakıt hücreleri, elektrolit olarak bir proton değişim membranı kullanır. Klasik varyasyonları genellikle $85\pm 105^{\circ}\text{C}$ arasında çalışmaktadır. Örneğin; Gemini programı, yardımcı bir güç kaynağı olarak 1kW'lık bir PEM yakıt hücresi yığını kullanmıştır [16,26]. Bu yakıt hücreleri nispeten düşük sıcaklıklarda çalışır, yüksek güç yoğunluğuna sahiptir, güç talebindeki değişiklikleri karşılamak için çıktılarını hızla değiştirebilir ve hızlı başlatmanın gerekli olduğu otomobiller gibi uygulamalar için uygundur [19]. Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar denklem (4-5)'de verilmiştir [22].



Avantajları [17] :

- Anot ve katot ayırıcının katı bir polimer film (düzlemsel yapı) olması ve hücrenin nispeten düşük sıcaklıklarda çalışması sayesinde, taşıma, montaj veya sızdırmazlık gibi yönler diğer birçok hücre tipine göre daha az karmaşıktır.

- Aşındırıcı olmayan bir elektrolit kullanırlar. Asit veya diğer aşındırıcı maddelerle çalışma ihtiyacını ortadan kaldırarak güvenliği artırır.

- CO_2 'ye toleranslıdırlar; böylece atmosferik havayı kullanabilirler.

- Katı ve kuru bir elektrolit kullanırlar, böylece sıvıların taşınmasını ve yeniden tedarik problemlerini ortadan kaldırır.

- Yüksek gerilim, akım ve güç yoğunluğuna sahiptirler.

- Güvenlik katan düşük basınçta (1 veya 2 bar) çalışabilirler.

- Reaktanların basınç farkına iyi tolerans gösterirler.

- Kompakt ve sağlamdırlar.

- Basit bir mekanik tasarıma sahiptirler.

- Kararlı yapı malzemeleri kullanırlar.

Dezavantajları [17]:

- Yakıt hücreleri gibi geleneksel yakıtları kullanabilmek için bir dizi reform birimi geliştirmiş olan hidrojenin safsızlıklarına karşı çok hassastırlar.

- 50 ppm'den fazla CO tolere etmezler ve kükürt partiküllerine karşı düşük toleransa sahiptirler.

- Reaktif gazların nemlendirme ünitelerine ihtiyaçları vardır. Gazların nemlendirilmesi için su kullanılıyorsa, yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı kaynayan sudan daha düşük olmalıdır, bu da kojenasyon potansiyelini sınırlandırır.

- Çok pahalı bir katalizör (platin) ve bir zar (katı polimer) kullanırlar.

Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH) ise, PEM teknolojisine dayanan düşük sıcaklıklı yakıt hücrelerinin özel bir şeklidir. Güç yoğunluğunu iyileştirmek için genellikle biraz daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmasına rağmen, PEMYH'ye benzer sıcaklıklarda çalışır. DMYH'de metanol, alkolü hidrojene dönüştürme ara adımı olmadan doğrudan yakıt hücresine beslenir. Metanol, doğal gazdan veya yenilenebilir biyokütle kaynaklarından üretilmediği için çekici bir yakıt seçeneğidir. Yüksek bir özgül enerji yoğunluğu avantajına sahiptir (çalışma koşullarında sıvı olduğu için) ve mevcut yakıt altyapısının metanole uyarlanabileceği varsayılmaktadır [16]. Yakıt hücresinin anot ve

katodunda gerçekleşen reaksiyonlar denklem (6-7)'de verilmiştir[22].



Avantajları [17]:

- Sıvı yakıt kullanırlar. Mevduatın boyutu daha azdır ve mevcut altyapı tedarikinden faydalanabilir.
- Herhangi bir reform sürecine ihtiyaçları yoktur.
- Elektrolit bir proton değişim zarıdır (PEM yakıt hücresi tipine benzer).

Dezavantajları [17]:

- Hidrojen hücrelerine göre verimleri düşüktür.
- Anotta metanolün elektro-oksidasyonu için yüksek miktarda katalizör yüklemesine (asil metal) ihtiyaç duyarlar.

Katı oksit yakıt pili (KOYH) ise basit iki fazlı gaz-katı bir sistemdir, bu nedenle su yönetimi, katalizör tabakasının taşması veya yavaş oksijen indirgeme kinetiği ile ilgili sorunları yoktur. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda çalışmak için gerekli termal ve kararlılık özelliklerine sahip uygun malzemeleri bulmak zordur [16]. Yakıt hücresinin anot ve katodunda gerçekleşen reaksiyonlar denklem (8-9)'da verilmiştir [22].



Avantajları [17]:

- Yakıt dönüşümü yakıt hücresinin içinde gerçekleşir. Oksit iyonları elektrolit içerisinde hareket ettiğinden, yakıt pili herhangi bir yanıcı gazı oksitlemek için kullanılabilir.
- Çıkış sıcaklığının yüksek olmasından ötürü farklı enerji sistemleri ile bütünleştirilebilir.
- Kimyasal reaksiyonlar çok hızlıdır.
- Yüksek verimliliğe sahiptirler.
- Erimiş karbonat yakıt hücrelerinden daha yüksek akım yoğunluklarında çalışılabilir.
- Elektrolit katıdır. Sıvı işleme problemlerini önler.
- Asil metal katalizörlere gerek yoktur.

Dezavantajları [17] :

- Pazara tam olarak girebilmek için yeterli iletkenliğe sahip, çalışma sıcaklıklarında katı kalan, hücrenin diğer bileşenleri ile kimyasal olarak uyumlu, boyutsal olarak kararlı ve yüksek dirençli malzemeler geliştirmeleri gerekmektedir.
- Kükürte orta derecede tahammülsüzlükleri vardır (50 ppm).

Yakıt hücrelerinin ortak avantajlarını ise şu şekilde sıralayabiliriz [13-14]:

-Azaltılmış zararlı emisyonlar: Hidrojenle beslenen bir yakıt hücresi yığınınından elde edilen tek ürün su, ısı ve DC elektriktir. Bununla birlikte, bir yakıt hücresinin temiz doğası, yakıtının (örneğin

hidrojen) üretim yoluna bağlıdır.

-**Yüksek verim:** Yakıt hücreleri yanma tabanlı enerji dönüştürme cihazlarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek toplam verimliliğe sahiptir. Bir sistemin genel verimliliği, enerji dönüşümlerinin sayısı arttıkça genellikle azalır.

-**Modülerlik:** Yakıt hücreleri mükemmel modülerliğe sahiptir. Prensip, yığın başına hücre ve/veya sistem başına yığın sayısını değiştirmek herhangi bir yakıt hücresi sisteminin güç çıkışını kontrol etmemizi sağlar. Yanma tabanlı cihazlardan farklı olarak, bir yakıt hücresi verimliliği, sistem boyutuna veya yük faktörüne göre çok fazla değişmez.

-**İyi yük izleme:** Yakıt pili sistemleri genellikle çok iyi dinamik yük izleme özelliklerine sahiptir. Bu kısmen bir yakıt pili içinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların hızlı doğasından kaynaklanmaktadır. Yine, yakıt hücresi sistemi bir yakıt reformasyon aşaması içerdiğinde, sistemin yük takip yeteneği, reformasyon sürecinin daha yavaş doğasının bir sonucu olarak gözle görülür şekilde azalır.

-**Statik doğası:** Yakıt hücresi yığını, elektrokimyasal yapısından dolayı statik sessiz bir cihazdır. Bu, sessiz çalışma gerektiren taşınabilir uygulamalara ek olarak, yardımcı güç ve dağıtık üretim uygulamaları için yakıt hücrelerinin kullanımını teşvik eden çok önemli bir özelliktir. Bir yakıt hücresi sisteminin çok az dinamik parçaya sahip olması (ve dolayısıyla neredeyse hiç titreşim olmaması) gerçeği, yakıt hücrelerinin tasarımını, imalatını, montajını, işletimini ve analizini ısı motorlarından daha basit hale getirir. Bununla birlikte, oksidan beslemesi için üfleyiciler yerine kompresörler kullanan yakıt hücresi sistemlerinde gürültü seviyeleri gözle görülür şekilde artabilir. Bu nedenle, yakıt hücresi tasarımcıları, yüksek parazit yükü, gürültü üretimi, maliyeti, ağırlığı, hacmi ve fanlara ve üfleyicilere göre karmaşıklığı nedeniyle kompresör kullanmaktan kaçınma eğilimindedir.

-**Uygulama yelpazesi ve yakıt esnekliği:** 1 W'dan daha az güç sağlayabilen mikro yakıt hücrelerinden MW düzeyinde güç veren ve ana enerji üretim tesislerini besleyen yakıt hücrelerine çok çeşitli yelpazeye sahiptir. Reformasyona dayalı bir yakıt hücresi sistemi için yakıtlar arasında metanol, metan ve doğal gaz ve propan gibi hidrokarbonlar bulunur. Bu yakıtlar, bir yakıt reform süreci ile hidrojene dönüştürülür. Alternatif olarak, doğrudan alkol yakıt hücreleri (örneğin, doğrudan metanol yakıt hücreleri) doğrudan bir alkol üzerinde çalışabilir. Yakıt pilleri en iyi şekilde su elektrolizinden üretilen hidrojenle çalışsa da, doğal gaz reformasyonuna sahip bir yakıt pili sistemi de geleneksel teknolojilere uygun özelliklere sahiptir.

Yakıt hücreleri, enerji dönüşümü için temiz ve etkili bir mekanizma olmasına rağmen, az da olsa dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi; yakıt hücreleri hâlâ pahalı bir teknolojidir. Uzmanlar, yakıt hücrelerinin enerji piyasasında güçlenebilmesi ve sürdürülebilir olması için yakıt hücreleri kullanılarak üretilen kW başına maliyetin 10 kat düşmesi gerektiğini tahmin ediyor. Yakıt hücresi yığınlarının mevcut yüksek maliyetinin arkasındaki üç ana neden şu şekilde sıralanabilir; platin bazlı katalizörlere bağımlılık, hassas membran üretim teknikleri ve bipolar plakaların kaplama ve plaka malzemesi [13].

Ayrıca, makul bir maliyeti korurken kütle ve hacim başına yüksek enerji yoğunluğu sağlayan hidrojen depolama mekanizmalarının geliştirilmesi, hidrojen altyapısı açmazının ikinci yarısıdır. Hidrojen, normal bir kaptan kolayca sızabilecek çok hafif ve son derece yanıcı bir yakıt olduğundan, yaygın olarak benimsenen herhangi bir hidrojen depolama teknolojisinin tamamen güvenli olması gerektirir. Bununla birlikte, metal hidrit depolama teknolojilerinin nispeten yüksek maliyetini azaltmak ve özelliklerini daha da iyileştirmek için daha fazla araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. [13-14].

2.3.Yakıt Hücresi Pazarı ve Önde Gelen Şirketler

Yakıt Hücresi Pazar büyüklüğü 2021’de 3 milyar ABD Doları aşmıştır ve 2022 ile 2030 arasında %10’un üzerinde YBBO (Yıllık Bileşik Büyüme Oranı) ‘da büyümesi beklenmektedir. Ek olarak, yakıt hücresi talebinin 2030 yılına kadar 5,6 GW’ a ulaşacağı tahmin edilmektedir. Pazar büyümesi, özel ve kamu otoritelerinin, yakıt hücreli elektrikli araçlara (FCEV) yönelik artan taleple birlikte hidrojen yapıları kurmaya yönelik artan yatırımlarına dayanmaktadır [27].

Tablo 2.3, geliştirdikleri yakıt hücresi sistemleri türleri, şirketin ülkesi ve yakıt hücresi sistemleri çözümlerinin hedeflenen pazarları ile dünyadaki başlıca yakıt hücresi sistem çözümleri geliştiricilerinin önde gelenleri listelenmiştir.

