

Bahattin TANÇ



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOKTORA
TEZİ**

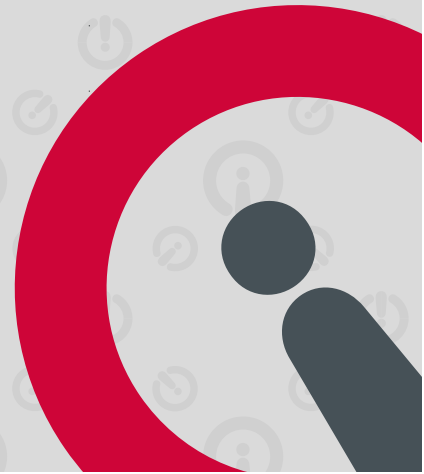
**HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ HİBRİT
ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN DESTEK
BATARYASININ ENERJİ DAĞILIMI VE
ARAÇ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ANALİZİ**

Bahattin TANÇ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

OCAK 2019

OCAK 2019





**HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN
DESTEK BATARYASININ ENERJİ DAĞILIMI VE ARAÇ PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ANALİZİ**

Bahattin TANÇ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

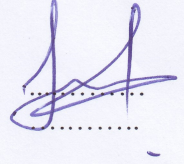
OCAK 2019

Bahattin TANÇ tarafından hazırlanan “HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN DESTEK BATARYASININ ENERJİ DAĞILIMI VE ARAÇ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

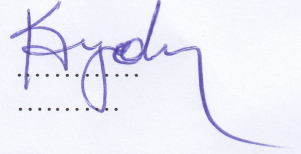
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Başkan: Prof. Dr. Kadir AYDIN

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Otomotiv Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi)

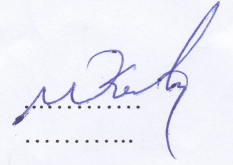
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Üye: Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

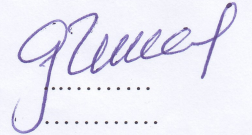
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Üye: Doç. Dr. Gökhan TÜCCAR

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Otomotiv Anabilim Dalı, Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)

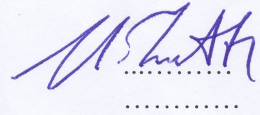
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Turan ARAT

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Tez Savunma Tarihi: 22/01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Folga DEPCI
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

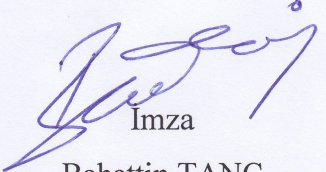


ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



İmza

Bahattin TANÇ

22/01/2019

HİDROJEN YAKIT HÜCRELİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ İÇİN DESTEK
BATARYASININ ENERJİ DAĞILIMI VE ARAÇ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Bahattin TANÇ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2019

ÖZET

Teknolojinin gün geçtikçe hızla ilerlemesine ve akıllandırılması ile birlikte otomotiv endüstrisi de kabuk değiştirmekte ve yenilenmektedir. Artan emisyon salınımları ve azalan sıvı yakıt rezervleri; üreticileri ve sektör bireylerini şiddetle alternatif enerji ve tahrik çözümlerini göz önünde bulundurmaya itmiştir.

Her ne kadar elektrikli araçlar sürüş esnasında sıfır emisyon salınımı gerçekleştirirler de, kullanılacak olan elektrik; santrallerden fosil kaynaklar kullanılarak elde edilmektedir. Bu durum göze alındığında, elektrik üretiminin en az emisyon salınımı ile elde edilebileceği sistemler otomotiv endüstrisinde kullanılmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Hidrojen; kimyasal yanma reaksiyonları sonucunda sadece su buharı çıkaran ve dünyadaki en önemli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden, hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt hücreli elektrikli araçlar sektörde artan trendini devam ettirmektedir. Çalışan her sistemin enerji analizinin yapılması ve verimliliğinin belirlenmesi özellikle makine mühendisliği alanında büyük önem arz etmektedir.

Son yıllarda, gerek maliyet gerekse zamandan tasarruf etme amacı ile simülasyon programları tüm mühendislik birimlerince aktif şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yakıt hücreli elektrikli araç ile yakıt hücreli hibrit elektrikli araç ikilisi; performans ve enerji dağılımı perspektifinde karşılaştırmalı olarak AVL Cruise simülasyon programı ile irdelenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda, WLTP sürüş çevrimine göre; yakıt hücreli hibrit elektrik araç, yakıt hücreli elektrikli araca göre enerji tüketiminde %8, hidrojen tüketiminde ise %35 oranlarında daha tercih edilebilir ve efektif sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler : Yakıt hücreli elektrikli araçlar, alternatif yakıtlar, Enerji verimliliği, Hidrojen

Sayfa Adedi : 103

Danışman : Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

ANALYSIS OF THE SUPPORT BATTERY EFFECT ON ENERGY DISTRIBUTION AND
VEHICLE PERFORMANCE OF THE HYDROGEN FUEL CELL HYBRID ELECTRIC
VEHICLE

(Ph. D. Thesis)

Bahattin TANÇ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

January 2019

ABSTRACT

With the rapid progress and wisdom of technology, the automotive industry is changing and renewing the crust. Increased emissions and reduced liquid fuel reserves; it has strongly encouraged producers and industry members to consider alternative energy and propulsion solutions.

Although electric vehicles have zero emission emissions while on-driving, electricity is handled from fossil resources on power plants. When this situation is taken into consideration, the systems where the electricity production can be achieved with the emulation of the least emissions are being researched for the use in the automotive industry.

Hydrogen is the most important energy sources in the world that produces only water vapor as a result of chemical combustion reaction. Therefore, fuel cell electric vehicles, which use hydrogen as fuel, continue its growing trend in the sector. Energy analysis of each working system and determination of its efficiency are especially important in the field of mechanical engineering.

In recent years, simulation programs have been used actively by all engineering units in order to save time and cost. In this study, fuel cell electric vehicle and fuel cell hybrid electric vehicle pair; were compared in the perspective of performance and energy distribution with AVL Cruise simulation program.

As a result of the study, according to WLTP driving cycle, fuel cell hybrid electric vehicle has given more preferable and effective results rather than fuel cell electric vehicle in terms of energy consumption and hydrogen consumption with 8% and 35%, respectively.

Key Words : Fuel cell electric vehicle, Alternative fuels, Energy efficiency, Hydrogen
Page Number : 103
Supervisor : Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında, büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle bana destek olan, yoğun akademik görevlerine rağmen her fırsatta zaman ve ilgisini esirgemeyen, yol gösteren ve bilimsel çalışmamda bana yardımcı olan tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU' na en derin saygılarımı ve minnettarlığımı iletmek isterim.

Çalışmam sırasında değerli görüş katkı ve bilgilerini esirgemeyen, bir hocadan çok bir ağabey sıcaklığıyla kıymetli zamanından ve tecrübelerinden yararlandığım, sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Turan ARAT'a ve ailesine sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmamın büyük bir bölümünde hiç yanımdan ayrılmadan, bitmez tükenmez enerjileriyle bana çalışma azmi veren değerli bölüm hocalarım başta bölüm başkanım Prof. Dr. Ahmet YAPICI' ya olmak üzere, Prof. Dr. Ali KOÇ, Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ, Dr. Öğr. Üyesi Semr GÖKPINAR, Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin YAĞLI'ya şükranlarımı sunuyorum.

Tezin bu hale gelmesinde görüş ve bilgilerini esirgemeyen sayın Mekatronik Mühendisliği Bölümü hocalarım, Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kaan BALTACIOĞLU'na ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında kıymetli zamanlarını ve fikirleri ile desteklerini esirgemeyen jüri üyeleri; Prof. Dr. Kadir AYDIN, Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN ve Doç. Dr. Gökhan TÜCCAR'a teşekkür ediyorum.

Ayrıca tezin düzenlenmesi ve kontrolü aşamasında desteklerini ve önerilerini paylaşmaktan çekinmeyen İSTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü Prof. Dr. Tolga DEPÇİ ve Müdür Yardımcısı Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Hakan DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın her aşamasında bana destek olan babam Yücel TANÇ'a, annem Emiş TANÇ'a ve kardeşim Ali Buğra TANÇ'a bu çalışmanın onurunun ve bana ait her türlü hakkının kendilerine ait olduğunu söylemek istiyorum.

Tez çalışması süresince her türlü desteğini ve anlayışını benden esirgemeyen canım eşim Tuğba TANÇ'a en derin duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın ülkemize yararlı olmasını temenni ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Araçlar için Alternatif Enerjiler	2
1.1.1. Geleneksel yakıt	2
1.1.2. Elektrik	2
1.1.3. Biyoyakıtlar	4
1.2.4. Sıkıştırılmış Hava	7
1.2.5. Doğal Gaz.....	9
1.2.6. Hidrojen.....	11
1.2.7. Sıvılaştırılmış petrol gazı.....	15
1.2. Elektrikli ve Yakıt Hücreli Araçlar	16
1.2.1. Yakıt Hücreleri	16
1.2.2. Yakıt Hücreleri Tipleri	17
1.2.3. Hidrojen yakıtlı araçlar	20
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. Materyal	36
3.1.1. Araçlarda kullanılan simülasyon programları	37

3.1.2. AVL programı	39
3.2. Yöntem.....	45
3.2.1. AVL cruise programındaki YHEA bileşenler	45
3.2.2. Sürüş çevrimi.....	51
3.2.3. Sankey Diyagramı	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	53
4.1. Yakıt Hücreli Elektrikli Aracın Performans Sonuçları	53
4.2. Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Aracın Performans Sonuçları	57
4.3. Parametrik Enerji Dağılım ve Analiz Karşılaştırması.....	63
5. MALİYET VE VERİMLİLİK ANALİZLERİ	86
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Biyoyakıtların sınıflandırılması	6
Çizelge 1.2. Basınçlı Hava Aracı Performansı (Papson, 2010)	9
Çizelge 1.3. Karayolu yakıtları için perakende fiyatları (Nijboer, 2010)	11
Çizelge 1.4. Kullanım hidrojen veya benzin arasındaki araç performans karşılaştırması (Hyundai, 2015; Toyota, 2015)	14
Çizelge 1.5. LPG emisyonlarının diğer yakıtla karşılaştırması (g/km) (Leung, 2008)...	15
Çizelge 1.6. Yakıt Hücre Tipleri	17
Çizelge 4.1. YHEA sankey analiz değerleri ve yüzdece dağılımları	64
Çizelge 4.2. FCHEA sankey analiz değerleri ve yüzdece dağılımları	65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Hibrit elektrikli aracın güç aktarım organları	3
Şekil 1.2. Biyoyakıt yaşam döngüsü (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, 2015).....	4
Şekil 1.3. Basınçlı Hava Motorunun Tahrik Mekanizması (Szablowski ve Milewski, 2011).....	8
Şekil 1.4. Doğal gazlı aracın depolama tankı (Gigaom, 2015).....	10
Şekil 1.5. Mercedes-Benz yakıt hücresi aracı F600 tahrik zinciri (Diseno, 2014)	12
Şekil 1.6. Fotovoltaik hidrojen üretim sistemi (Kampman, 2013)	13
Şekil 1.6. Yakıt Hücresi Çalışma Diyagramı (Hayre, Cha, Colella, Prinz, 2016).....	16
Şekil 1.7. 1970 yılında K. Kordesh tarafından yaptırılan kamuya açık yollarda hidrojenle çalışan yakıt hücresi yolcu aracı	20
Şekil 1.8. Geleneksel bir ICE aracının şematik gösterimi	22
Şekil 1.9. Bir yakıt hücresi aracının şematik gösterimi	23
Şekil 2.1. ICE, HEA ve YHEAs WTW verimlilikleri (Fernandez ve diğerleri, 2018).	31
Şekil 3.1. ADVISOR (a) ve FASTSim (b) Arayüzü örneği (NREL, 2018)	38
Şekil 3.2. Siemens PLM arayüz örneği (Siemens, 2018)	39
Şekil 3.3. Opal-RT arayüzü (OPAL, 2018)	39
Şekil 3.4. AVL Cruise arayüzü (AVL, 2017)	40
Şekil 3.5. Bağlantı ve haberleşme birimleri sayfa örneği (AVL, 2017)	41
Şekil 3.6. İçten yanmalı motor karakteristik eğrisi ve elektrik motorunun verim çizimi (AVL,2014)	42
Şekil 3.9. Model YHEA'nin elektrik motorunun tork, hız ve mekanik güç grafiği (AVL, 2017)	44
Şekil 3.10. Örnek model YHEA'nin genel sonuçlar tablosu (AVL, 2017)	45
Şekil 3.11. Sistemde yakıt hücresinin gösterimi	46

Şekil	Sayfa
Şekil 3.12. Sistemde elektrik motorunun gösterimi.....	49
Şekil 3.13. Sistemde traksiyon baterisinin gösterimi.....	50
Şekil 3.14. WLTP sürüş çevrimi.....	52
Şekil 3.15. Örnek Sankey Diyagramı	52
Şekil 4.1. Yakıt hücreli elektrik aracın DC-DC dönüştürücü güç giriş çıkış grafiği.....	54
Şekil 4.2. Yakıt hücreli elektrik aracın DC-DC dönüştürücü akım ve voltaj grafiği.....	55
Şekil 4.4. Yakıt hücreli elektrik aracın yakıt hücresi oksijen, hidrojen ve su kütlesi grafiği	56
Şekil 4.5. Yakıt hücreli elektrik aracın elektrik tüketim grafiği	57
Şekil 4.6. Yakıt hücreli hibrit aracın batarya voltaj, akım, şarj ve SOC değerleri grafiği	58
Şekil 4.7. Yakıt hücreli hibrit aracın batarya giriş/çıkış enerji değerleri grafiği	59
Şekil 4.8. Yakıt hücreli hibrit aracın DC-DC dönüştürücü güç giriş çıkış grafiği.....	60
Şekil 4.9. Yakıt hücreli hibrit aracın DC-DC dönüştürücü akım ve voltaj grafiği	60
Şekil 4.10. Yakıt hücreli hibrit aracın elektrik motor tork ve hız grafiği	61
Şekil 4.11. Yakıt hücreli hibrit aracın yakıt hücresi oksijen, hidrojen ve su kütlesi grafiği	62
Şekil 4.12. Yakıt hücreli hibrit aracın elektrik tüketim grafiği.....	62
Şekil 4.14. Enerji dağılım grafiği 0:33 dakika.....	68
Şekil 4.15. Enerji dağılım grafiği 0:49 dakika.....	69
Şekil 4.16. Enerji dağılım grafiği 7:41 dakika.....	71
Şekil 4.17. Enerji dağılım grafiği 13:13 dakika.....	72
Şekil 4.18. Enerji dağılım grafiği 15:00 dakika.....	74
Şekil 4.19. Enerji dağılım grafiği 17:43 dakika.....	75
Şekil 4.20. Enerji dağılım grafiği 19:46 dakika.....	77
Şekil 4.21. Enerji dağılım grafiği 24:36 dakika.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. Enerji dağılım grafiği 26:26 dakika.....	80
Şekil 4.23. Enerji dağılım grafiği 27:50 dakika.....	81
Şekil 4.24. Enerji dağılım grafiği 28:45 dakika.....	83
Şekil 4.25. Enerji dağılım grafiği 30:00 dakika.....	84
Şekil 5.1. Destek Bataryası	86
Şekil 5.2. DC/DC Dönüştürücü	87



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

H₂O

Su

Ppm

Milyonda bir birime verilen isim

Kısaltmalar

Açıklamalar

YHEA

Yakıt hücreli elektrikli araçlar

BEA

Bataryalı elektrikli araçlar

YHEA

Yakıt hücreli hibrit elektrikli araçlar

DGHTTP

Dünya genelinde uyumlu hafif taşıtlar test prosedürü

AYA

Alternatif yakıtlı araçlar

PHEA

Prizli hibrit elektrikli araçlar

EA

Elektrikli araçlar

HEA

Hibrit elektrikli araçlar

YASÇ

Yeni Avrupa sürüş çevrimi

1. GİRİŞ

Dünya nüfusuna paralel olarak sanayileşmenin de hızla artmakta olduğu çağımızda, enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Gelişen teknolojiye paralel olarak üretilen yeni nesil teknoloji ürünleri, direkt olarak enerjiye bağımlı olup mekanik sistemlerin kullanım alanları hızla azalmaktadır. Enerji ihtiyacı mevcut durumda yoğun olarak birincil enerji kaynaklarından yani fosil kökenli yakıtlardan sağlanmaktadır. Fakat bu yakıtların kullanımını da çevresel sorunları arttırmaktadır. Son yıllarda özellikle fosil yakıtların artan kullanımından kaynaklanan sera gazlarının atmosfere salınmasının bir sonucu küresel ısınma, mevsim değişiklikleri ve kronik hastalıklarda artış görülmektedir.

Azotdioksit, azotoksit ve karbondioksit, fosil kökenli yakıtların kullanımını neticesinde atmosfere yoğun olarak salınan gazların başında gelmektedir (van Kessel, 2018). Bu gazların emisyonunun azaltılabilesi için aktif karbon ve benzer filtre tiplerinin kullanımı üzerine her ne kadar yoğun çalışmalar mevcut ise de, dünya enerji ihtiyacı ve fosil yakıt tüketimi göz önüne alındığında filtrelemenin tek başına yeterli olamayacağı açıkça görülmektedir (Görgülü, 2018). Bu nedenle daha temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim hızla artmıştır. Son yıllarda ülke politikalarında da belirleyici faktörlerden olan yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle olarak sıralanabilir.