Tablo 2.3. Bazı başlıca yakıt hücresi sistem çözümleri geliştirme şirketleri (Veriler [13]’den alınmıştır)

Ülke	#	Şirket	Yakıt hücresi(s)	Market
Amerika Birleşik Devletleri	1	Acumentrics	KOYH	RAPS Taşınabilir askeri teçhizat CHP üretimi Ticari dağıtılmış güç üretimi EPS
	2	Altergy	PEMYH	EPS
	3	Bloom Energy	KOYH	Ticari dağıtılmış güç üretimi EPS
	4	Boeing	PEMYH	Hava İtki Sistemleri Yardımcı Güç Ünitesi
	5	ClearEdge Powera	PEMYH ve FAYH	Konut ve ticari dağıtılmış enerji üretimi Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi EPS Yardımcı güç üniteleri Yakıt Pili Araçlar
	6	Delphi	KOYH	Yardımcı güç üniteleri
	7	EnerFuel	PEMYH	Konut ve ticari dağıtılmış enerji üretimi Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi EPS Yardımcı güç üniteleri
	8	First Element	PEMYH	EPS Endüstriyel ve ticari dağıtılmış enerji üretimi RAPS
	9	Ford	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
	10	FueCell Energy	EKYP ve KOYH	Ticari ve endüstriyel dağıtılmış enerji üretimi Ticari ve endüstriyel dağıtılmış CHP üretimi
	11	General Motors	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
	12	Infinity	PEMYH	Yardımcı güç üniteleri
	13	Microcell	PEMYH	EPS Taşınabilir güç jeneratörleri Ticari dağıtılmış CHP üretimi Ticari dağıtılmış CCHP üretimi
	14	Motorola	DMYH	Tüketici elektroniği EPS
	15	Neah Power	DMYH	Tüketici elektroniği Taşınabilir güç jeneratörleri Taşınabilir askeri teçhizat
	16	Nuvera	PEMYH	Malzeme taşıma Yardımcı güç üniteleri Yakıt Pili Araçlar Konut dağıtılmış elektrik üretimi
	17	Plug Power	PEMYH	Malzeme taşıma

Ülke	#	Şirket	Yakıt hücresi(s)	Market
Amerika Birleşik Devletleri	18	Protonex	PEMYH ve KOYH	Taşınilir askeri teçhizat İHA'lar Pil şarj cihazları Yardımcı güç üniteleri Taşınilir güç jeneratörleri EPS RAPS
	19	Vision	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
Japonya	1	Canon	PEMYH	Tüketici elektroniği
	2	Hitachi	KOYH DMYH	Tüketici elektroniği Taşınilir güç jeneratörleri
	3	Honda	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar Konut dağıtılmış CHP üretimi
	4	Mitsubishi	PEMYH KOYH	Yakıt Pili Araçlar Konut ve ticari dağıtılmış enerji üretimi Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi Deniz itki sistemleri
	5	Nissan	PEMYH DMYH	Yakıt Pili Araçlar
	6	Suzuki	PEMYH	LTVs Yakıt Pili Araçlar
	7	Toshiba	DMYP PEMYH FAYH	Tüketici elektroniği Pil şarj cihazları Konut dağıtılmış CHP üretimi EPS
	8	Yamaha	DMYP	LTVs
Almanya	1	BMW	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar Yardımcı güç üniteleri
	2	Daimlerd	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
	3	Heliocentris	PEMYH	Oyuncaklar ve eğitici kitler RAPS EPS
	4	Proton Motor	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar Malzeme taşıma EPS Deniz itki sistemleri
	5	Schunk	PEMYH	Pil şarj cihazları Genel amaçlı yığınlar ve sistemler
	6	Siemens	DMYH PEMYH KOYH	Tüketici elektroniği Deniz tahriki Endüstriyel dağıtılmış CHP üretimi
	7	Volkswagen	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar Yardımcı güç üniteleri
Kanada	1	AFCC	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
	2	Ballard	DMYH PEMYH	EPS Ticari dağıtılmış CHP üretimi RAPS Malzeme taşıma Yakıt Pili Araçlar
	3	Hydrogenics	PEMYH	RAPS Malzeme taşıma Yakıt Pili Araçlar Deniz itki sistemleri Hava İtki sistemleri EPS

Ülke	#	Şirket	Yakıt hücresi(s)	Market
Kanada	4	DDI Energy	KOYH	RAPS EPS Konut ve ticari dağıtılmış enerji üretimi Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi Yardımcı güç üniteleri
Birleşik Krallık	1	AFC Energy	AFC	Endüstriyel dağıtılmış güç üretimi
	2	Intelligent Energy	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar LTV'ler EPS Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi Tüketici elektroniği
	3	Morgan	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
Güney Kore	1	Hyundai	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
	2	Kia	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
	3	LG	DMYH KOYH	Tüketici elektroniği Endüstriyel ve ticari dağıtılmış CHP üretimi
	4	Samsung	PEMYH DMYH KOYH	Tüketici elektroniği Taşınabilir güç jeneratörleri Taşınabilir askeri teçhizat Dağıtılmış güç üretimi
İsveç	1	Cellkraft	PEMYH	RAPS EPS Taşınabilir askeri teçhizat
Danimarka	1	H2 Logic	PEMYH	Malzeme taşıma
Fransa	1	Peugeot	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar Yardımcı güç üniteleri
	2	Renault	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
İsviçre	1	MES	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar EPS Hava İtki sistemleri İHA'lar LTV'ler Taşınabilir güç jeneratörleri
İtalya	1	SOFCpower	KOYH	Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi RAPS
	2	Fiat	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
Belçika	1	Van Hool	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar
Finlandiya	1	Convion	KOYH	Konut dağıtılmış CHP üretimi
Hollanda	1	Nedstack	PEMYH	EPS RAPS Malzeme taşıma Yakıt Pili Araçlar Endüstriyel ve konut dağıtılmış CHP üretimi Deniz itki didtemi LTV'ler
Avustralya	1	Ceramic Fuel Cells	KOYH	Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi Konut ve ticari dağıtılmış enerji üretimi

Ülke	#	Şirket	Yakıt hücresi(s)	Market
Singapur	1	Horizon	PEMYH DMYH	İHA'lar Tüketici elektroniği Pil şarj cihazları Taşınabilir güç jeneratörleri Oyuncaklar ve eğitici kitler RAPS EPS Yakıt Pili Araçlar
Yunanistan	1	Tropical	PEMYH	Yakıt Pili Araçlar Konut ve ticari dağıtılmış CHP üretimi Taşınabilir güç jeneratörleri LTV'ler EPS RAPS
Türkiye	1	Teksis	KOYH PEMYH DMYP	1W ile 250 kW arasında değişen yakıt hücresi üretimi Yıgın birleştiriciler ve kompleks yakıt hücresi armatürleri
	2	Lentatek (Zorlu Grup)	KOYH PEMYH	Sivil ve askeri kullanım için KOYH ta 1-1,3 kW arasında; PEMYH de 1- 50kW arasında üretim

Tablo 2.3'te örnekleri görüldüğü gibi dünya pazarında çok sayıda yakıt hücresi üreticisi bulunmaktadır. Bu firmalar ise farklı özellikte yakıt hücresi üretmektedir. Aşağıda bazı firmaların ürettikleri yakıt hücresi özellikleri sıralanmıştır;

- Massachusetts merkezli Sirius Integrator, şu anda tüm Kuzey Amerika için **Acumentrics** RP250, RP500, RP1000 ve RP1500 propan ve doğal gaz katı oksit yakıt hücresi jeneratörleri ve hizmetlerinin bir satıcısıdır. Acumentrics RP Serisi, sessiz, temiz ve güvenilir DC güç sistemleri ailesidir ve:

- boru şeklindeki seramik SOFC teknolojisine dayalı
- uzak veya şebeke dışı uygulamalara hizmet vermek için tasarlanmıştır.

RP Serisi, -40°C ile $+50^{\circ}\text{C}$ arasında değişen aşırı dış ortamlarda çalıştırılabilir. Bu düşük basınçlı sistemler, 2 ila 5 psi (0,14-0,35 bar) arasında ve yüksek basınçlı gaz seçeneğiyle 125 psi'ye (8,6 bar) kadar gaz kullanabilir [28].

- Folsom'da bulunan Kaliforniya merkezli, özel bir şirket olan **Altergy** 5-100 kW arasında yakıt hücresi motorları üretmektedir. Altergy, PEMFC'yi pazara getirmenin 2 ana zorluğunu aşağıdaki gibi sıralamıştır [29]:

- PEMFC Sabit Pazara Giriş
- Membran Elektrot Grupları (MEA'lar) (Ürün maliyetinin >%63'üne atfedilir)

- Hidrojen Teslimatında bir başka yakıt hücresi üreticisi olan **Bloom Energy**, yakıt hücreli gemilerin tasarımı ve geliştirilmesi yoluyla endüstriyi daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru hızlandırmaya yardımcı olmak için deniz taşımacılığı pazarına girdi. Bloom Energy'nin katı oksit yakıt hücresi (KOYH) platformu, sıvı doğal gazdan (LNG) yanma olmadan yüksek verimlilikte elektrik üretmek için elektrokimyasal bir yol sağlayarak çevresel etkileri önemli ölçüde azaltır. Bloom energy yakıt hücreleri yüksek elektrik verimliliğine sahiptir. (%64 DC çıkış ve birleşik ısı ve Güç (CHP) uygulamalarıyla %85'e varan verimlilik). Bloom Energy Deniz Güç Modüllerinin bazı özellikleri [30]:

- Bloom Energy Deniz Güç Modülleri, birkaç kilowatt ölçeğinden megawatt ölçeğine kadar enerji sistemlerinin kurulmasını sağlamak için ölçeklendirilebilir.

- Sefer planlaması üzerindeki etkiyi en aza indiren kolay ve düşük bakım sunar.

-Genel sistem verimliliğini %85'e kadar artıran ısı geri kazanım sistemleriyle uyumludur.

-Minimum su tüketimi vadeder. H2O, Bloom'un egzoz akışının bir bileşenidir. Güç üretim modu sırasında su geri dönüştürülür, dolayısıyla MPM tarafından üretilen net su yoktur.

-Sistem Proses Egzozu (Sabit Durum @ Tam Güç): NO_x (ihmal edilebilir), SO_x (ihmal edilebilir), CO (0.008 lbs/MWh, 0.0036), VOC (0.02 lbs/MWh, 0.009 kgs/MWh), Belirtilen verimlilikte CO₂ (Doğal gazda 679-833 lbs/MWh), Metan Slip (ihmal edilebilir), Ses Seviyesi (<70 dBA @ 6ft)

-Yakıt hücreli hava aracı çalışmaları ile ön plana çıkan **Boeing**'in örnek prototipleri hakkında bilgi Tablo 4.1'de mevcuttur.

• **Protonex Teknoloji Şirketi**, geniş bir güç aralığında taşınabilir, uzak ve mobil uygulamalar için gelişmiş yakıt hücresi güç çözümlerinin lider sağlayıcılarından. NRL (Naval Research Laboratory) tarafından geliştirilen ve literatüre önemli katkı sunan 'Ion Tiger' projesine yakıt hücresi sağlamıştır. NRL, yakıt hücresi sistemini geliştirmek için Protonex Technology Corporation, sistem testi ve modellemesi için Hawaii Üniversitesi, hidrojen tanklarını inşa etmek için HyperComp Engineering ve Ion Tiger uçak gövdelerini inşa etmek için Arcturus UAV ile çalışmıştır. 550 Watt'lık yakıt hücresi ile 24 saat dayanıklılık sağlayabilen 35 lb'lik bir uçak tasarlanmıştır. Protonex Teknoloji Şirketi, Ion Tiger için güç hedefini %10 oranında aşan yeni bir 2,2 pound 550 Watt yakıt hücresi sistemi geliştirmiştir. Tam sistem, 36 hücreli bir yakıt hücresi yığını, bir hava üfleyici, bir soğutucu pompası, nemlendirici ve kontrol elektroniği içermektedir. Hidrojen yakıtının %99'unu %40 ila %45 verimle elektrığe dönüştürür [31].

• **Honda**, çevre dostu FCS yakıt hücreli aracı ilk kez 2002 yılında Japonya ve ABD pazarlarına sunmuştur. 2004 yılında şirket, -20 °C'de çalıştırılabilen bir yakıt hücresi yığını ile donatılmış ve aracın soğuk iklimlerde kullanılmasını sağlayan bir FCX aracı geliştirmiştir. Önceki Honda FC yığını, hidrojen ve oksijenin hücrelere yatay olarak aktığı bir konfigürasyon kullanıyordu. V akışlı FC yığında kullanılan yeni konfigürasyonda hidrojen ve oksijen dikey olarak akmaktadır. Bu, sistemin üretim yüzeylerinde oluşan suyu yerçekimi kuvveti kullanarak sorunsuz bir şekilde tahliye etmesini sağlamaktadır. Drenaj kapasitesindeki bu iyileştirme, akış kanallarının yüksekliğinin %17 oranında azaltılmasını sağlayarak ağırlık tasarrufuna ve daha fazla kompaktlığa katkıda bulunmuştur. Düşük sıcaklıkta ilk çalıştırma işlemine de katkı sağlamaktadır. Ünitenin boyutunda ve ağırlığında yukarıda bahsedilen azalma, ısı kapasitesini yaklaşık %40 oranında azaltmıştır. Bu, ısınma performansının artmasıyla sonuçlanmıştır. Clarity'nin -20 °C'de çalıştırıldığında %50 çıkışa ulaşması için gereken süre, önceki FCX'in gerektirdiği sürenin dörtte biri kadardır ve araç da -30 °C'de çalışabilmektedir [32].

• Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi, dünya çapında test ve tanıtım amaçlı kullanılacak olan BMW iX5 Hydrogen'de de kullanılmaktadır. Araç, **BMW Group**'un yakıt hücreleri alanında son yıllarda yaptığı büyük sıçramayı etkileyici bir şekilde göstermektedir. Küçük seri aracın yenilikçi yakıt hücresi teknolojisi, 125 kW/170 hp'lik sürekli yüksek performans sunmaktadır. Beşinci nesil BMW eDrive teknolojisinden bir elektrik motoru ve bu araç için özel olarak geliştirilmiş yüksek performanslı bir pil ile, bu aracın güç aktarma organları yola 275 kW/374 hp getirmektedir [33].

• **Proton Motor**, Alman denizcilik, sabit ve mobil uygulamalar için yakıt hücresi yığınları ve yakıt hücresi sistemleri üreticisidir. Farklı uygulamalar için ürettiği yakıt hücresi çözümleri aşağıdaki gibidir[34].:

-Proton Motor, tamamen elektrik tahrikli dünyanın ilk özel demiryolu inşaat makinesi bağlamında, 2021'de **HyRail®** çoklu yığın sistemini geliştirmiştir. Temiz "yeşil" ve emisyonuz HyRail® hidrojen yakıt hücresi ürünü, isteğe bağlı olarak bir sürücü çözümü ile tekli veya çoklu PM 400 yığın modülleriyle donatılmıştır.

-Proton Motor'un yeni modüler **HyShip®** hidrojen yakıt hücresi sistemi, denizcilik uygulamaları

için 2021 ürün yeniliği göstermektedir. Öncelikle elektrikli güç aktarma organlarının ve yolcu, kargo, çalışma, askeri gemiler ve denizaltıların diğer yerleşik tüketicilerinin güç kaynağı için geliştirilmiştir. Sürücü bileşeni, tekli veya çoklu PM 400 yığın modülleriyle üretilmektedir.