Bu yenilenebilir enerji kaynaklarına ek olarak özellikle otomotiv sanayide fosil yakıtlara karşı ciddi bir alternatif olarak görülen hidrojenle yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında fosil yakıtlarla kıyaslandığında göz ardı edilemeyecek büyüklüklerde enerji sağlamaktadır. Dahası hidrojenin yanması sonucu elde edilen tek yanma ürünü su buharı (H₂O) olduğundan, çevre dostu ve sera gazları emisyonunu azaltıcı önemli bir yakıttır.

Dünya sera gazı emisyonunun %21'i ulaşım sektöründe kullanılmakta olan araçlardan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ulaşım sektöründe kullanılacak alternatif temiz enerji kaynaklarının kullanımını artırılması yönünde önemli çalışmalar mevcuttur. Bu alternatif yakıtlı araçlar (AFV); Bataryalı elektrikli araçlar (BEA), hibrit elektrikli araçlar (HEA), fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEA) ve yakıt pilli elektrikli araçlar (YHEA) olarak kendi aralarında sınıflandırılmaktadır. Her ne kadar bu sistemlerin her biri kendi içerisinde özgün

kullanım alanlarına sahip ise de yakıt pilli elektrikli araçlar (YHEA), bu sistemler arasında öne çıkan en önemli araçlardır.

1.1. Araçlar için Alternatif Enerjiler

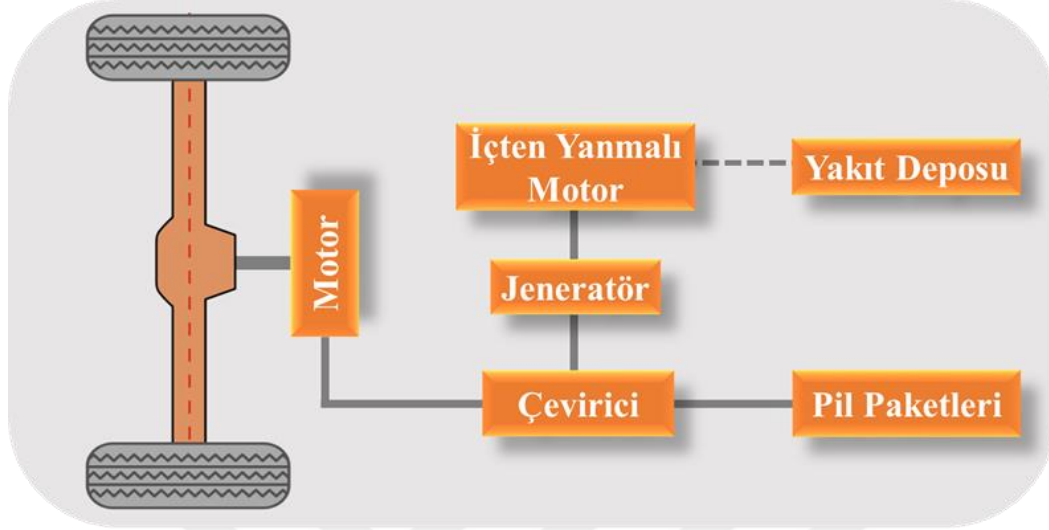
1.1.1. Geleneksel yakıt

Taşıtlar için konveksiyonel yakıtlar arasında benzin ve dizel bulunmaktadır. Şehirlerdeki arabaların %80'i, %15'lik bir enerji verimliliğine sahip, yani 60 litrelik bir yakıt deposunun sadece 9 litresi kadarını enerjiye dönüştürebilmesi, 51 litresinin ise ısıya ve kirleticilere aktarılması anlamına gelmektedir. Geleneksel yakıtların emisyonları; NO_x, CO_x, SO_x, hidrokarbon ve partiküllerden oluşmaktadır. Geleneksel otomobilin CO₂ emisyonu, teknoloji türü ve güç seviyesine göre değişmektedir. 2018 yılında geleneksel otomobillerin ortalama CO₂ emisyonları 120 g/km'dir. Dizel ve benzin, sırasıyla 35 MJ/L ve 32 MJ/L hacimli enerji yoğunluklarına sahiptir (Mierlo, Maggetto, Lataire, 2006).

1.1.2. Elektrik

Elektrik, ulaşım için potansiyel bir yakıt kaynağıdır. Elektrikli araçlar (EA), sera gazı emisyonlarını ve geleneksel fosil yakıt bağımlılığını azaltabilir. Elektrikli araçlar elektrik enerjisi ile tahrik edilmektedir. BP tahmini elektrikli araç satışlarının, 2030 yılında toplam araç satışlarının %8'ini kapsayacağını öngörmektedir (BP Enerji Görünüm Kitabı, 2018). Batarya elektrikli aracının (BEA) enerjisi, bataryalarda veya başka tür bir enerji depolama aygıtında depolanmaktadır. EA'nın çoğu doğrudan motor kullanmak için elektrik motoru kullanmakta, bu da tekerleklere göre termal araçlardan daha yüksek enerji tasarrufu sağlamaktadır. Elektrik enerjisi depolaması ana teknoloji zorluğudur. Elektrikli araçlarda çeşitli tipte piller kullanılmıştır. Örneğin kurşun asit, , nikel metal hidrit, Li-ion, Li-poly ve çinko-hava pilleri bunlara örnektir. Şimdi Li-ion bazlı batarya, mevcut karayolu hızlı elektrikli araç tasarımı için en popüler hale gelmiştir. Çünkü lityum pil göreceli olarak daha yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahiptir (Harrop ve Das, 2010). Batarya elektrikli aracının güç zinciri, bir batarya, elektrik motoru, elektrik dönüştürücü ve tekerlekten oluşur. Elektrikli taşıtın diğer bir büyük kısmı da, atık kinetik enerjiyi fren yaparken elektrığe dönüştürebilen enerji geri kazanımıdır. Hibrit elektrikli araç aynı zamanda bir yanmalı motor

içeren bir tür elektrikli araçtır. İçten yanmalı motoru durdurabilmekte ve sadece gerektiğinde elektrik motoru kullanabilmektedir (BP Enerji Görünüm Kitabı, 2018).



Şekil 1.1. Hibrit elektrikli aracın güç aktarım organları

Elektrikli aracın arka boruda emisyonu sıfırdır. Böylece şehir havası kalitesinde elektrik araçların faydaları olacaktır. Benzinli araçla karşılaştırıldığında elektrikli araç, CO₂'yi düşürmek için en etkili teknolojidir.

Geleneksel içten yanmalı motorlar verimsizdir. Yanma sürecinde, enerji israfının büyük kısmı ısı olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle, içten yanmalı motor sadece %15-20 verime sahiptir. Bununla birlikte, elektrikli araçlar ne çalışır durumda, ne de frenleme esnasında enerjii boşa harcamayan elektrik motoruyla çalışmaktadır. Dolayısıyla, EA 'lar %80'den daha yüksek enerji verimliliğine sahiptirler (Sandalow, 2009).

Elektrikli araç için şarj elektriğinin maliyeti, yüksek verimli aktarma organı nedeniyle, geleneksel araçtan çok daha düşüktür. Örneğin, AB hane halkı tüketicileri için elektrik fiyatı 0,199 EUR/kWh ise elektrikli araç için (Tesla Model S) yakıt ekonomisi 24 Kwh/100 km'dir. Böylece 100 km yakıt maliyeti 9,18 EUR'dur. Aşağıdaki tablo bazı elektrikli ve geleneksel arabaları karşılaştırmaktadır (Avrupa Komisyonu Raporu, 2014).

Ancak, elektrikli otomobillerin alım fiyatları, özellikle pahalı lityum-iyon bataryaları nedeniyle, geleneksel araçlardan önemli ölçüde yüksektir. Ancak son yıllarda gelişen teknoloji ile batarya fiyatları sürekli olarak düşmektedir. Lityum-iyon bataryanın seri

üretiminde fiyat yaklaşık olarak 300-600 USD/kWh kadardır. 20 kWh lityum iyonlu bir araç için batarya fiyatı 6000-12000 USD tutarında olacaktır. 2020 yılında batarya fiyatının 300-400 USD bariyerine düşmesi beklenmektedir. Ayrıca elektrikli araç, araç başına 1000-2000 USD tutarında yeni altyapı inşaatına ihtiyaç duymaktadır (Taylor, 2011).

1.1.3. Biyoyakıtlar

Biyoyakıtlar, şeker, mahsul ve hayvansal yağ veya diğer tarımsal ürünler gibi biyokütleden kaynaklanabilecek bir tür sürdürülebilir enerjidir. Dünyada yaygın olarak bulunan biyokütle, umut verici bir enerji kaynağıdır. Biyoyakıt, artan petrol fiyatları ve enerji güvenliği gereklilikleri nedeniyle gün geçtikçe popüler hale gelmektedir. Dünya biyoyakıt üretimi son 15 yılda 16 milyar litreden 100 milyar litreye yükselmiştir. Yine de, bugün biyoyakıt toplam taşıma yakıtının yalnızca %3'ünü oluşturmaktadır. Ancak UEA, 2050 yılında biyoyakıtın %27 oranında küresel taşımacılık yakıtı olarak kullanılacağını tahmin etmektedir (Reijnders, 2006). Biyoyakıt çevrimi, Şekil 3'de gösterilmiştir. İlk önce rafineriye biyokütle verilir. Termal veya biyolojik yöntemle biyokütle enerjiye dönüştürülür. Müşterilere en son yakıt sunulmaktadır.



Şekil 1.2. Biyoyakıt yaşam döngüsü (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, 2015)

Biyoyakıtlar birçok türe ayrılabilir. Birinci nesil biyoyakıtlar - geleneksel biyoyakıtlar olarak da bilinir (Etanol, Biyodizel, Biyogaz vb.).

Etanol 1970'den beri kullanılan, günümüzde ise yaygınlaşmaya başlayan bir araç yakıtıdır. Etanol fermantasyonu ile üretilebilmektedir:



2011 yılında dünyadaki etanol üretimi 84,6 milyar litre idi ve bu da biyodizelin 4 katı idi (Tesla Model S). Etanolün enerji yoğunluğu benzininkinin %66'sı kadardır. Bununla birlikte, etanol aracının ısıl verimi, motorun sıkıştırma oranının yüksek olmasından dolayı daha yüksektir. Etanol, genellikle kullanmadan önce benzinle karıştırılır. Örneğin E85, %85 etanol ve %25 benzin karışımı anlamına gelir (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, 2014). Etanol esas olarak şeker mahsulünden üretilir. Bu nedenle ham madde fiyatı oldukça uygundur.

Biyodizel, soya fasulyesi, ayçiçeği, hayvansal yağ ve kullanılmış yemeklik yağ tarafından üretilen bir biyo-yakıttır. Araştırmacılar daha az kirlilik ve yenilenebilirliğe sahip biyodizel üretmek için bitkisel yağ kullanmakla daha fazla ilgilenmeye başlamışlardır. Dizel yanmalı motor, en iyi benzinli motordan %30 daha yüksek verime sahiptir. Bunun yanında herhangi bir oranda normal dizel ile karıştırılan biyodizel, geleneksel dizel motorunu değiştirmeden kullanılabilir (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, 2014). Biyodizel genellikle biyodizel oranını belirtmek için "B" kullanan normal dizel ile karıştırılır. Örneğin B20, %20 biyodizel ile karışım anlamına gelir. Öte yandan, esas olarak gıda ürünü olan soya fasulyesi tarafından üretilen biyoyakıtın fiyatı da ham madde fiyatıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, biyodizelin hayvansal yağdan ve restoran atık yağından ekstrakt edilmesi, genellikle yakıtın saflaştırılmayan serbest yağ asidi içemesine neden olmaktadır.

Biyogaz, organik maddenin oksijen eksikliğinde parçalanması ile üretilir. Organik atık, atık su çamuru ve hayvan gübresi biyogazın hammaddesini oluşturmaktadır. Biyogaz, çoğunlukla metan, hidrojen ve karbon monoksit içerir. Isıtma, pişirme, elektrik üretimi ve taşıma gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Biyogazdan saflaştırıldıktan sonra doğal gaz üretilmektedir (Tanaka, 2011).

Metanol normalde doğal gazdan veya kömürden yapılır, ancak biyokütle tarafından da üretilmektedir. Etanol ile karşılaştırıldığında, metanolün üretilmesi daha kolaydır ve daha ucuzdur. Ancak metanol daha toksiktir ve su buharını havadan daha kolay emer. Gelecek vaad eden bir alternatif yakıt olan, doğal gaz, kömür ve biyokütle gibi çeşitli kaynaklardan üretilen Dimetil Eterdir (CH_3OCH_3). Dizel ve benzinli motor,

değiştirildikten sonra bununla uyumlu olabilmektedir. Dimetil eter kükürt içermeyen bir yakıttır ve daha az NO_x ve CO yaymaktadır (Salvi, Panwar, Subramanian, 2013).

Çizelge 1.1. Biyoyakıtların sınıflandırılması

BİYOYAKITLAR	
Birincil	İkincil
Odun, talaş, pelet, tezek, orman ve tarımsal atıklar, atık depolama sahası gazı	<p>1. Nesil: Nişastanın (buğday, arpa, mısır, patates) ve şekerin (şeker pancarı, şeker kamışı vb.) fermantasyonu yoluyla üretilen biyoetanol veya bütanol. Yağlık tohumların (soya, ayçiçeği, kolza, palmiye, hindistan cevizi, atık yağ, hayvansal yağlar vb.) transesterifikasyonu yoluyla üretilen biyodizel</p> <hr/> <p>2. Nesil: Yeni geliştirilen nişasta, yağ ve şeker tohumların(jatropha, cassava, miscanthus vb.) geleneksel yöntemlerle biyoetanole ve biyodizele dönüştürülmesi. Lignselülozik maddelerden (saman, odun, çim vb.) biyoetanol ve biyodizel üretimi</p> <hr/> <p>3. Nesil: Mikroalglerden üretilen biyodizel. Mikroalglerden ve yosunlardan üretilen biyoetanol. Mikroalglerden ve mikroorganizmalardan elde edilen hidrojen</p>

İkinci nesil biyoyakıtlar aynı zamanda lingo-selülozik biyokütle tarımsal artıklardan veya atıklardan imal edilen gelişmiş biyoyakıtlar olarak da adlandırılmıştır. Benzinle karşılaştırıldığında, gelişmiş biyoyakıt kullanılarak %60 ila %90 oranında sera gazı azaltılabilmektedir. Birinci nesil biyoyakıtlar ömrünü tamamladığı için ikinci nesil biyoyakıtlar geliştirilmiştir. Geleneksel biyoyakıtların çoğu gıda mahsulünden elde edilmektedir. Bununla birlikte, gıda kaynaklarını ve güvenliğini derinden etkileyen gıdalarla rekabete yol açmaktadır. Ayrıca, insanlar bitki yetiştirmek için yeni çiftlik arazileri oluştururken de sera gazı ortaya çıkmaktadır. İkinci nesil biyoyakıtlar bu sıkıntılarla beraber daha çevre dostu ve sürdürülebilirlerdir. Bunlar için ileri teknoloji, gıdaya dayalı olmayan selülozik malzemeler kullanılmaktadır (Sims, Taylor, 2008).

Biyoyakıt enerji çeşitliliğine katkıda bulunmakla beraber şu anda ulaştırma yakıt pazarının %3'ünü oluşturmaktadır. Biyoyakıtın çevresel faydaları çok tartışılmaktadır. Geleneksel biyoyakıtların çoğu, sera gazı emisyonları ile biyodizel dışındaki önemli avantajları göstermemektedir. Etanol ve benzinin CO₂, NO_x ve VOC emisyonları arasında önemli bir fark yoktur. Etanol ise benzinden biraz daha fazla CO yayar. Biyodizel kükürt içermez, bu nedenle asit yağmuru veya diğer nispi etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. Normal dizel ile karşılaştırıldığında, biyodizel daha fazla NO_x yaymaktadır (Keste, Vise, Adik, 2012) (Szablowski, Milewski, 2011). İlk nesil biyoyakıt üretimi, büyük miktarlarda tarım arazisine ihtiyaç duyan mahsul bazlı olduğundan, yaşam döngüsü analizi, ilk nesil biyoyakıtın toprak erozyonuna, besin sıkıntısına ve su kaynağının olumsuz etkilerine yol açabileceğini göstermektedir. Öte yandan, ikinci nesil biyoyakıt, atık biyokütleyi kullanabilir ve fazla yer kaplamamaktadır. Bu nedenle, ikinci nesil birinci nesil biyoyakıtın yerine kullanılması önerilmektedir (Reijnders, 2006).

Biyoyakıt, benzine göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Örneğin, etanol ve benzinin enerji yoğunluğu sırasıyla 25 MJ/L ve 32 MJ/L'dir. Biyodizeller, 45 MJ/kg ısı değere sahip normal dizelden daha düşük olan 37 MJ/kg'lık bir ısıtma değerine sahiptir. Biyoyakıt, benzinle aynı yakıt ekonomisini elde etmek için daha düşük fiyata sahip olmalıdır (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, 2014).