-Entegrasyona hazır yakıt hücresi sistemi çözümü noktasında HyModule®'nin geleneksel dizel ve/veya pil kullanımına kıyasla çok yüksek güvenilirliği ve düşük bakım maliyetleri, acil durum güç uygulaması bağlamında bir enerji kaynağı olarak hidrojen yakıt hücresi teknolojisini göstermektedir.

-Pille çalışan ticari araçlar ve otobüsler için hidrojen bazlı yakıt hücresi HyRange® genişletici, 21 kW ila 213 kW güç sınıfındaki mobilite uygulamaları için etkili bir destek olarak lanse edilmektedir. HyRange® sistemi, mevcut akü kapasitesi amaçlanan çalışma için yeterli olmayan araçların yelpazesini güçlendirmekte ve genişletmektedir. Tipik uygulama alanları: Yerel toplu taşıma, Kamyonlar ve Nakliyeciler, Belediye Araçları, Arazi Araçları, Lojistik ve Ticari araçlar, Havaalanı apron uygulamaları, Denizcilik güç çözümleri, Yerleşik güç kaynağı (APU), olarak sıralanabilir [34].

• **Ballard** çeşitli alanlarda kullanılmak üzere yakıt hücresi geliştiren bir başka firmadır. Ağır Hizmet Modülleri, Yakıt Hücresi Yığınları, Sabit Güç Üretimi, Denizcilik Modülleri gibi çeşitli alanlara hizmet etmektedir [35].

-Ballard 50kW'dan 100kW'a kadar net güce sahip ağır hizmet modülleri, otobüsler, kamyonlar ve hafif raylı sistem gibi hareketli uygulamalar için esnek çözümler sunmaktadır. (Ağır Hizmet Modülleri).

-Ballard, mobiliteye ve sabit uygulamalara güç sağlamak için birden fazla hava soğutmalı ve sıvı soğutmalı PEM yakıt hücresi yığını platformu sunmaktadır (Yakıt Hücresi Yığınları).

-Ballard esnek yakıt hücresi ürün platformları, birkaç kW'dan birden çok MW'ye kadar nominal güç aralığı ile sürekli ve yedek güç uygulamaları için güvenilir bir sistem sağlayabilmektedir. (Sabit Güç Üretimi)

- Ballard'ın 200 kilovatlık sistemi FCwave™, deniz gemilerine sıfır emisyonlu güç sağlamak üzere tasarlanmıştır. 100 milyon kilometreden fazla ağır hizmet aracı çalışmasına dayanan ürün geliştirme ve saha deneyiminin doruk noktası olan Ballard'ın FCwave™ yakıt hücresi modülü, deniz ortamlarında kullanım için DNV tarafından test edilmiş ve onaylanmıştır. Modül, çok çeşitli denizcilik uygulamalarına uyacak şekilde 200 kilowatt'tan megawatt'a kadar ölçeklenebilmektedir. (Denizcilik Modülleri) [35].

• **Horizon**'un teknoloji platformunun üç ana bölümü bulunmaktadır: PEM yakıt hücreleri (mikro yakıt hücreleri ve yığınları) ve malzemeleri, hidrojen kaynağı (elektroliz, reform ve hidroliz) ile hidrojen depolama ve basınçla ilgili cihazlar.

Yakıt hücresi yığınları ise üç aralıkta sunulmaktadır:

- 10W ile 5 kW arasında kullanılabilen standart kullanıma hazır PEM yakıt hücresi sistemlerinin yanı sıra 150 kW'a kadar özelleştirilmiş yakıt hücresi sistemi konfigürasyonları;

-Asya'da Shell Eco-Marathon'daki ekiplerden biri ile yapılan gerçek testte %59'luk bir tepe verimliliği elde eden birinci sınıf H-1000XP 1 kW yığınları;

-200W ila 1.000W arasında ultra hafif ve kompakt Havacılık.[36]

BÖLÜM 3

KARA TAŞITLARINDA YAKIT HÜCRESİ KULLANIMI

Bu bölümde öncelikle karayolu taşıtları sınıflandırılmıştır. Daha sonra yakıt hücreli kara taşıtlarının temel yapılarına, avantaj ve dezavantajlarına değinilerek yakıt hücresi kullanan kara taşıtlarının gelişimi listelenmiştir. Son olarak ise hidrojen dolum tesisleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Federal Otoyol İdaresi (FHWA), Trafik İzleme Kılavuzu'nda (TMG) açıklandığı gibi 13 araçlık bir sınıflandırma sistemi kullanmaktadır. Bu sistem, araç tipleri arasında öncelikle lastik sayısı, aks sayısı ve gövde çerçevesi tipi (yani tekli veya çoklu üniteler) temelinde ayırım yapar. Şekil 3.1. sınıflandırma sistemine dahil edilen 13 kategoriye giren araç türlerini göstermektedir [37]. Tablo 3.1 ise Türkiye'deki araç sınıflandırmasını vermektedir [68,77].

Sınıf 1 Motosikletler		Sınıf 7 Dört veya daha fazla aks Tek ünite	
Sınıf 2 Yolcu arabaları		Sınıf 8 dört veya daha az aks Tek römork	
Sınıf 3 Dört Teker Tek ünite		Sınıf 9 5 akslı traktör yarı römork	
Sınıf 4 Otobüsler		Sınıf 10 Altı veya daha fazla aks Tek römork	
Sınıf 5 İki aks 6 lastik Tek ünite		Sınıf 11 Beş veya daha az aks, çoklu römork	
Sınıf 6 Üç aks Tek ünite		Sınıf 12 Altı aks çoklu römork	
Sınıf 13 Yedi veya daha fazla aks çoklu römork		Sınıf 13 Yedi veya daha fazla aks çoklu römork	

Şekil 3.1. Federal Karayolu İdaresi 13 araç kategorisi sınıflandırması. ([37]'den alınmıştır.)

13 araçlık sisteme dahil edilen belirli kategoriler aşağıda açıklanmıştır [37]:

- Sınıf 1 araçlar, iki veya üç tekerlekli motorlu araçlar olarak tanımlanan Motosikletlerden oluşmaktadır. Buna motosikletler, mopedler, motorlu, bisikletler ve üç tekerlekli motosikletler dahildir.

- Sınıf 2 araçlar, yolcu taşımak için üretilmiş, ancak eğlence amaçlı veya diğer hafif römorkları çekmek için de kullanılabilen sedanlar, coupe'ler ve istasyon vagonlarından oluşur. Tüm bu araç türleri, 13 araçlık sistemde binek araçlar olarak kabul edilmektedir.
- Sınıf 3 araçların tümü, binek araç olarak kabul edilmeyen dört lastikli, tek üniteli araçlardır. Bunlar arasında kamyonetler, paneller, kamyonetler, kampçılar, karavanlar, ambulanslar, cenaze arabaları, el arabaları ve minibüsler bulunur.
- Sınıf 4 araçlar, yolcu taşıma aracı olarak kullanılan okul otobüsleri dahil tüm otobüslerdir.
- Sınıf 5 araçlar, iki dingilli, altı lastikli, tek üniteli kamyonlardan oluşur. Kamyonlar, kamp ve eğlence araçları dahil olmak üzere tek çerçeveli tüm araçları ve iki dingilli ve çift arka tekerleği olan karavanları içerir.
- Sınıf 6 araçlar, üç dingilli tek üniteli araçlardır. Kamyonlar, kamp ve eğlence araçları ve karavanlar dahil olmak üzere tüm araçları tek bir çerçeve üzerinde içerirler.
- Sınıf 7 araçlar, dört veya daha fazla dingili olan tek üniteli araçlardır. Bu kategori, dört veya daha fazla dingilli tek bir şasi üzerindeki tüm kamyonları içerir.
- Sınıf 8 araçlar, dört veya daha az dingili olan tek römorklu kamyonlardır. Bu kategori, biri traktör veya düz kamyon güç ünitesi olmak üzere iki üniteli tüm araçları içerir.
- Sınıf 9 araçlar, biri traktör veya düz kamyon güç ünitesi olmak üzere beş dingilli ve iki üniteli araçlardır.
- Sınıf 10 araçlar, biri traktör veya düz kamyon güç ünitesi olmak üzere iki üniteli altı veya daha fazla dingili olan araçlardır.
- Sınıf 11 araçlar, beş veya daha az dingili ve üç veya daha fazla birimi olan tüm araçlardır. Sınıf 11 araçlardaki üç üniteli biri traktör veya düz kamyon güç ünitesidir.
- Sınıf 12 araçların tamamı altı dingilli ve üç üniteli araçlardır. Ünitelerden biri bir traktör veya düz kamyon güç ünitesidir.
- Sınıf 13 araçlar, yedi veya daha fazla dingili ve üç veya daha fazla birimi olan araçlardır. Ünitelerden biri bir traktör veya düz kamyon güç ünitesidir.

Ülkemizde ise araç kategorileri sınıflandırmaları; M, N, O, L, T ve G kategorizasyonuna göre, 18.07.1997 günlü, 23053 sayılı Resmi Gazete ile sınıflandırılmıştır.

Tablo 3.1. Türkiye'de araç sınıflandırması [77]

Araç Kategorisi	
M	En az 4 tekerlekli motorlu yolcu taşıma araçları
N	En az 4 tekerlekli motorlu yük ve eşya taşıma araçları
O	En az 4 tekerlekli motorsuz yük ve eşya taşıma araçları. Römorklarla ilgilidir.
L	2,3 ve 4 tekerlekli mopet ve motosikletler
T	Traktörler
G	Arazi araçları

Karayolu taşımacılığının birçok üstün yönü bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir [39]:

- Kapıdan kapıya aktarmasız taşıma sağlar. Diğer taşıma türlerine göre aktarım olmadığı için (örneğin liman, demir yolu istasyonu veya hava alanı gibi yerlerde yükleme boşaltma vb) taşınan eşyalar daha az yer değiştirmektedir.
- Kara yolunun olduğu her noktaya taşıma seçeneği vermektedir.

- Diğer taşımacılık türlerine kıyasla görece ucuzdur.
- Daha az yatırım maliyeti gerekmektedir.
- Düzenli ve sık sefer imkânı bulunmaktadır.

Uluslararası karayolu yük taşımacılığı, deniz yolu yük taşımacılığında sonra (değer ve ağırlık bazında) ikinci sırada yer almaktadır. Ayrıca 2020 yılı itibarıyla yurt içi yük taşımacılığının da %88,3'ünün karayolu ile yapıldığı analiz edilmiştir [4]. IEA'nın (Uluslararası Enerji Ajansı) raporuna göre, ulaşım sektörü dünya emisyonlarının yaklaşık %30'undan sorumludur ve %70'e yakın karayolu taşıtlarından kaynaklanan emisyonlardan oluşmaktadır [42].

3.1. Yakıt Hücreli Araçların Temel Yapısı, Avantajları ve Dezavantajları ve Diğer Araç Türleri İle Kıyaslanması

Petrol rezervinin tükenmesi riski ve bu riske bağlı olarak petrol fiyatlarının artışından daha az etkilenmek ve uzun menzilli emisyonuz sürüş için anahtar olan hidrojen yakıt pilli araçlar (elektrikli araçlar) elektriğe dönüşen hidrojeni kullanarak hareket sağlamak için elektrik motorlarını kullanırlar [39]. Klasik araç teknolojisinde meydana gelen yanma kimyasal enerjisi-mekanik enerji dönüşümü yerine elektrokimyasal- elektrik dönüşümü sağlanarak yüksek basınçta, yüksek gürültü seviyelerinde gerçekleşen büyük atalet kuvvetlerin ve titreşimlerin meydana geldiği yapı yerine oldukça düşük sıcaklıklarda ve çok düşük gürültü seviyesinde çalışan, düşük emisyon ve titreşim seviyeli bir yapı gerçekleşir [40].

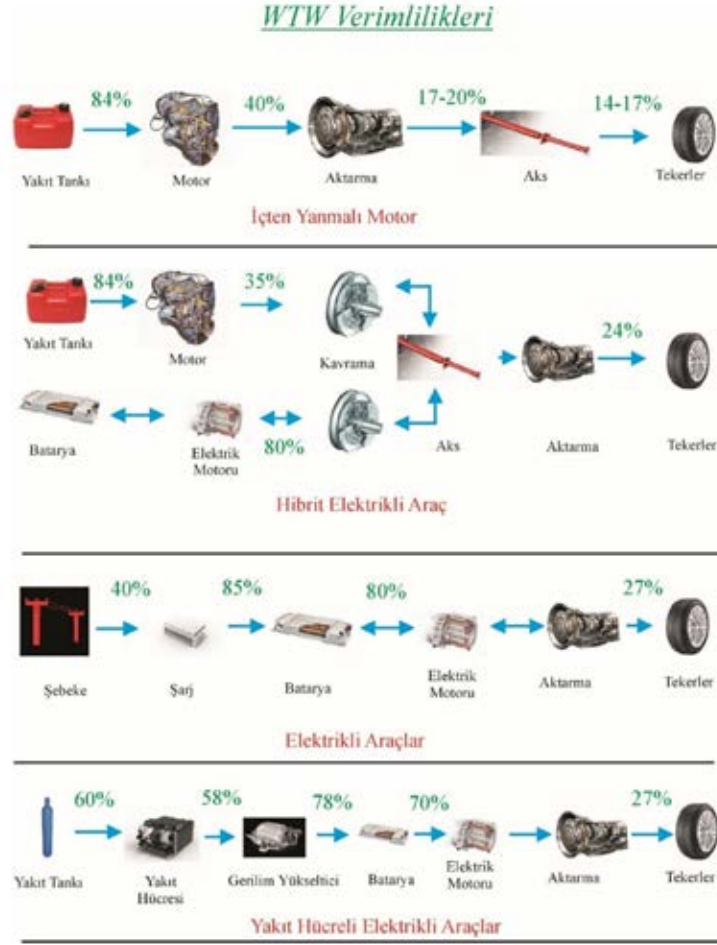
Elektrikli araçların tahrik düzenekleri temelde 3 konfigürasyonda yapılırlar: Batarya elektrikli araçlar (BEV), Hibrit elektrikli araçlar (HEV), yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV). Bu üç tür aracın temel özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Yakıt pili ve batarya için başlangıç maliyeti konvansiyonel motor ile karşılaştırıldığında daha yüksektir ancak 2030 yılına kadar hem bataryanın hem de yakıt pilinin fiyatı içten yanmalı motorla neredeyse rekabet eder hale geleceği beklenmektedir [41].