Biyoyakıt araç fiyatı geleneksel araç için ılımlı ve rekabetçidir. Ancak biyoyakıt fiyatı yem borsalarından etkilenir ve hammadde fiyatı üretim maliyetinin %45-70'ini oluşturmaktadır. Geleneksel biyoyakıtın fiyatı dünya ölçeğinde benzinle rekabet edememektedir (Brown, 2011). İlk nesil biyoyakıtlar ticarileştirilme aşamalarını geçmekle birlikte gelişmiş biyoyakıtlar henüz ilk ticari aşamaya ulaşmamıştır. Uluslararası enerji ajansı, düşük maliyetli durumda biyoyakıtın, 2030 yılında teknik yenilikler ve büyük üretim ile birlikte benzinle aynı ortak paydayı paylaşacağını tahmin etmektedir. Bunun yanı sıra, biyoyakıt önümüzdeki yıllarda hızlı bir şekilde büyümesini devam ettirecek ve 2030'da karayolu taşımacılığında kullanılan yakıtının %7'sini oluşturacaktır (Brown, 2011)

1.2.4. Sıkıştırılmış Hava

Basınçlı Hava Aracı (BHA), bir hava motoru tarafından desteklenmektedir. Sıkıştırılmış hava, yüksek basınçlı bir depolama tankında depolanır. Hava genişlediğinde, potansiyel

Çizelge 1.2. Basınçlı Hava Aracı Performansı (Papson, 2010)

	Basınçlı Hava Aracı	Kentsel Benzinli Araç	Kentse Elektrikli Araç
Yakıt Tipi	Sıkıştırılmış hava	Gaz	Batarya
Yakıt Ekonomisi	38 MPG-e	32 MPG	163 MPG-e
Menzil	29 mil	408 mil	127 mil
CO₂ Emisyon (Düşük karbon)	361 g CO ₂ /mil	243 g CO ₂ /mil	184 g CO ₂ /mil
CO₂ Emisyon (Ortalama)	626 g CO ₂ /mil	276 g CO ₂ /mil	147 g CO ₂ /mil
CO₂ Emisyon (Yoğun karbon)	721 g CO ₂ /mil	276 g CO ₂ /mil	169 g CO ₂ /mil
Yakıt Maliyeti	\$0,21/mil	\$0,09/mil	\$0,05/mil

Sıkıştırılmış hava otomobilinin enerji yoğunluğu, 50 Wh/l'dir ve bu, benzinden daha düşüktür. Sonuç olarak, basınçlı hava araçları çalışma menzili açısından zayıftır. Basınçlı hava aracının işletme maliyeti de ucuz değildir: yaklaşık 0,21 USD/mil. Bu, basınçlı hava taşıtlarını şu anda normal kullanım ihtiyacını karşılamak için yetersiz olduğu göstermektedir (Papson, 2010).

1.2.5. Doğal Gaz

Doğal gaz, sürdürülebilir olmayan ancak benzin yerine kullanılabilen fosil yakıt bazlı bir enerjidir. Metan (ana kirletici madde), karbondioksit ve azot ile karışan bir hidrokarbon gazıdır. Doğal gaz yeraltı kömür yatağında veya petrol sahasında bulunabilir ve genellikle ısıtma, pişirme ve elektrik üretmek için kullanılır. Doğal gazlı taşıt, iki çeşit doğal gaz kullanmaktadır: biri Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG), diğer ise Sıkıştırılmış Doğal Gaz'dır (CNG). Sıkıştırılmış doğal gaz, 20-32 MPa civarında yüksek basınçla depolanan havadan daha hafiftir (Hai, 1993). Ek araç boşluğu olan depolama için bir büyük bir tank gereklidir. Doğal gaz daha hafif ve kolay bırakıldığı için benzinli araçlardan daha güvenli olduğu düşünülmektedir. Ek olarak, sıkıştırılmış doğal gaz araçları, hafif hizmet taşıtları için daha yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.4. Doğal gazlı aracın depolama tankı (Gigaom, 2015)

Sıvılaştırılmış doğal gaz, $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve düşük basınçta (70-150 psi) özel olarak tasarlanmış tanklarda depolanmaktadır (Piping, 1983). Genellikle ağır iş taşıtlarında kullanılmaktadır. LNG'nin daha yüksek enerji yoğunluğuna bağlı olarak, yakıt ikmali, CNG ile karşılaştırıldığında yüz kat daha az elektrik gücü gerektirmektedir. Doğal gaz kullanmanın faydaları şunlardır: hava kalitesini iyileştirmek, enerji güvenliğini arttırmak, işletme maliyetlerini düşürmek ve şehir gürültüsünü azaltmasıdır. Dünyanın en iyi alternatif yakıt araçlarından biridir. Doğal gaz yenilenebilir olmayan bir enerji olmasına rağmen, çeşitli biyo-doğal gaz üreten teknolojiler geliştirilmiştir. Organik atıklardan toplanabilen biyogaz, biyo metan ve biyo-sentetik gaz gibi yakıtlar mevcuttur. Ek olarak, yakıt dağıtımı, iletim şebekesi, yakıt deposu ve yakıt doldurma doğal gazlı taşıt gelişimini sınırlayabilmektedir (Nijboer, 2010).

Doğal gaz fiyatı iletim, ağ gelişimi ve dağıtımdan etkilenmektedir. Doğal gazın rekabet gücü, yüksek düzeyde bir altyapı gelişiminin olduğu yerlerde daha yüksektir. Doğal gazlı taşıt teknolojisi, motosikletten kamyonu kadar her türlü taşıtı kapsamaktadır.

Doğal gaz, en temiz fosil yakıt olarak kabul edilir. Teker teker analizinde, doğal gaz aynı miktarda ısı üretmek için benzine göre %25 daha az karbon dioksit yayar. Bunun nedeni doğal gazın en düşük CO_2 /enerji oranına sahip olmasıdır. Doğal gaz ayrıca diğer hidrokarbon bazlı yakıtlardan daha az SO_2 ve NO_2 yayar (Nijboer, 2010).

Doğal gazın enerji yoğunluğu normal yakıttan daha düşüktür. LNG ve CNG'nin enerji içeriği sırasıyla 25 MJ/L ve 9 MJ/L, dizel yakıtın yüzde 60 ve 25'i kadardır. Bu yüzden doğal gazlı taşıtın yakıt deposu için daha fazla alana ihtiyacı vardır (Nijboer, 2010).

Piyasada Volkswagen, Fiat, Benz, Citroen, Peugeot, Volvo, Renault vb. gibi otomobil firmalarının çeşitli doğal gazlı araçları mevcuttur. Benzinli araç eski tank tutulduğu gibi CNG aracına dönüştürülmektedir.

Çizelge 1.3. Karayolu yakıtları için perakende fiyatları (Nijboer, 2010)

Ülke/Bölge	Dizel (USD/lge)	Gaz (USD/lge)	Sıkıştırılmış doğalgaz (USD/lge)
OECD Avrupa	1,32	1,39	0,74
OECD Kuzey Amerika	0,57	0,59	0,30
OECD Asya	1,39	1,79	0,62
Arjantin	0,56	0,63	0,26
Bangladeş	0,42	0,67	0,22
Brezilya	0,89	1,25	0,71
Çin	0,62	0,77	0,42
Mısır	0,19	0,16	0,07
Hindistan	0,65	1,04	0,33
İran	0,01	0,10	0,04
Malezya	0,57	0,63	0,22
Pakistan	0,70	0,93	0,49

Doğal gaz fiyatı, petrol fiyatından etkilenebilir. Fakat tarihsel olarak, ortalama doğal gaz fiyatı benzinden daha istikrarlıdır. Son yıllarda doğal gaz, çalışma maliyetini düşüren benzinden çok daha düşük hale gelmiştir. İngiltere Ulusal Temiz Hava ve Çevre Koruma Örgütü'ne göre, doğal gaz kullanmanın maliyetinin benzinden %20 - %60, dizelden %20 - %40 oranında daha düşük olduğunu belirtmektedir.

1.2.6. Hidrojen

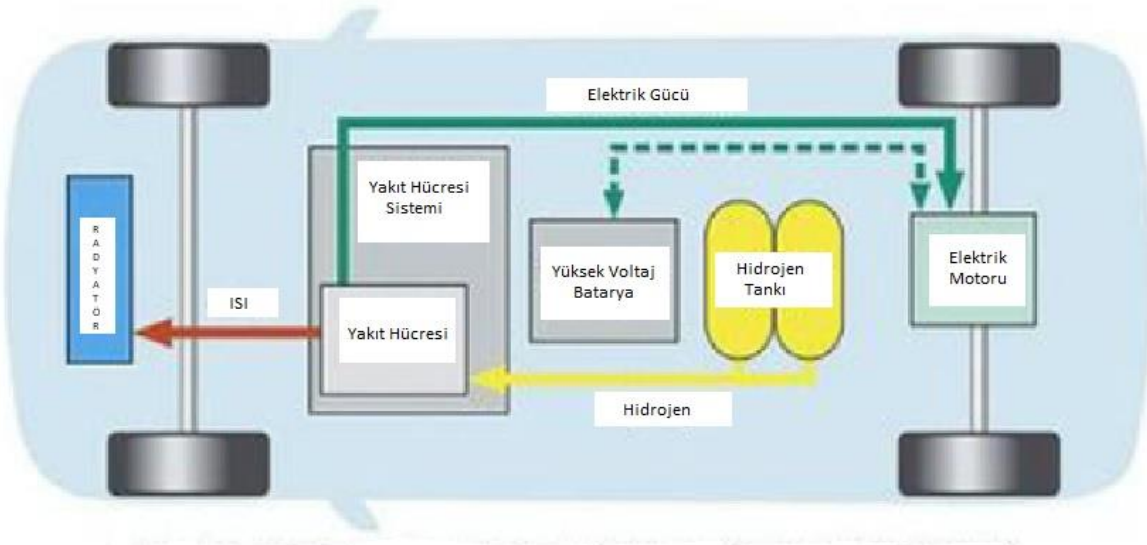
Hidrojen, araçlar için güç kaynağı olarak kullanılabilir ve temiz bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen aracı, kimyasal enerjiyi çevre dostu bir şekilde kinetik enerjiye dönüştürür. Hidrojen ile çalışan araçlar büyük ölçüde iki türe ayrılır (Schulte, 2004):

- Hidrojen İçten Yanmalı Motorlu Taşıt (HICEV)
- Yakıt Hücresi Aracı (FCV).

Hidrojen içten yanmalı motorlu taşıt normal benzinli motora benzer. Geleneksel motorun yaptığı gibi, yanma işleminde hidrojen yakıtı hava ile reaksiyona girer ancak nihai üretim sudur.

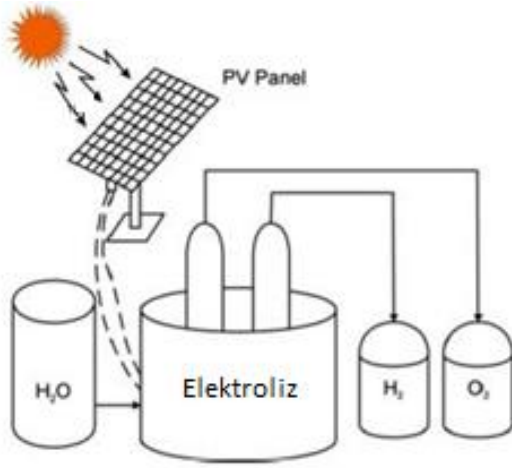


Hidrojenin yüksek yoğunlukta depolanması için, hidrojen taşıyıcı yüksek basınçlı bir depoya ihtiyaç duyulmaktadır. Benzinli içten yanmalı motorla karşılaştırıldığında, hidrojen içten yanmalı motorun verimliliği yaklaşık olarak 0,2 – 0,3'dür. Yakıt ve oksijen kimyasal reaksiyonu yoluyla elektrik motoruna elektrik üretmek için yakıt hücresi kullanılmaktadır. Hidrojen, yakıt hücresi için en genel yakıttır. Yakıt hücresi aracı az miktarda kirlenici, su ve sıcaklık üretmektedir. İçten yanma yolundan daha yüksek olan 0,4 – 0,6 verime ulaşabilmektedir (Dicks, 2003) . Aşağıdaki şekilde, hidrojen yakıt hücreli taşıtının güç aktarım sistemi gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Mercedes-Benz yakıt hücresi aracı F600 tahrik zinciri (Diseno, 2014)

Bununla birlikte, hidrojen yakıtlarının gelişmesi için bazı engeller vardır. İlk olarak, hidrojen üretiminin çevreye bazı olumsuz etkileri olabilir. Hidrojen yeryüzünde doğal olarak mevcut değildir. Fosil yakıt bazlı enerji kaynağından hidrojenin yaratılmasının yaygın yöntemleri arasında şunlar bulunur: Buhar Reform Süreci, Kısmi Oksidasyon Süreci ve Otomatik Termal Reform Süreci (Krishnan, 2014). Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarından, örneğin güneş ve biyo hidrojen üretim yolu gibi küçük miktarlarda da hidrojen üretilmektedir. Güneş-hidrojen senaryosunda, başlangıçta güneş enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Daha sonra hidrojen, suyun elektrolizi ile oluşturulur. Bunun dışında, biyokütle ve rüzgar enerjisi de hidrojen üretimi için uygundur.



Şekil 1.6. Fotovoltaik hidrojen üretim sistemi (Kampman, 2013)

Yenilenebilir üretim yönteminde doğrudan fosil yakıt tüketimi yoktur ve daha az enerji güvenliği etkisi vardır, ancak şu anda hala maliyetlidir ve yavaş üretim hızına sahiptir. İkinci olarak, hidrojen dönüşümü için altyapı, yakıt istasyonu, dağıtım için boru hattı, yakıt istasyonu şu anda çok yetersizdir. Bu yüzden hidrojen 2020'den önce önemli bir rol oynayabilir, ancak uzun vadede büyük olasılıkla hayati bir teknoloji olacaktır (Saleh, 2008).

Hidrojen araçları kullanmanın bir yararı düşük egzoz borusu kirliliğidir. Hidrojen ile çalışan araçlar, neredeyse sıfır emisyonlu araçlardır. Ancak hidrojeni dönüştürmek için kullanılan geleneksel yöntem, sera gazı emisyonu olarak çevre sonucuna neden olacaktır. Bu nedenle, geleneksel şekilde hidrojen üretilmesi durumunda hidrojen yakıtının avantajını önemli derecede etkilemektedir.

Benzinin enerji yoğunluğuyla (32 MJ/L) karşılaştırıldığında, hidrojenin enerji yoğunluğu oldukça düşüktür, bu da sıkıştırılmış hidrojen için sadece 5,6 MJ/L ve sıvı hidrojen için 8,5 MJ/L'dir. Sonuç olarak hidrojeni daha yüksek yoğunlukta tutmak ve yüksek basınç ve düşük sıcaklık talebini karşılamak için özel bir depolama sistemi gerektirmektedir (Granovskii, 2006).

Halen hidrojen araçlarının maliyeti normal yakıt araçlarından yüksektir. Hidrojen içten yanmalı araçlar toplu olarak üretimleri yaygın değildir. Toyota, yakıt hücreli hidrojen araçlarının 2015 yılında 60.000 EUR'dan satışa çıkarmıştır. Aşağıdaki tabloda hidrojen ve diğer aynı büyüklükteki araçlar karşılaştırılmaktadır (1 mil = 1,6 km, mpg-e: galon denkliği başına mil).

Çizelge 1.4. Kullanım hidrojen veya benzin arasındaki araç performans karşılaştırması (Hyundai, 2015; Toyota, 2015)

	Hyundai ix35 YHEA	Hyundai ix35	Toyota Mirai	Toyota Camry
Sınıf	Kompakt SUV	Kompakt SUV	Orta büyüklükte sedan	Orta büyüklükte sedan
Motor	Yakıt hücresi-motor	2.0 L Benzin	Yakıt hücresi-motor	2.5 L Benzin
Güç	100 kW	122 Kw	144 kW	133 kW
Yakıt Ekonomisi	49 mpg-e	23 mpg	60 mpg-e	28 mpg
Hızlanma 0-100 km/h	12,5 s	12 s	10,4 s	9,3 s
Son Hız	160 km/h	183 km/h	175 km/h	>200 km/h
CO2 Emisyonu	0 g/km	150 g/km	0 g/km	116 g/km
Ağırlık	2290 kg	1500 kg	1850 kg	1510 kg
Tank Kapasitesi	144 L (70 MPa)	58 L	122,4 L (70 MPa)	64 L
Mesafe	594 km	700+km	650 km	700+km
Enerji Fiyatı(USD)	2-4/gallon	3,34/gallon	2-4/gallon	3,34/gallon
Yakıt Maliyeti/100km	2,6-5,1	9,1	2,1-4,2	7,5
Model Maliyeti(USD)	144.400	25.000	57.500	27.000

Hidrojen fiyatı diğer yakıt fiyatlarına duyarlıdır. 2007 yılında hidrojen üretiminin maliyeti 50 USD/GJ'dir ve günümüzde ise 10 - 15 USD/GJ'ye kadar düşmüştür. Ayrıca, farklı hammadde üretimlerine bağlı olarak maliyet de aynı değildir. Fosil olmayan yakıt esaslı

hidrojen üretme yolu şu anda ekonomik değildir. Güneş-hidrojen yolundan hidrojen üretmek, kömürden hidrojen üretmekten 5 kat daha pahalı olabilmektedir. Ek 4, farklı metotlarda hidrojen üretmenin maliyetini sunmaktadır. Üçüncüsü, hidrojen şarj altyapısı başka bir engel olabilir, çünkü ekstra maliyet katacaktır. Büyük miktarda dağıtım borusu şebekesi ve yakıt ikmal istasyonu, maliyetine fazladan 4 – 11 USD/GJ katacaktır (IEA Enerji Teknolojisi Temelleri, 2007). Son olarak, konvansiyonel aracın yerini alabilmek için yakıt hücresi aracının uygun fiyatlı olması gerekmektedir. Son on yılda, tam hücre fiyatı hızla düşmektedir. ABD Enerji Departmanı, 2020'de yakıt hücresi fiyatının 40 USD/kW seviyelerine düşmesini öngörmektedir.