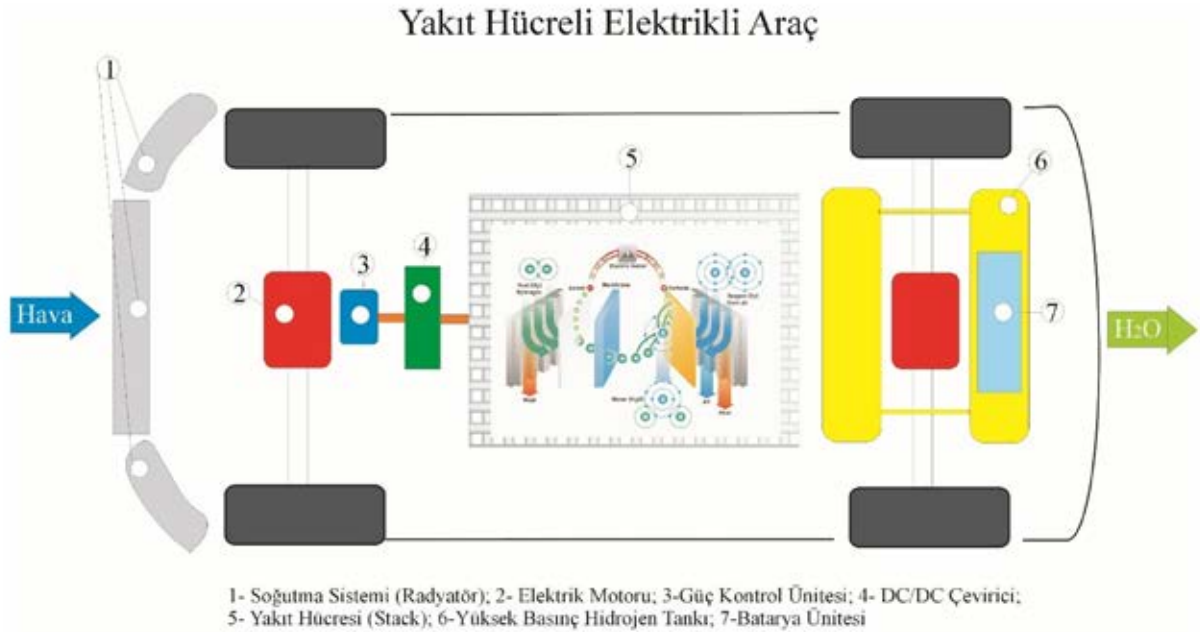
FCEV'ler, uzun yıllar süren araştırmaların ve EV ve HEV nesillerinin sonucudur. Teknolojiler aynı özellikleri paylaşmasına rağmen enerji kaynakları birbirinden farklıdır. Kaynaktan tekere güç iletiminin ve bu kullanımın veriminin şematik çizimi Şekil 3.2'de verilmiştir [40]. Ayrıca Şekil 3.3, bir FCEV'nin komponentleri resmedilmiştir [42].

Tablo 3.2. BEV, HEV ve FCEV'in özellikleri [39]

	Salt Elektrikli EV	Hibrit EV	Yakıt hücreli EV
Tahrik	Elektrik motoru sürücülere	Elektrik motoru sürücülere İçten yanmalı motorlar	Elektrik motoru sürücülere
Enerji sistemi	Batarya ve/veya Süperkapasitör	IYM jeneratör ünitesi Batarya Ultrakapasitör	Yakıt hücreleri
Enerji kaynağı & Altyapı	Elektrik şebekesi şarj tesisleri	Benzin istasyonları Elektrik şebekesi şarj tesisleri (İsteğe bağlı)	Hidrojen Metanol veya benzin Etanol
Özellikler	Sıfır emisyon	Çok düşük emisyon	Sıfır emisyon veya ultra düşük emisyon
	Ham petrol bağımsızlığı	Uzun sürüş mesafesi	Yüksek enerji verimliliği
	100-200 km kısa mesafe	Ham petrol bağımsızlığı	Ham petrol bağımsızlığı
	Yüksek başlangıç maliyeti	Karmaşıklık	Memnun sürüş aralığı
	Ticari olarak uygun	Ticari olarak uygun	Ticari olarak uygun



Şekil 3.2. Araç çeşitlerinin Kaynaktan Tekere (Well To Wheel-WTW) Verimlilik analizi [42]'den alınmıştır



Şekil 3.3. FCEV'nin komponentleri [42]'den çevrilmiştir.]

Temel bir yakıt hücresi elektrikli araç aşağıdaki komponentlerden oluşmaktadır [42]:

- Soğutma sistemi (Radyatör)
- Elektrik Motoru
- Güç Kontrol Ünitesi
- DC/DC Çevirici
- Yakıt Hücresi Yığını (stack)
- Yüksek Basıncılı Hidrojen Tankı
- Batarya Ünitesi

Şekil 3.3' te görüldüğü gibi; bir yakıt hücresi tarafından üretilen enerji doğrudan aracın çekiş motoruna güç sağlayabilir veya bir pil veya ultra kapasitörde depolanabilir. Sistemde depolama (akü veya kondansatör) yoksa, rejeneratif frenleme mevcut olamaz. Yakıt hücresi hibrit elektrikli araçlar (FCHEV) özellikle artırılan ilave enerji kaynakları için gerekli olan daha yüksek araç hızı ve güç artışına ihtiyaç duyulduklarında kullanılırlar. Yukarıda bahsedilen aparatlarla birlikte; bataryalı elektrik araçlarınkine benzer bir sürüş çevrimi gerçekleştiren FCEV'lerin diğer elektrikli araçlarla karşılaştırıldıklarında en önemli iki avantajı; kısa yakıt dolum süresi (takribi 7 dakika) ve yakıt pillerinin normal bataryalardan daha verimli olmasıdır. Emisyon açısından ise çevreci seçeneklerden biri FCEV'lerdir. Zira içten yanmalı motorlar direkt olarak petrol türevleri ile çalışmakta; EV ve HEV ler elektrikli veya elektrik destekli çalışıyor olsa da aracı şarj edecek şebeke elektriğinin büyük kısmını fosil yakıt kullanan güç santrallerinden sağlanmaktadır. Bu yüzden hem FCEV ler için üretilecek hidrojenin; hem EV ler için üretilecek elektriğin, alternatif ve yeşil enerji kaynaklarından üretilmesi çevresel olgular açısından çok önemlidir.

Yakıt hücrelerinin kara araçlarında kullanılmasındaki avantajlarının yanısıra çözülmesi gerektiren birçok nokta barındırır. Bunlardan bazıları şu şekilde sayılabilir [10]:

- Teknolojinin Bilinmeyenlerinin Azaltılması ve çalışmaların artırılması
- Hidrojen üretim ve depolama maliyetlerinin düşürülmesi
- Membranda su ve ısı yönetiminin geliştirilmesi
- Güvenlik için gerekli olan sızıntı önleme şartlarının sağlanması
- Aküden ve yakıt hücresinden elde edilen gücün dağıtımının koordinasyonu (Özellikle DC/DC konverter olmadığı durumlarda)
- Aracın ve yakıt hücresi yardımcı ünitelerinin de güç ihtiyacının bulunması ve bunun karşılanması

3.2.Yakıt Hücresi Kullanılan Kara Araçlarının Gelişimi

Tablo 3.3 yakıt hücresi kullanılan kara araçlarının gelişimini göstermektedir.

Tablo 3.3. Yakıt hücresi kullanan kara araçlarının gelişimi [43-50]

Prototip	Prototip adı	Yıl	Yakıt hücresi (üretici) /Yakıt	FC kapasite	Prototip Özellikleri	Kaynak
	Honda FCX-V4	2002–2008	PEMFC	78 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 300 km •Motor tipi: Endüksiyon motoru •En yüksek hız: 140 km/ h 	[43-44]
	Ford Focus FCV	2008–2011	PEMFC	85 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 320 km •Motor tipi: Endüksiyon motoru •En yüksek hız: 129 km/ h 	[43]
	Nissan X-Trail FCV	2003–2013	PEMFC	90 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 300-500 km •Motor tipi: Senkron motoru •En yüksek hız: 150 km/ h 	[43,45]
	Mercedes-Benz A F-Cell	2005–2007	PEMFC	-	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 160–180 km •En yüksek hız: 132 km/h 	[43]
	Chevrolet Equinox FC	2007–2009	PEMFC	93 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 310 km •Motor tipi: Kalıcı mıknatıslı motor •En yüksek hız: 141 km/ h 	[44]
	Honda FCX Clarity	2008–2015	PEMFC	100 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 435 km •Motor tipi: Fırçasız DC motor •En yüksek hız: 160 km/ h 	[43,46]
	Mercedes-Benz B F-Cell	2010–2014	PEMFC	-	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 400 km •En yüksek hız: 132 km/ h 	[43,47]
	Hyundai Tucson FCEV	2014-Now	PEMFC	100 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 594 km •Motor tipi: Endüksiyon motoru •En yüksek hız: 160 km/ h 	[43,48]
	Toyota Mirai FCEV	2015-Now	PEMFC	128 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 1003 km •Motor tipi: Endüksiyon motoru •En yüksek hız: 174 km/ h 	[43,49]
	Nissan e-Bio Fuel Cell	2016-Now	SOFC	5 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 600 km 	[43,50]

Prototip	Prototip adı	Yıl	Yakıt hücresi (üretici) /Yakıt	FC kapasite	Prototip Özellikleri	Kaynak
	Waterstofregio 2.0	2016	PEMFC	60 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Batarya Kapasitesi:85 kWh •Hidrojen tank basıncı: 350 bar 	[51]
	H2-Share	2017-2021	PEMFC	88kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 400 km •Toplam Güç: 210 kW 	[51]
	ASKO	2017-2024	PEMFC	90 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 400- 500 km •Toplam Güç: 290 kW •Hidrojen tank basıncı: 350 bar •Batarya Kapasitesi:56 kWh 	[52]
	Honda Clarity	2019-Now	PEMFC	103 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 590 km •Motor tipi: PM Senkron Motor •En yüksek hız: 178 km/ h 	[43,53]
	Mercedes-Benz GLC FCELL	2020-Now	PEMFC	100 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 478 km •Motor tipi: Endüksiyon motoru •En yüksek hız: 160 km/ h 	[43]
	Hyundai Nexso	2020-Now	PEMFC	95 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 756 km •Motor tipi: İç PM Senkron Motor •En yüksek hız: 179 km/ h 	[43,54]
	Hyundai Hydrogen Mobility	2020	PEMFC	190 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 400 km •Toplam Güç: 465 hp •Hidrojen tank basıncı: 350 bar •Batarya Kapasitesi: 73,2 kWh 	[51]
	Gumpert Aiwys Nathalie	2021-Now	DMFC	130 kW	<ul style="list-style-type: none"> •Menzil: 820 km •Motor tipi: Fırçasız DC motor •En yüksek hız: 305 km/ h 	[43,55]

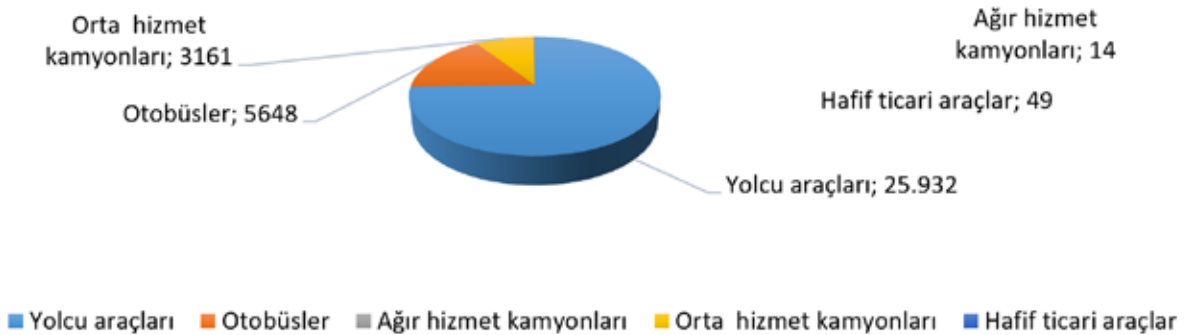
Günümüzde birçok otomotiv üreticisi yakıt hücreleri araç prototiplerine sahipken, Honda Clarity FCEV, Hyundai Tucson FCEV ve Toyota Mirai FCEV seri üretim açısından ticarileştirilenler arasındadır [39]. Birçok firma ve araştırmacı yakıt hücreleri araçlar için çalışmalar yapmaktadır. Toyota da

bu firmaların başında gelmektedir. Toyota Motor Corporation (TMC), yakıt hücresi yığınınını ve yakıt hücresi hibrit sisteminin ana bileşenlerini tamamen kendi bünyesinde geliştirmiştir [56]. TOYOTA FCHV binek otomobilinin yanı sıra TMC,Hino Motors Ltd. ile işbirliği içinde büyük bir şehir içi otobüsü olan TOYOTA FCHV-BUS'un geliştirilmesini teşvik etmektedir. TMC, Hybrid Technology'yi gelecekte her türlü güç aktarma sisteminin verimliliğini artırmak için temel bir teknoloji olarak görmekte ve TOYOTA FCHV'nin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Şekil. 3.4. Toyota Mirai'nin güç sistemini göstermektedir. [57-58].