1.2.7. Sıvılaştırılmış petrol gazı

Oto gaz olarak da adlandırılan sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), ana bileşenler olarak bütan (C_4H_{10}) ve propan (C_3H_8) içeren yaygınca kullanılan alternatif bir yakıttır. Halen ham petrol veya doğal gazdan çıkan, ısıtma, pişirme, soğutma ve taşıma yakıtları için kullanılmaktadır. LPG, içten yanmalı motor için uygun hale getirilen bir araçta, 95 oktan benzine göre daha yüksek oktan değerine sahiptir. Benzinli bir araca, yüksek basınçlı bir tankı (760-1030 kPa) sonradan takarak otomatik gazla çalıştırmak mümkündür. Tank, sıvılaştırılmış petrol gazını düşük sıcaklıkta sıvı halde depolayacaktır (Mockus, 2007). Sıvılaştırılmış petrol gazı sürdürülemez kaynaklardan üretilmesine rağmen, enerji güvenliği biyodizel ile eşittir ve CNG'den daha yüksektir (Saleh, 2008). Ayrıca biyokütle yoluyla LPG üretme teknolojisi geliştirilmiştir. LPG'nin sürdürülebilirliğini arttırmak mümkündür.

Çizelge 1.5. LPG emisyonlarının diğer yakıtla karşılaştırması (g/km) (Leung, 2008)

	THC	NMHC	CO	NOx	PM
Benzin	0,08	0,07	0,60	0,03-0,08	0,001
Dizel	0,06	0,06	0,50	0,30-0,50	0,040
Dizel ve PM fitresi	0,01	0,01	0,01	0,30-0,50	0,002
CNG	0,15	0,30	0,30	0,03-0,06	<0,001
Otogaz	0,05	n.a	0,30	0,05-0,08	<0,001

Sıvılaştırılmış petrol gazı, birçok araştırmacı tarafından daha az CO, NOx ve VOC salma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir (Mistry, 2005). LPG ile partikül emisyonu

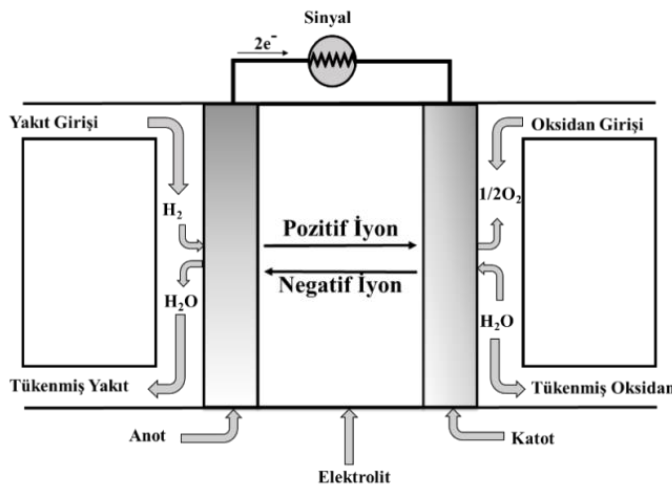
yanma reaksiyonuna girmiş dizel yakıtından on kat daha azdır (Saleh, 2008). LPG'li aracın CO₂ emisyon performansı günümüzde neredeyse aynı seviyedeki bir benzinli araçla eşittir.

LPG'nin enerji yoğunluğu, benzine göre daha düşük olan 26 MJ/L'dir. Ayrıca, otogazlı taşıtın enerji verimliliği, dizel araçlarınkinden %10 - 15 arasında daha düşüktür. Bu nedenle oto gazlı araç dizel araçtan yaklaşık %35 - 50 daha fazla yakıt tüketir (Raslavicius, 2013). Bununla birlikte, LPG'li araç çalıştırmanın maliyeti, rekabetçi yakıt fiyatı nedeniyle benzinden daha düşüktür. Örneğin, Avrupa'da ortalama otogaz fiyatı petrolün yalnızca yarısı kadardır (Serrano, 2013).

1.2. Elektrikli ve Yakıt Hücreli Araçlar

1.2.1. Yakıt Hücreleri

Pek çok farklı tipte yakıt hücresi bulunmasına rağmen hepsinin işleyiş tarzlarında temel benzerlikler bulunmaktadır. Bir yakıt hücresinin çalışması için gereken üç şey vardır; bir anot, bir katot ve bir elektrolit. Yakıt hücresinin tipine bağlı olarak, elektrolitler farklılık göstermektedir. Aslında yakıt hücreleri kullandıkları elektrolit materyali tarafından sınıflandırılmaktadır. Bir yakıt hücresi, yüzlerce ayrı hücreden oluşabilir. Hücre esas olarak katot ve anot arasındaki elektroliti zımparalamaktadır.



Şekil 1.6. Yakıt Hücresi Çalışma Diyagramı (Hayre, Cha, Colella, Prinz, 2016)

Yukarıdaki Şekil 1.6’da kullanılan elektrolit materyali, ayrıca bir polimer elektrolit membranıdır. Proton değişim zarı (PEM) elektroliti olarak bilinmektedir. Bu özel zar yaygın olarak mobil güç uygulamalarında kullanılmaktadır. Kullanılan elektrolit malzemesi değişirken yakıt hücresinin tipine bağlı olarak yakıt hücresinin genel fonksiyonu açıklamak gerekirse, yakıt (genellikle hidrojen), hava veya saf oksijen ile birlikte yakıt hücresinin anot ve katod bölmesini beslemektedir. Hücre elektronları anot tarafında gaz olarak ayrılarak elektrolit membrandan geçmeye çalışır, membran temelde elektronları filtreler ve sadece $2H^+$ iyonlarının geçmesine izin verir. Katot bölgesinde $2H^+$ iyonları membranın içinden geçen oksijen atomları ile birleşerek su molekülünü üretmektedir. (Bvumbe, Bujlo, Toli, Mouton, Swart, Pasupathi, Pollet, 2016).

1.2.2. Yakıt Hücreleri Tipleri

Daha önce belirtildiği gibi, yakıt hücreleri kullandıkları zarrın tipi ile karakterize edilmektedir. Aşağıda listelenen bazı yaygın yakıt hücrelerinin ve her birinin kullandığı membran tipleri Tablo 1.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 1.6. Yakıt Hücre Tipleri

Yakıt Hücresi	Kısaltması	Zar
Katı oksit yakıt hücreleri	SOFC	Yttria-stabilized zirconia
Doğrudan metanol yakıt hücresi	DMFC	Katı polimer elektrolit (Nafion)
Fosforik Asit yakıt hücresi	PAFC	Fosforik Asit (H_3PO_4)
Polimer elektrolit yakıt hücresi veya Proton değişim zarı	PEMFC	Katı polimer elektrolit (Nafion)

Tıpkı içten yanmalı motorlarda olduğu gibi, yakıt hücreleri farklı yakıtlarla çalışabilirken, hidrojen çoğu mobil uygulama için seçilen diğer yakıt hücrelerinden daha fazla yakıt esnekliği taşımaktadır. Bu tip yakıt hücreleri genellikle sabit olarak kullanılırlar (Giorgi, 2013).

Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)

Yaygın olarak kullanılan bir katı oksit yakıt hücresidir. Katı oksit yakıt hücreleri genellikle $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Katı oksit yakıtının bir

avantajı hücre, yüksek sıcaklık aralıklarında kullanılması ve oksitleyici iyonları taşıması sayesinde çeşitli yakıtları kullanma yeteneğine sahip olmalarıdır (Hayre, Cha, Colella, Prinz, 2016). Bu yakıt hücrelerinin yaygın bir kullanımı cep telefonları için yedek batarya sistemleridir. Katı oksit yakıt hücreleriyle ilişkili reaksiyonlar aşağıda sunulmuştur.

Tüm reaksiyon



Yükseltgenme Reaksiyonları



İndirgeme Reaksiyonu (Katot) :



Doğrudan metanol yakıt pili (DMFC)

Doğrudan metanol yakıt hücreleri, düşük sıcaklıklarda çalışabilen esnek yakıt hücresine bir örnektir. Bu yakıt hücresi başlangıçta dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi küçük taşınabilir elektronik cihazlara uygulanmıştır (Cameron, Hards, Harrison, Potter, 1987).

Tüm reaksiyonları:



Direkt metanol ile ilişkili yarı reaksiyonlar aşağıda listelenmiştir.

Oksidasyon Reaksiyonu:



İndirgeme Reaksiyonu:



Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)

Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC), orta sıcaklıklarda çalışabilen bir yakıt hücresidir. Böylece iyonları okside eden yüksek sıcaklıktaki yakıt hücreleri kadar esnek olamamaktadır. PAFC'ler ağırlıklı olarak sabit güç için kullanılırken, aynı zamanda halk otobüsleri gibi bazı büyük ölçekli araçlarda da kullanılmaktadır (Bagotsky, 2012).