Şekil 3.4. Toyota Mirai aracı ([57-58]'dan alınmıştır)

Samsun vd, yapmış oldukları çalışmada; 2020 yılı sonu itibariyle dünya çapında her türden 34.804 yakıt hücreli aracın (FCV) faaliyette olduğunu bildirmişlerdir (Şekil 3.5.) Bu toplam, binek otomobilleri, otobüsleri, hafif ticari araçları ve orta ve ağır hizmet kamyonlarını içermektedir [59].



Şekil 3.5 Dünya çapında toplam yakıt hücreli araç (FCVs) sayısında farklı araç tiplerinin payı ([59]'dan alınmıştır)

3.3.Hidrojen Dolum Tesisleri

Hidrojen akaryakıt istasyonları, FCEV ulaşım altyapısının en önemli yapı taşlarından biridir. Benzinin tanker kamyonlarla teslim edildiği geleneksel benzin istasyonlarının aksine, hidrojen yakıtı kamyonlarla, hidrojen boru hatlarıyla teslim edilebilir veya yakıt istasyonlarında yerinde üretilebilmektedir. Mevcut ve yakın gelecekteki FCEV'ler genellikle 35 veya 70 MPa'da (350 veya 700 bar) yerleşik sıkıştırılmış hidrojen depolama tanklarıyla donatılacaktır. Çoğu yakıt istasyonunun, her iki basıncı da karşılamak için dağıtıcılar kurması gerekecektir [60-61].

2020 yılının sonunda, hem kamu hem de özel tesisler dahil olmak üzere 540 HRS faaliyetine devam etmektedir. Kıta bazlı bir analiz, çoğu HRS'nin toplam 278 ile Asya'da, ardından 190 ile Avrupa ve 68 ile Kuzey Amerika'da yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Yine bu çalışmada; en fazla istasyona sahip ülkenin Japonya (137) olduğu aktarılmaktadır. Almanya (90) ve Çin (85) bu sıralamada sırası-

la ikinci ve üçüncü sırada yer almaktadırlar. 2017-2020 döneminde dünya genelinde hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının sayısındaki artış Şekil 3.6'da sunulmaktadır [59].

Avrupa'da ise 2019 yılında 177 adet istasyon vardı. Haziran 2020 itibarıyla, Almanya'da 84 adet, Fransa'da 5 adet, İzlanda'da 3 adet, İtalya'da 1 adet, Hollanda'da 4 adet, Danimarka'da 6 adet, Belçika'da 2 adet, İsveç'te 4 adet, İsviçre'de 3 adet, Birleşik Krallık'ta 11 adet halka açık istasyon bulunmaktadır[61]. Türkiye'de ise 2012 yılında İstanbul'da 1 adet hidrojen yakıt istasyonu kuruldu. Ancak günümüzde aktif çalışan hidrojen dolum istasyonu bulunmamaktadır. [78]

Binek otomobil istasyonlarının çoğu operasyonel olarak 700 barda çalıştırılmaktadır. Otobüs istasyonları ise genellikle 350 bar kullanır. FCH JU / Avrupa Komisyonu'nun HRS Kullanılabilirlik Haritası, Avrupa'da 145 adet halka açık HRS istasyonu olduğunu belirtmiş; bunlardan 127 istasyon binek otomobiller için 700 bar, 46 istasyon yine binek otomobiller için 350 bar ve 16 istasyon otobüsler için 350 bar sağladığını belirtmişlerdir [59].



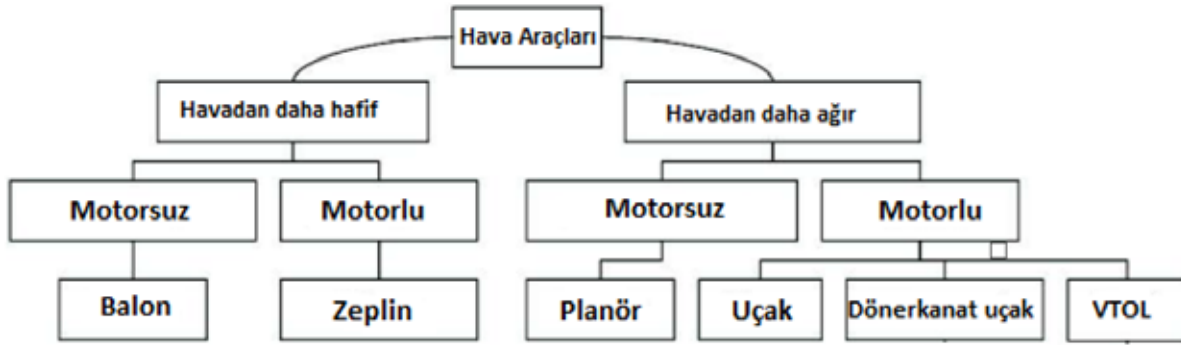
Şekil 3.6. 2017-2020 döneminde dünya genelinde hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının sayısındaki artış ([59]'den alınmıştır).

BÖLÜM 4

HAVA TAŞITLARINDA YAKIT HÜCRESİ KULLANIMI

Bu bölümde öncelikle hava taşıtları sınıflandırılmıştır. Daha sonra yakıt hücreli hava araçlarının temel yapılarına, avantaj ve dezavantajlarına değinilerek yakıt hücresi kullanan hava taşıtlarının gelişimi listelenmiştir.

İnsan taşımacılığının yan ısıra genel olarak birim fiyatı en yüksek ürünlerin taşınmasında kullanılan havayolu yük taşımacılığı, zaman duyarlılığı yüksek olan yüklerde tercih edilmektedir. Uzak mesafelerin kısa sürede kat edilmesini sağlaması sayesinde havayolu taşımacılığının küresel ticaretin hızının artması üzerinde önemli bir etkisi vardır [4]. Şekil 4.1’de hava araçlarının bir sınıflandırması mevcuttur [62].



Şekil 4.1. Uçma prensibine ve tahrik moduna bağlı olarak hava aracı genel sınıflandırması ([62]’den alınmıştır).

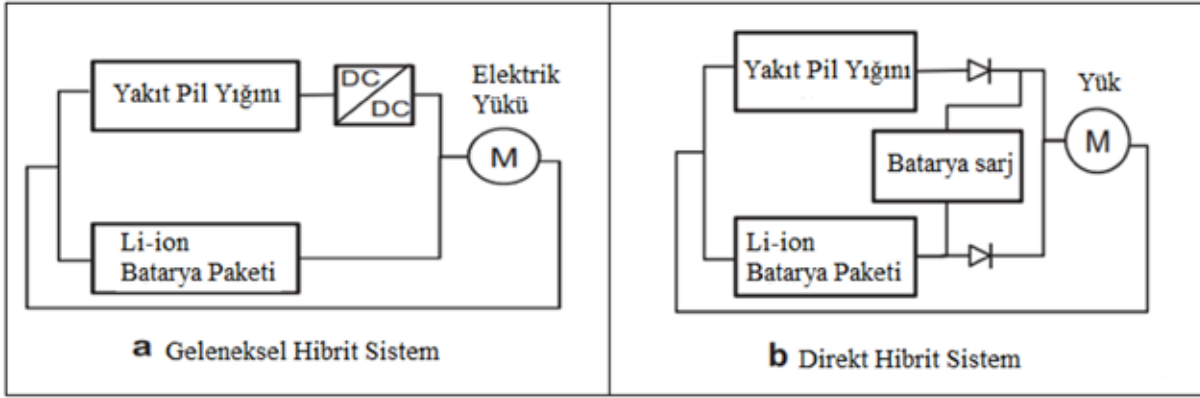
Ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişimini hızlandırma etkisine sahip olan hava taşımacılığı sektörü, giderek insan hayatının da bir parçası haline gelmektedir. Karmaşık mühendislik özelliklerine ve hesaplamalarına rağmen, endüstri üzerinde havacılıkta yoğun çalışmalar hızla gelişmektedir. Son 20 yılda hava taşımacılığı kapasitesini her yıl %4,8 oranında artırmış ve bu da jet itki sistemli uçaklarının sayısını artırmıştır. Hatta, Boeing Mevcut Piyasa Görünümü, 2008 yılına kadar 19.000 olan jet sayısının 2027’de 35.800’e yükseleceğini tahmin etmektedir [63]. Ayrıca havacılık sektörü, tüm ulaşım araçlarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %12’sinden sorumludur ve havacılık CO₂ emisyonlarının yaklaşık %80’i 1500 km’nin üzerindeki uçuşlardan kaynaklanmaktadır. Sadece 2015 yılında tüm dünyada uçuşlar 770 milyon ton CO₂ üretmiştir [14].

4.1.Yakıt Hücreli Hava Araçlarının Temel Yapısı, Avantajları ve Dezavantajları

Ticari havacılık sektörü, yolcu talebinde beklenen bir büyüme ile giderek daha sıkı hale gelen çevresel düzenlemeleri ve emisyon taahhütlerini uzlaştırma konusunda süregelen bir zorlukla karşı karşıyadır. Havacılık uygulamaları için hidrojendeki hareketlenme, hidrojen yakıt hücreli uçaklar için en temelinin ağırlık olduğu teknik zorluklar nedeniyle uzun yıllar atıl kaldıktan sonra yeniden ivme kazanmıştır. Havacılıkta; güç gereksinimi açısından yakıt pilleri, genellikle tahrikten ziyade yalnızca araç içi elektrifikasyon için düşünülmekteydi. Aynı durum uzay araçları için de geçerliydi hatta; NASA geçmişte yakıt hücrelerini uzay aracının elektrikleştirilmesi için kullanmış ve lakin bunu tahrik için kullanmamıştır [23]. Ancak gelişen teknolojinin ve enerji ihtiyacının sonucu olarak, son zamanlarda yakıt hücrelerinin elektrik tahrikinde kullanılması için çok sayıda çalışma/prototip yapılmıştır (Tablo 4.1’de listelenmiştir).

Elektrikli hava araçlarının tahrik sisteminin en belirgin özelliği ne kadar sürede ve ne kadar yükte uçabileceklerini belirleyen kilogram başına watt saat (Wh kg^{-1}) ile tanımlanan enerji yoğunluğudur. Yakıt hücresinin basınçlı hidrojen tankı ile kombinasyonu $800\text{-}1000 \text{ Wh kg}^{-1}$ 'i aşan bir enerji yoğunluğu sağlayabilir. Bununla birlikte, geleneksel lityum iyon bataryalar ise yaklaşık $150\text{-}200 \text{ Wh kg}^{-1}$ enerji yoğunluğu sağlayabilir. Kalkış ve tırmanış sırasında kritik rol oynayan güç yoğunluğu (W kg^{-1}) ise, bataryalarda yakıt hücresine göre daha yüksektir.

Bu nedenle, yakıt hücresi ve bataryanın hibridizasyonu, uçakların tahrik sistemlerinde daha iyi dayanıklılık için genellikle en iyi çözümdür. Yakıt hücresi ve batarya kombinasyonu için birçok farklı yöntem vardır. Bu yöntemler aktif ve pasif hibrit tahrik sistemleri olarak ikiye ayrılabilir. Aktif bir hibrit sistem, her bir güç kaynağının voltajı genellikle dalgalı olduğundan, yakıt hücresi ve depolama cihazı arasındaki güç paylaşımını aktif olarak kontrol etmek için genellikle DC/DC dönüştürücüler kullanır. Pasif hibrit sistem ise, yakıt hücresini ve depolama cihazını güç dönüştürücüler kullanmadan doğrudan DC barasına bağlar. Pasif bir hibrit konfigürasyon, DC/DC dönüştürücülerin olmaması nedeniyle düşük güç kaybı, düşük maliyet ve basit mimari avantajlarına sahiptir; bununla birlikte, yakıt hücresinin ve pilin akım voltaj davranışındaki uyumsuzluğu önlemek için çok sınırlı özel bir çalışma prosedürü gereklidir [64-65]. Şekil 4.2 geleneksel ve direkt hibrit sistemi örneklerini göstermektedir.



Şekil 4.2. Geleneksel ve direkt hibrit sistemleri ([64]'den alınmıştır)

İtki sistemlerinde yakıt hücrelerinin kullanılmasının avantajları şu şekilde özetlenebilir [66]:






- Isıl verim (üretilen ısının uçak içinde bazı görevlerde kullanılması ile),
- Sessiz çalışma ve düşük titreşim (hareketli parça olmadığından),
- Yüksek güvenilirlik (az hareketli parça ve kolay otomasyon),
- Askeri uygulamalara uygunluk,

4.2. Yakıt Hücresi Kullanılan Hava Araçlarının Gelişimi

Bugüne kadar yakıt hücresinin hava araçlarında kullanımı ile ilgili birçok kavramsal çalışma yapılmış ve birçok hava aracı prototipi geliştirilmiştir. Tablo 4.1'de yapılan araştırma prototipi örneklerine ve özelliklerine yer verilmiştir

Tablo 4.1.Yakıt hücresi kullanan hava araçlarının gelişimi [66-67]

Prototip	Prototip adı	Yıl	Yakıt hücresi (üretici) /Yakıt	Uçuş Süresi (saat)	Prototip Özellikleri
	Hornet(İlk yakıt hücreli İHA/ AeroVironment)	2003	PEMYH (Lynntech)/ Hidrojen	0,25 (3 uçuş)	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: SodyumBorohidrit •Kanat açıklığı: 0,381 m •Ağırlık: 0,38 kg •Ortalama yakıt hücresi gücü :10 W
	Global Observer (İlk sıvı hidrojenle çalışan İHA/ AeroVironment)	2005	PEMYH (-)/ Hidrojen	24	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Sıvı hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 15,24 m •Yakıt hücresi gücü: 1,5 kW
	Hy-Fly (FH- Wiesbaden)	2005	PEMYH (Heliocentris)/ Hidrojen	0,025	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı:2 m •Ağırlık: 1,75 kg •Maks. sistem güç çıkışı: 65 W
	SpiderLion (NRL)	2005	PEMYH (Protonex)/ Hidrojen	3,3	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 2,2 m •Ağırlık: 2,5 kg •Maks. yakıt hücresi güç çıkışı: 110 W •Ortalama yakıt hücresi gücü: 85 W
	Georgia Teknoloji Enstitüsü ve Colorado Üniversitesi	2006	PEMYH (BCS)/ Hidrojen	0,75	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: •Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 6,58 m •Ağırlık: 16,4 kg •Yakıt hücresi gücü: 550 W
	Hy-Fish (DRL)	2007	PEMYH (Horizon) / Hidrojen	0,25	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 1 m •Uzunluk: 1,3 m •Ağırlık: 6,1 kg •Maks. hız: 200 km h⁻¹ •Yakıt hücresi gücü:1 kW
	PUMA (AeroVironment)	2007	PEMYH (Protonex)/ Hidrojen	9	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: SodyumBorohidrit •Kanat açıklığı: 2,6 m •Ağırlık: 6,5 kg

Prototip	Prototip adı	Yıl	Yakıt hücresi (üretici) /Yakıt	Uçuş Süresi (saat)	Prototip Özellikleri
	Pterosoar (Cal State LA/Oklahoma StateUniv)	2007	PEMYH (Horizon) / Hidrojen	12	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı(30 MPa) •Kanat açıklığı: 4 m •Uzunluk: 2 m •Ağırlık: 5 kg •Maks. yakıt hücresi gücü: 150 W
	Blendedwing-body (KAIST)	2007	PEMYH (-)/ Hidrojen	10	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Sodyum Borohidrit •Kanat açıklığı: 1,2 m •Ağırlık: 2 m •Maks. yakıt hücresi gücü:25 W
	Dimona (İlk yakıt hücreli insanlı hava aracı/ Boeing)	2008	PEMYH (IntelligentEnergy) / Hidrojen	0,5	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı(35MPa) •Kanat açıklığı: 16,3 m •Maks. kalkış ağırlığı: 860 kg •Maks. uçuş irtifası:1000 m •Maks. seyir hızı:100 km h⁻¹ •Maks. yakıt hücresi gücü: 24 kW
	Endurance (Michigan Üniversitesi)	2008	KOYH (AdaptiveMaterials) / Propan	10,25	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Küçük propan yakıt tankı •Kanat açıklığı: 1,524 m •Ağırlık: 5,3 kg
	Antares DLR-H2 (DLR)	2009	PEMYH (BASF) / Hidrojen	5	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 20 m •Uzunluk: 7,4 m •Maks. ağırlık:875 kg •Maks. uçuş irtifası:2558 m •Maks. yakıt hücresi güç çıkışı: 33 kW •Menzil: 750 km •Maks. hız:176 km h⁻¹
	Boomerang (Aero Systems)	2009	PEMYH (Horizon) / Hidrojen	9	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama:H₂ Hidrit •Kanat açıklığı:2,75 m •Ağırlık: 9 kg •Maks. güç çıkışı: 500W
	Ion Tiger (NRL)	2009	PEMYH (Protonex)/ Hidrojen	26	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı(34.5MPa) •Kanat açıklığı: 5,18 m •Ağırlık: 16,78 kg •Maks. yükleme: 2,25kg •Yakıt hücresi gücü: 550 W

Prototip	Prototip adı	Yıl	Yakıt hücresi (üretici) /Yakıt	Uçuş Süresi (saat)	Prototip Özellikleri
	Rapid 200-FC (ENFICA-FC araştırma projesi)	2010	PEMYH (IntelligentEnergy) / Hidrojen	0,75	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı (35 MPa) •Kanat açıklığı: 10 m •Maks seyir hızı: 150 km h⁻¹ •Total ağırlık: 550kg •Yakıt hücresi gücü: 20 kW
	Stalker XE (Boeing, Lockheed Martin)	2011	KOYH (AdaptiveMaterials) / Propan	8+	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Küçük propan yakıt tankı •Kanat açıklığı: 3,6 m •Maks. kalkış ağırlığı: 10 kg •Maks. uçuş irtifası:4572 m •Maks. hız:72 km h⁻¹
	IonTiger (NRL)	2013	PEMYH (Protonex)/ Hidrojen	48	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Sıvı hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 5,18 m •Ağırlık: 16,78 kg •Maks. yükleme:2,25 kg •Yakıt hücresi gücü: 550 W
	HY4 (DLR)	2016	PEMYH (Hydrogenics) / Hidrojen	-	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 21,36 m •Uzunluk: 7,4 m •Maks. ağırlık: 1,500kg •Maks. hız: 200 km h⁻¹ •Motor güç çıkışı:80 kW •Yakıt hücresi / batarya sürekli güç çıkışı:90 kW (45 kW/45 kW) •Maks. menzil:1500 km
	ScanEagle (Insitu)	2017	PEMYH (Protonex)/ Hidrojen	24	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı •Kanat açıklığı: 3,11 m •Uzunluk:1,55 m •Maks. ağırlık:22 kg •Maks. hız:148 km h⁻¹ •Maks. uçuş irtifası: 5,944 m •Yakıt hücresi güç çıkışı: 1,3 kW
	HyDrone 1550(ilk ticari hidrojenle çalışan drone/ MMC)	2017	PEMYH (-)/ Hidrojen	2,5	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt depolama: Basınçlandırılmış hidrojen tankı(35 MPa/9L) •Standart kalkış ağırlığı: 18,5 kg •Seyir hızı: 0 - 10 m s⁻¹ •Tırmanma hızı: 0 - 2 m s⁻¹ •Uçuş mesafesi:> 90 km •Yakıt hücresi güç çıkışı: 1,8 kW

Birçok çalışma/prototip yakıt hücresi ve bataryanın hibritlendirilmesi üzerinedir. Buna örnek olarak; ENFICA-FC araştırma projesinde, iki koltuklu Rapid 200 uçağının içten yanmalı motoru, elektrikli tahrik sistemi ile değiştirilmiştir. Bu hibrit yakıt hücresi-akü güç sistemi temel olarak aşağıdaki komponentlerden oluşmaktadır [68]:

- Yaklaşık 20-22kW üreten bir yakıt hücresi yığını,
- Kalkışta yaklaşık 20kW üreten piller,
- Yakıt hücresi ve pilleri yöneten DC-DC dönüştürücü sistemi,
- Elektrik motorunu çalıştıran bir DC/AC invertör,
- Bir Uçak Güç Yönetim Birimi ve Dağıtım Kontrolörü (AMU)

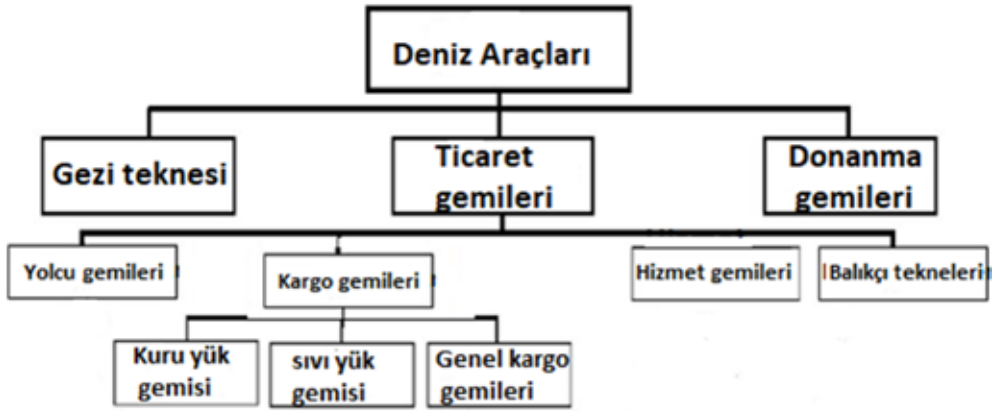
Diğer bir örnekte ise, Eylül 2016'da, dünyanın ilk hidrojen yakıt hücreli dört koltuklu yolcu uçağı HY4, Stuttgart Havalimanı'nda ilk uçuşunu gerçekleştirmiştir. Bu geleceğin elektrikli taksisinde; hidrojen yakıtı, her ikisi de iki gövdede bulunan iki karbon fiber tankta 4.300 PSI ile 5.800 PSI (296,4 – 399,8 Bar) arasındaki bir basınçta depolanır. Maksimum hızı 200 km/s olan bu uçakta yakıt hücresi hidrojeni doğrudan elektriğe dönüştürür ve bu süreçten çıkan tek atık ürün sudur[14].

BÖLÜM 5

DENİZ TAŞITLARINDA YAKIT HÜCRESİ KULLANIMI

Bu bölümde öncelikle deniz yolu taşıtları sınıflandırılmıştır. Daha sonra yakıt hücreli deniz araçlarının temel yapılarına, avantaj ve dezavantajlarına değinilerek yakıt hücresi kullanan deniz taşıtlarının gelişimi listelenmiştir.

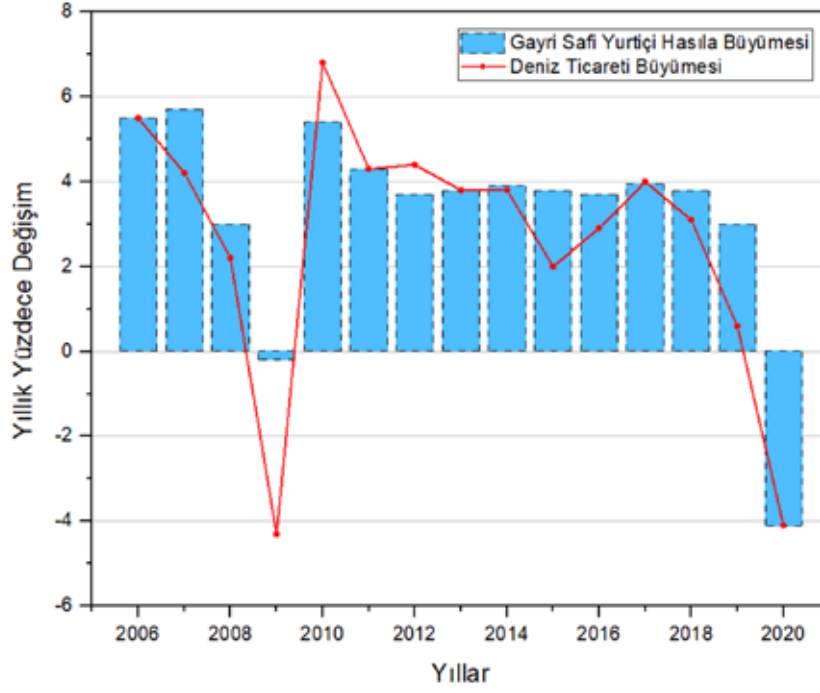
Şekil 4.1 deniz araçları türlerinin sınıflandırmasını içermektedir [69].



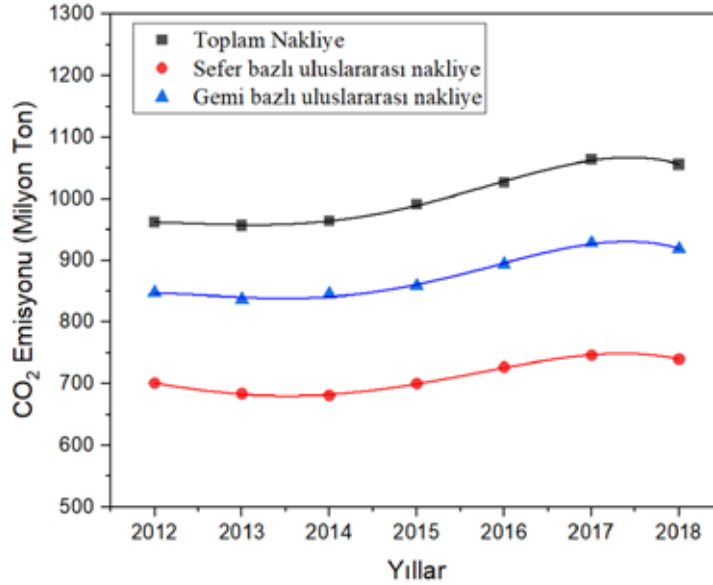
Şekil 5.1 Deniz araçlarının sınıflandırılması [69]

Ticaretin küreselleşmesinde öncü rol oynayan deniz yolu taşımacılığı özellikle büyük hacimli, birim fiyatı ve zaman duyarlılığı düşük yüklerin taşınmasında tercih edilmektedir [3]. UNCTAD'a (Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı) göre, deniz taşımacılığı, kısmen daha düşük maliyetli, daha güvenli ve daha büyük kapasiteye sahip olduğu için, hacim olarak dünya ticaretinin %80'inden fazlasını kapsamaktadır [70]. UNCTAD, Şekil 5.1'de uluslararası deniz ticaretinin gelişimini oluşturmuştur. Bu rakama göre 2008-2009 dünya krizinden sonra pandemi nedeniyle en kötü senaryo 2020 yılında görülmektedir [70-71].

IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) tarafından, toplam deniz taşımacılığının karbondioksit, metan vb. dahil sera gazı emisyonlarının 2012'de 977 milyon tondan 2018'de %9,6 artarak 1.076 milyon tona yükseldiğini bildirilmektedir [70,72]. Şekil 5.2'de, yıllar içinde uluslararası nakliye CO₂ emisyonları artışı göstermektedir. 2019 yılında IMO DCS (Veri toplama sistemi) raporuna göre sadece 5.000 gros ton ve üzeri gemiler 614 milyon ton CO₂ salmışlardır. [73]



Şekil 5.1. Uluslararası deniz ticaretinin gelişimi ([70-71]'den alınmıştır)



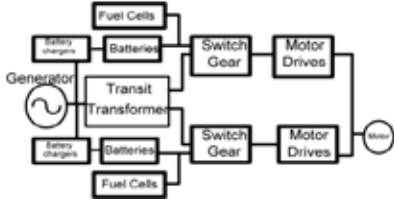
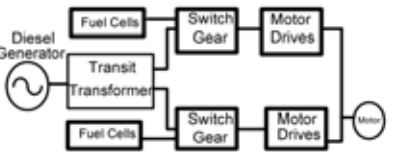
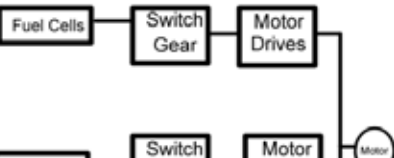
Şekil 5. 2. Toplam nakliye ve sefer bazlı ve gemi bazlı uluslararası nakliye CO₂ emisyonları (milyon ton) ([70,72]'den alınmıştır)

5.1.Yakıt Hücreli Deniz Araçlarının Temel Yapısı, Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt hücreleri gemi uygulamalarında birçok kombinasyonda kullanılabilir. ABD Donanması, bir prototip muhrip olan Gelişmiş Elektrikli Gemi Göstericisini (AESD) işletmektedir. AESD'nin çalışması, bir transformatör aracılığıyla 250 kW'lık bir dizel jeneratör veya alternatif olarak toplam 650 kW güç üreten 12 dizi batarya ile sağlanmıştır. AESD' de güç sistemi üzerinde 3 farklı kombinasyon için fizibilite çalışması yapılmıştır. 1. kombinasyonda, 2 batarya dizisinden 3'ü çıkarılarak yakıt hücreleri eklenmiş; 2. kombinasyonda 12 batarya dizisinin tamamı çıkarılarak yakıt hücreleri eklenmiş ve 3. kombinasyonda tüm güç sistemi yakıt hücreleri ile değiştirilmiştir. Bu kombinasyonların hangisinin daha avantajlı olacağı ilgili çalışmada belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar, avantajları ve

dezavantajları Tablo 5.1’de özetlenmiştir. AESD’nin güç sistemi için hangi kombinasyonun en iyi seçeneğe olduğu değerlendirilirken yayılan emisyonlar, sistemin verimliliği ve kontrol sisteminin karmaşıklığı da dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda en iyi seçeneğin 3. kombinasyon (tüm güç sisteminin yakıt pilleri ile değiştirilmesi) olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [74].

Tablo 5.1. Denizcilik Uygulamalarında üç farklı tipte yakıt hücresi kombinasyonu ve avantajları [70,74].

Kombinasyon	Avantajları	Dezavantajları
 <p>(1) 1. Kombinasyon</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt hücreleri kullanımı ile güç koşullandırma sistemlerinde gerekli güvenin sağlanması. 	<ul style="list-style-type: none"> •Yakıt pillerinin bataryalara paralel bağlanması, yakıt pili akımının doğrudan kontrol edilememesi ve batarya ile yakıt hücresi empedansları arasındaki tutarsızlık gibi bazı zorluklara sahiptir. •3 batarya dizisini çıkararak oluşturulan alan, yakıt hücrelerini ve alt sistemleri barındırmak için yeterli değildir. • Güç sisteminde dizel jeneratör kullanılmaya devam edildiğinden emisyon seviyesi yüksektir. •Verimlilik düşüktür. •Kontrol sistemi karmaşıklığı yüksektir.
 <p>(2) 2. Kombinasyon</p>	<ul style="list-style-type: none"> •batarya ve batarya şarj sistemi yoktur. •Motor tahriki bir dizel jeneratöre veya yakıt hücrelerine bağlıdır. batarya yerine yakıt pilleri kullanılarak, pillerin neden olduğu sınırlı çalışma süresi ve uzun şarj süresi sorununun önüne geçilmiştir. •Kontrol sistemi karmaşıklığı düşüktür. 	<ul style="list-style-type: none"> • Güç sisteminde dizel jeneratör kullanılmaya devam edildiğinden emisyon seviyesi yüksektir. •Akü dizilerinin çıkarılmasıyla oluşturulan alan, yakıt hücrelerini ve alt sistemleri barındırmak için yeterli değildir. •Verimlilik düşüktür.
 <p>(3) 3. Kombinasyon</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Sistemde yenilenebilir enerji kullanılmıştır. •Kontrol sistemi karmaşıklığı düşüktür. •Verimlilik yüksektir. • Bu kombinasyonda güç sistemi son derece güvenlidir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yakıt pili modülleri sistem güç ihtiyacını karşılamak için paralel bağlanır. Bu durumda, yakıt hücresi modüllerine geri enjekte edilecek sirkülasyon akımı olasılığı daha yüksektir.

Deniz araçlarında yakıt hücresi tabanlı sistemlerin temel bariyerlerinden şu şekilde bahsedilebilir [70]:

- Hidrojen yakıt hücreleri doğaya emisyon salmasa da, yakıt hücrelerinde enerji kaynağı olarak kullanılan hidrojeni üretmek için önemli miktarda karbondioksit salınmaktadır. Bu, sıfır emisyonlu yakıt hücrelerinin avantajını neredeyse ortadan kaldırır. Sıfır karbon ayak izine sahip bir tahrik sistemi oluşturmak için elektroliz yoluyla hidrojen üretimini gerçekleştirmek önemlidir.






- Mevcut teknolojinin çözmeye çalıştığı dezavantajlardan biri de hidrojen depolamasıdır. Hidrojen, gaz halindeyken son derece düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu sorunu çözmek için yeni teknoloji fiber kompozit yapılar kullanılmaktadır.

• Denizcilikte kullanımı ile ilgili ana zorluklar şu şekilde özetlenebilir: sermaye ve işletme maliyeti, hidrojen depolama sorunları, yakıt tedariki, teknoloji olgunluğu, güvenlik sorunları vb. Yüksek maliyet ve düşük dayanıklılık açısından, PEM yakıt hücresi elektrokatalizörleri maliyeti büyük ölçüde etkiler. Yakıt hücresi yığınlarının birim fiyatları, geleneksel dizel enerji santrallerinden önemli ölçüde daha pahalıdır. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın (DOE) 2019 yılında yaptığı bir araştırmaya göre, bir PEM yakıt hücresi yığımındaki maliyetin %40'a yakını platin bazlı katalizör katmanlarından gelmektedir.

5.2.Yakıt Hücresi Kullanılan Deniz Araçlarının Gelişimi

Hidrojen FC (yakıt hücresi) tabanlı deniz araçlarının geliştirilmesine ilişkin örnekler Tablo 5.2'de verilmiştir [70].

Tablo 5.2 . Hidrojen FC (yakıt hücresi) tabanlı deniz araçlarının geliştirilmesine ilişkin örnekler[70]

Prototip	Proje Adı / Ortaklar	Yıl	FC Tipi (Yakıt)	FC Kapasitesi (kW)	Açıklama
	RiverCell – Elektra (TU Berlin, BEHALA, DNVGL,Etc)	2015-2016	PEMYH (H ₂)	3(adet)×100	<ul style="list-style-type: none"> •Fizibilite çalışması •Elektra'nın hibrit bir sistemi vardır: <ul style="list-style-type: none"> -3 x 100 kW FC -2 x 200 kW elektrik motoru. - 6 x 125 kg hidrojen tankı (500 bar) •Toplam 2050 kWh nominal kapasiteli Şarj Edilebilir Piller
	ZemShip - Alsterwasser (Proton Motors, GL, Alster Touristik GmbH, Linde Group etc.)	2006-2013	PEMYH (H ₂)	2(adet)×48	<ul style="list-style-type: none"> •100 kW PEMFC sistemi küçük bir yolcu gemisinde test edilmiştir. •ZemShip'in hibrit bir sistemi vardır: <ul style="list-style-type: none"> 2 x48 kW FC Toplam 560V ve 234 kWh kapasiteli 7 adet kurşun jel akü paketi 350 bar basınçta 50 kg hidrojen içeren 12 depolama tankı 100 kW elektrik motoru
	Nemo H ₂ (Rederij Lovers etc)	2012-present	PEMYH (H ₂)	60-70	<ul style="list-style-type: none"> •Nemo H2 hibrit bir sisteme sahiptir: <ul style="list-style-type: none"> 30 ila 50 kW akü sistemi 60-70 kW FC 350 bar basınçta 24 kg H2 içeren 6 adet depolama tankı 30-50kW pil
	Hornblower Hybrid (Hornblower)	2012-present	PEMYH (H ₂)	32	<ul style="list-style-type: none"> •Hibrit feribot: dizel jeneratör, piller, PV, rüzgar ve FC.
	Hydrogenesis (Bristol Boat Trips etc)	2012-present	PEMYH (H ₂)	12	<ul style="list-style-type: none"> • 12 yolcu vapuru • Bristol'de faaliyet gösteren küçük yolcu gemisi

Prototip	Proje Adı / Ortaklar	Yıl	FC Tipi (Yakıt)	FC Kapasitesi (kW)	Açıklama
	MF Vågen (CMR Prototech, ARENA-Project)	2010	PEMYH (H ₂)	12	• MF Vågen'in sahip olduğu özellikler: 12 kW FC Metal hidrit H2 depolama (2-3 kg) 25 kWh Li-ion piller 10 kW DC motor
	Class 212A/214 Submarines (CMR Prototech, ARENA-Project, ThyssenKrupp Marine Systems, Siemens)	2003 – present	PEMYH (H ₂)	306, Modül başına 30-50 (212A), modül başına 120 (214)	•Dizel motor ve yakıt hücresi kullanan hibrit tahrik
	SF-BREEZE (Sandia National Lab., Red and White Fleet)	2015 – present	PEMYH (Liquid H ₂)	41(adet)×120	•SF-BREEZE'de şunlar bulunur: 41×120 kW FC 2,5 MW'lık iki motor 1200 kg LH2'li Tip C depolama tankı (tek tip, basınçlı kap)
	Anygreen Türkiye	2025	Güneş, Rüzgar ve Hidrojen Enerjisi	-	-
	TGC Piri Reis (S-330) Tip:214	2021 – İlk denize inme	PEMYH	320 hücreli BZ120 PEM	2x 120= 240 kW güç 7 adet metal hidrid Hidrojen tankı; toplamda 2,3 Ton H2

Yakıt Hücreleri ve Hidrojen Ortak Girişimi (FCH JU), karbon-temiz bir enerji sistemi elde etmek için kullanılan yakıt hücresi ve hidrojen enerjisi teknolojilerinin pazara girişi için geliştirmeleri destekleyen benzersiz bir kamu özel ortaklığıdır. Horizon 2020, 2014-2020 yılları arasında tüm FCH JU projelerinin finanse edildiği Çerçeve Programıdır. 133 Horizon 2020 projesinden 5'i deniz uygulamalarını kapsamaktadır. Bu projelerden biri de 7 milyon avro bütçeli FLAGSHIP'tir. FLAGSHIPS (2018) projesi, ticari olarak işletilen iki hidrojen yakıt hücreli gemiyi yeni bir seviyeye taşıyor. Projede toplam 1,4 MW yerleşik yakıt hücresi gücü kurulacak ve her iki gemi de yerinde üretilen hidrojeni yenilenebilir elektrikle çalışan elektrolizörlerle çalıştıracak. Sevk sistemine ilişkin bilgiler aşağıdaki gibidir [70]:

- H₂ yakıt tüketimi: 460 kg/gün
- H₂ depolama: 600 kg kapasite ile 250 bar gaz
 - * Güç sistemi: 3x 200 kW PEMFC modülü
 - * Planlanan pil kapasitesi 0-500 kWh
 - * Biyodizel jeneratör yedek gücü
 - * 199 yolcu ve 60 araba/6 kamyon için planlanan kapasite.

Türkiye'de ise CNA grup, Türk Mühendislerle birlikte 'Yeşil Hidrojen' ile çalışacak AYN GREEN isimli gemiyi tasarlamışlardır. 2025 yılında suya indirilmesi planlanan ve 50 milyon euro yatırım harcanan gemi ile Türkiye'de önemli başarılar imza atılması beklenmektedir. Gemilerde kullanılan ve deniz yaşamını olumsuz etkileyen asbest de AYN Green' de olmayacak ve geminin tasarımının Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2050 kriterlerinin üzerinde olduğu belirtilmektedir [75].

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Hidrojenin araştırma ve geliştirmeden ticari gerçekliğe geçişinin zorluğu büyük ölçüde ekonomi, altyapı ve teknolojik olgunlukla ilgilidir. Son yıllarda taşımacılıkta ticari uygulamalara sahip ilk hidrojen yakıt hücresi prototipleri, teknolojinin uygulanabilir ancak geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Her uygulama alanı için karbon emisyon hedefleri belirlendiğinden, hidrojen kaynağının yeşil olması ve yenilenebilir enerji ile üretilmesi gerekmektedir.

Temiz hidrojenin yanı sıra, tüketicilerin arabalara ve taksilere, kamyonlara, gemilere, trenlere ve uçaklara yakıt ikmalinde hidrojene erişebilmeleri için altyapının ve dolum istasyonlarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Ayrıca, yakıt hücrelerinin maliyeti, her geçen gün daha da düşüşte olsa da şu anda hala yüksektir. Bu finansal durumunda malzeme iyileştirmeleri ve dâhi üretim süreci optimizasyonu yoluyla azaltılması gerekmektedir.

Daha yüksek amortisman döngüleri, daha büyük maliyet düşüşleri ve daha fazla araştırma & geliştirme nedeniyle, denizcilik endüstrisi projeleri içinse 2025-2030 yıllarında ticari uygulanabilirlik beklemektedir. Kısa mesafeli uçak ve hidrojen bazlı sentetik gazyağı ticari olarak uygulanabilir halde ise de, uzun menzilli uçuşlar ve havacılık uygulamalarında ki gelişim süreci içinde deniz sektöründe olduğu gibi; 2025-2030 yılları arası önem arz etmektedir.

Geçmiş çalışmalar ve geleceğe yönelik tahminler sonucunda; yirmi yıl içinde yakıt hücreli elektrikli araçlara (kara, hava ve deniz) talep artacak ve maliyetler daha ucuz olacak; daha fazla menzile ve daha çok tercih edilen statüye sahip olacaklardır.

Gelecek perspektif çalışmalarında; 2025-2035 yılları arasında, çevre dostu ve değerli fiyat performans puanları ile yakıt hücreli elektrikli araçların; ulaşım sektöründe yerini ve önemini artıracığı ve “kıymetli zamanları” nı yaşayacakları değerlendirilmektedir.

Ulaşım sektöründe yakıt hücreli elektrikli araçlar ile ilgili bundan sonraki çalışmalar ve geliştirilecek konu başlıkları şu şekilde belirtilebilir;

- ✓ *Ticarileştirme,*
- ✓ *Hücre ve yoğunluk ömrü,*
- ✓ *Gelişmiş soğuk çalıştırma performansı,*
- ✓ *Yakıt depolama cihazlarının ve membran malzemelerinin iyileştirilmesi,*
- ✓ *Güç/ağırlık oranlarının geliştirilmesi için çalışmalar ve hafifleştirme;*
- ✓ *Tüm yakıt hücreli elektrikli araçlar için standartlaşma,*
- ✓ *Etkin tanıtım ve bilgilendirme programları*
- ✓ *Nitelikli uygulayıcılar ile gelişen sektörleşme*

KAYNAKLAR

1. Energy statistics - an overview, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
2. İklim ve Enerji Krizi İçin Sürdürülebilir ve Adil Bir Dönüşüm, <https://www.ekoyapidergisi.org/iklim-ve-enerji-krizi-icin-surdurulebilir-ve-adil-bir-donusum> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
3. <https://erf.be/statistics/freight-transport-2020/>
4. Lojistik sektörü raporu 2021, utikad, <https://www.utikad.org.tr/images/HizmetRapor/utikadlojistiksektoruraporu2021-1654.pdf>, [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
5. Annual transportation sector carbon dioxide emissions worldwide from 1970 to 2020 ; <https://www.statista.com/statistics/1291615/carbon-dioxide-emissions-transport-sector-worldwide/> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
6. Ulaştırma Türüne Göre Seragazı Emisyonu , <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790>, [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
7. Almost 29 transport workers per 1 000 people in the EU , <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20210923-2> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
8. Use of energy explained, <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
9. Özdemir, Z. Ö., & Mutlubaş, H. (2019). Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri. Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences JONAS, 2(1), 16-34.
10. Şenaktaş, B. (2005). Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
11. Şenel, K. (2007). Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı (Master's thesis, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü).
12. Avcıoğlu, A., Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Teknolojileri Dersi 14 , Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü,2017
13. Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. Renewable and sustainable energy reviews, 32, 810-853.
14. Sürer, M. G., & Arat, H. T. (2018). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. European Mechanical Science, 2(1), 20-30.
15. Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International journal of hydrogen energy*, 40(34), 11094-11111.
16. Carrette, L., Friedrich, K. A., & Stimming, U. (2001). Fuel cells-fundamentals and applications. Fuel cells, 1.
17. Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. Renewable and sustainable energy reviews, 13(9), 2309-2322.
18. What is Hydrogen Energy? History, Future, Uses, Pros and Cons, <https://indiaenergyportal.org/hydrogen-energy/> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
19. Ortiz-Rivera, E. I., Reyes-Hernandez, A. L., & Febo, R. A. (2007, August). Understanding the history of fuel cells. In *2007 IEEE conference on the history of electric power* (pp. 117-122). IEEE.
20. Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Thomas, R. W., Mavris, D. N., & Parekh, D. E. (2006). Test results for a fuel cell-powered demonstration aircraft (No. 2006-01-3092). SAE Technical Paper.DOI:10.4271/2006-01-3092.
21. İpek Çağlayan; 2019; Pd-Zn kaplı bakır köpük kullanımının doğrudan borhidrür yakıt pili performansına etkisinin incelenmesi, Master tezi, Kocaeli Üniversitesi
22. Sürer, M. G. (2020). *Tek koltuklu bir uçak için kavramsal hibrit itki sistemi tasarımı ve uçak performansına etkileri* (Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği)

Anabilim Dalı).

23. Prof. Dr. Ayten Onurbaş Avcuoğlu Ders notları, 2017, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/18484/mod_resource/content/0/YEN%C4%B0LENEB%C4%B0L%C4%B0R%20ENERJ%C4%B0%20KAYNAKLARI%20VE%20TEKNOLOJ%C4%B0LER%C4%B0%2014.pdf [Son Erişim Tarihi:01.02.2023]
24. Lucia, U. (2014). Overview on fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 164-169.
25. Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., David, W. I., & Brandon, N. P. (2008). Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future. *Energy policy*, 36(12), 4356-4362.
26. Perry, M. L., & Fuller, T. F. (2002). A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century. *Journal of the electrochemical society*, 149(7), S59.
27. Fuel Cell Market Size By Product (PEMFC, DMFC, SOFC, PAFC & AFC, MCFC), By Application (Stationary, Portable, Transport), COVID-19 Impact Analysis, Regional Outlook, Application Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2022 – 2030, <https://www.gminsights.com/industry-analysis/fuel-cell-market>, [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
28. Acumentrics RP series of propane, natural gas SOFCs available in US, Fuel Cells Bulletin, Volume 2015, Issue 12, 2015, Page 10,
29. Alteryg's PEM Fuel Cells, Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee (HTAC), May 9-10, 2012, https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_may2012_alteryg.pdf, [Son erişim Tarihi: 04.11.2022]
30. Maritime Server, Bloom Energy, <https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/bloom-energy-marine-energy-server.pdf>, [Son erişim Tarihi: 04.11.2022]
31. Swider-Lyons, Karen & Stroman, Richard & Page, Gregory & Mackrell, Joseph & Rodgers, Joseph & Schuette, Michael. (2010). The Ion Tiger Fuel Cell Unmanned Air Vehicle. 561-563.
32. Matsunaga, M., Fukushima, T., & Ojima, K. (2009). Powertrain system of Honda FCX Clarity fuel cell vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, 3(4), 820-829.
33. BMW GROUP PRODUCES FUEL CELL SYSTEMS, <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2022/FuelCell.html>, [Son erişim Tarihi: 04.11.2022]
34. Proton Motor fuel cell system, <https://www.proton-motor.de/en/products/fuel-cell-systems/>, [Son erişim Tarihi: 04.11.2022]
35. Ballard, <https://www.proton-motor.de/en/products/fuel-cell-systems/>, [Son erişim Tarihi: 04.11.2022]
36. Horizon Fuel Cell Technologies, https://en.wikipedia.org/wiki/Horizon_Fuel_Cell_Technologies, [Son erişim Tarihi: 04.11.2022]
37. Federai Hihgway administration , Linking FHWA and NHTSA Vehicle Types and Deciphering Various Truck Weight Data, <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/pubs/pl021029.pdf> [Son Erişim Tarihi:06.11.2022]
38. Ulaştırma Hizmetleri Alanı ,Kara Yolu Taşımacılığı, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kara%20Yolu%20Ta%C5%9F%C4%B1mac%C4%B1%C4%B1%C4%9F%C4%B1.pdf, [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
39. Gürz, M. (2017). *Hidrojen yakıt hücreleri ve otomotiv sektörü için pem yakıt hücresinin uygulanabilirliğine yönelik analiz* (Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
40. Oral, E., & Çelik, V. (2005). Hidrojen yakıtlı motor teknolojisi. *Mühendis ve makina*, 46(540), 30-40.
41. Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F. S., Saleman, A. R., & Islam, M. R. (2012). An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5511-5528.
42. Tanç, B., Arat, H. T., Baltacıoğlu, E., & Aydın, K. (2019). Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 10120-10128.
43. İnci, M., Büyük, M., Demir, M. H., & İlbey, G. (2021). A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110648.

44. FCX-V4 Specifications, <https://hondanews.com/en-US/honda-automobiles/releases/release-462b8f6dfbc1550b2344cb004c34c789-fcx-v4-specifications>, [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
45. ALL-NEW X-TRAIL FCV APPROVED FOR ROAD TESTING, LEASING IN JAPAN, <https://global.nissannews.com/en/releases/051226-02-e> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
46. Honda FCX Clarity, <https://hondanews.com/en-US/honda-automobiles/releases/release-85c874ea865a3729ca0d0a004c34bdb4-honda-fcx-clarity-main-specifications> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
47. Mercedes-Benz B F-Cell, <https://auta5p.eu/lang/en/katalog/auto.php?idf=Mercedes-Benz-B-F-Cell-23844> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
48. ix35-fuel-cell-ebrochure, <https://www.hyundai.com/content/dam/hyundai/ww/en/images/footer/downloads/eco/e-brochure/ix35-fuel-cell-ebrochure-2015.pdf> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
49. TOYOTA MIRAI TECHNICAL SPECIFICATIONS, <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/220203M-Mirai-Tech-Spec.pdf> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
50. e-Bio Fuel-Cell, <https://www.bio.org/sites/default/files/legacy/bioorg/docs/1030AM-Mikio%20Matsumoto.pdf> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
51. Fuel Cells Hydrogen Truck, https://fuelcelltrucks.eu/wp-content/uploads/2021/03/roland_berger_fuel_cells_hydrogen_trucks.pdf , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
52. Global overview Fuel cell powered electric trucks, <https://fuelcelltrucks.eu/documents/> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
53. 2021 Clarity Fuel Cell Specifications & Features , <https://hondanews.com/en-US/honda-automobiles/releases/release-4f88c507e72a4e7630685979cb04f2cb-2021-clarity-fuel-cell-specifications-features> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
54. Hyundai NEXO, <https://h2.live/en/fuelcell-cars/hyundai-nexo/> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
55. Roland Gumpert, <https://www.rolandgumpert.com/en/> , [Son erişim Tarihi: 22.04.2023]
56. Aso, S., Kizaki, M., & Nonobe, Y. (2007, April). Development of fuel cell hybrid vehicles in Toyota. In *2007 Power Conversion Conference-Nagoya* (pp. 1606-1611). IEEE.
57. Nonobe, Y. (2017). Development of the fuel cell vehicle mirai. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 12(1), 5-9.
58. www.toyota.com , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
59. Samsun, R. C., Rex, M., Stolten, D., & Antoni, L. (2021). *Deployment status of fuel cells in road transport: 2021 update* (No. FZJ-2021-03033). Elektrochemische Verfahrenstechnik.
60. Hydrogen Fueling Stations Infrastructure, <http://fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/fsec-cr-1986-14.pdf> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
61. hydrogen station, https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_station#cite_note-3 , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
62. Bouabdallah, S., Murrieri, P., & Siegwart, R. (2004, April). Design and control of an indoor micro quadrotor. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004* (Vol. 5, pp. 4393-4398). IEEE.
63. Sürer, M. G., & Arat, H. T. (2018). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. *European Mechanical Science*, 2(1), 20-30.
64. Nishizawa, A., Kallo, J., Garrot, O., & Weiss-Ungethüm, J. (2013). Fuel cell and Li-ion battery direct hybridization system for aircraft applications. *Journal of Power Sources*, 222, 294-300.
65. Arat, H. T., Sürer, M. G., Gökpinar, S., & Aydın, K. (2020). Conceptual design analysis for a lightweight aircraft with a fuel cell hybrid propulsion system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-15.
66. Sürer, M. G. (2020). *Tek koltuklu bir uçak için kavramsal hibrit itki sistemi tasarımı ve uçak performansına etkileri* (Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).

67. Gong, A., & Verstraete, D. (2017). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. *International journal of hydrogen energy*, 42(33), 21311-21333.
68. Innocenti, M., Pollini, L., Mati, R., & Sani, L. (2009). Design of an all-electric propulsion system and control management for a general aviation aircraft. In *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference* (p. 5932).
69. Types of ships, <https://en.ppt-online.org/225730> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
70. Sürer, M. G., & Arat, H. T. (2022). Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45), 19865-19875.
71. UNCTAD. Review of maritime transport 2020. United Nations, Geneva; 2020., https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
72. IMO. Fourth IMO greenhouse gas study 2020 executive summary. 2020., <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> , [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
73. Shipping's 'big three' account for almost 80% of CO2 emissions. <https://loydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1136035/Shipings-big-three-account-for-almost-80-of-CO2-emissions> [Son Erişim Tarihi:25.09.2022]
74. Luckose, L., Hess, H. L., & Johnson, B. K. (2009, April). Fuel cell propulsion system for marine applications. In *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium* (pp. 574-580). IEEE
75. YENİ NESİL HİDROJEN GEMİ ÇAĞI BAŞLIYOR, <https://www.netahaber.com/yeni-nesil-hidrojen-gemi-cagi-basliyor/> [Son Erişim Tarihi:22.04.2023]
76. Scopus, 2023. <https://www.scopus.com/> [Erişim tarihi: 01.01.2023]
77. Karayolları Trafik Yönetmeliği <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=8182&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> [Son Erişim Tarihi:22.04.2023]
78. DIŞKAYA, S. K. (2017). Türkiye'nin enerji güvenliğinde yenilenebilir enerji etkisinin politik ekonomi perspektifi. *Marmara Üniversitesi Siyasal Bilimler Dergisi*, 5(2), 129-150.

ULAŞIM SEKTÖRÜ İÇİN HİDROJEN İLE ÇALIŞAN YAKIT HÜCRELİ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

ISBN: 978-605-70717-4-3