Genel reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Oksidasyon Reaksiyonları:



İndirgeme Reaksiyonları:



Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMFC)

Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri veya proton değişim membranı yakıt hücreleri daha düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Bu yakıt hücreler ulaştırma sektöründe en yaygın kullanılanlardır çünkü 80 °C gibi düşük sıcaklıklarda çalışmasından dolayı yakıt nispeten hızlı bir şekilde çalışmaya başlayabilmekte ve durabilmektedir (Barbir, 2013). PEMFC'lerin bir diğer avantajı ise çok yüksek verimlilik ve güç yoğunluğuna sahip olmalarıdır (Srinivasan, 2006). Dezavantaj olarak ise daha yüksek CO salınımı bulunmaktadır.

PEMFC için genel kimyasal reaksiyon:



PEMF için kimyasal yarı reaksiyonlar:

Oksidasyon reaksiyonları:



İndirgeme reaksiyonları:



1.2.3. Hidrojen yakıtlı araçlar

Hidrojen bir otomobil güç kaynağı olarak iki farklı şekilde kullanılabilir: Yakıt hücreleri (FCs) kullanarak veya içten yanmalı motorda (ICE) hidrojeni yakıtını yakma sonucu kullanılabilirler. Bu tez çalışmasında sadece yakıt hücresi ile çalışan araçlar detaylı olarak incelenmiştir. Konvansiyonel aktarma organlarına kıyasla tarihçe, şematik görünüm ve verimlilik bu bölümde gösterilmektedir. Bölümün sonunda, bugünlerde FCV pazarına hızlı bir bakış var.

Tarihte hidrojen yakıtlı araçlar

İlk defa hidrojen, 1783 yılında bir Fransız fizikçi olan Jacques Charles (Ulusal Hidrojen Birliği, 2007) tarafından bir hidrojen balonunda taşıma yakıtı olarak kullanılmıştır. İlk yakıt hücresi aracı ise 1959 yılında Allis-Chalmers Manufacturing Company tarafından tanıtılan 20 beygir gücünde bir traktördü (Allis-Chalmers Şirketi, 2007). 1008 ayrı hücreden oluşan alkalın yakıt hücresi tarafından desteklenmiştir. Bilim Servisi'ne göre, yakıt olarak kullanılan saf hidrojen değil, büyük ölçüde propan olan farklı yakıt gazlarının bir karışımıydı.

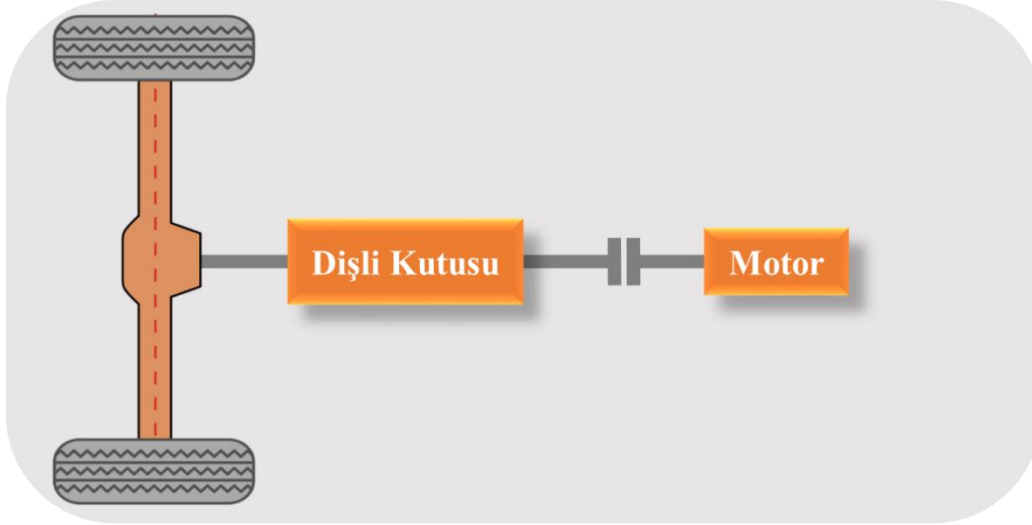


Şekil 1.7. 1970 yılında K. Kordesh tarafından yaptırılan kamuya açık yollarda hidrojenle çalışan yakıt hücresi yolcu aracı (Kordesch ve diğerleri, 1999)

1970 yılında, K. Kordesch Austin A40'ı hidrojen yakıtlı bir FC aracına dönüştürmüştür. Kordesch ve arkadaşlarına göre araç, üç yıl boyunca kamuya açık yollarda kullanılmış ve tepe tırmanma ve hızlanma sırasında ek bir enerji kaynağı olarak görev yapan yedi seri bağlantılı kurşun asit akü ile birlikte sıvı hidrojen yakıtlı AFC ile çalıştırılmıştır. Araçta, dolaşımdaki KOH elektrolitli bir hidrojen/hava yakıt hücresi sistemi vardı. Tahrik tekniğinin temel işlevsel fikri, yakıt hücrelerinin yalnızca gerçek sürüş sırasında çalışacak olmalarıydı. Bu, akımlara bağlı elektrolit hasarını ve ayrıca bazı açık devre problemlerini önleyecekti. Hidrojen, her biri 13 kg ağırlığında altı hidrojen tankında depolandı. Toplam hidrojen depolama kapasitesi 150 barlık bir basınçta $25 \text{ m}^3 \text{ H}_2$ idi. Alternatif yakıtlar üzerine daha ciddi bir çalışma, OPEC petrol ambargosu ve sonuçta ortaya çıkan petrol krizinden sonra 1973'te başlamıştır. Bundan yirmi yıl sonra Daimler Benz, dünyanın ilk modern yakıt hücreli aracı olduğu söylenen NECAR I'yi üretti. Gösteri 1994 yılında Almanya'da gerçekleşmiştir (Ulusal Hidrojen Birliği, 2007).

Yakıt hücresi aracı (YHA)

Yakıt hücresi araçları iki ana kategoriye ayrılabilir, ancak kategoriler arasında çizilen çizgi her durumda net değildir. İki grup arasındaki temel fark, birinin yakıt hücresi sistemini doğrudan bataryasız bir güç kaynağı olarak kullanmaları (YHA) ve diğerinin ise yakıt hücresi sistemine ek olarak batarya veya süper kapasitör kullanmasıdır. İkincisi, yakıt hücresi hibrid aracı (YHHA) olarak adlandırılır. Menzil genişletici tipli bir yakıt hücresi aracı, aynı zamanda aracın hareket ettirilmesi için gereken tam gücü sağlamak üzere tasarlanan akülerin şarj edilmesi için, düşük güçte yakıt hücreleri de tasarlanabilmektedir (EG&G Teknik Servis, 2004). Bir yakıt hücresi aracının tahrik sistemi, geleneksel İYM aracından birçok yönden farklıdır. Geleneksel tahrik (şekil 1.8) sürekli yakıt yakma işlemine ve ayrı bir iletim sistemine dayanmaktadır. Geleneksel araçlardaki aküler, sadece ışıkları ve yardımcı cihazları yakmak için kullanılmaktadır.

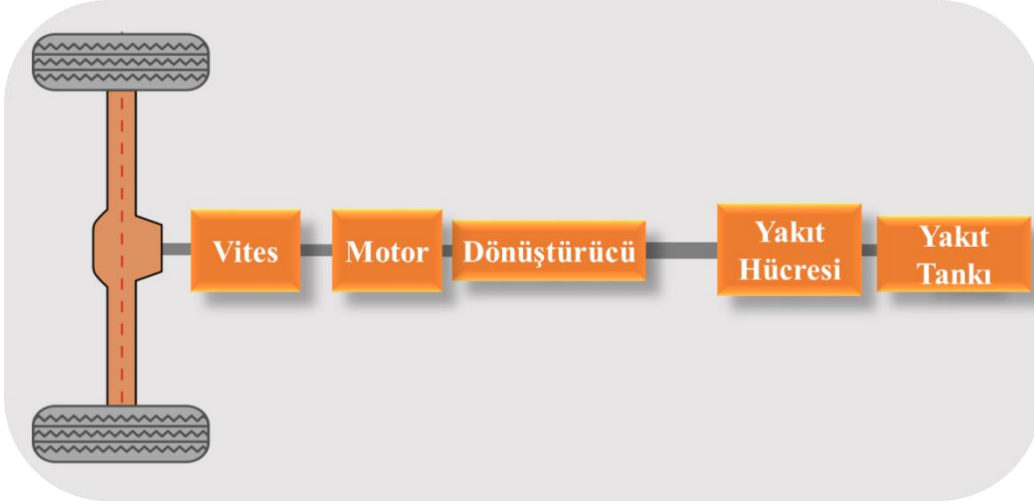


Şekil 1.8. Geleneksel bir ICE aracının şematik gösterimi (Folley, Smyth, Murphy, 2002)

Genel olarak, bir araca güç sağlamak için bir yakıt hücresi sistemi kullanıldığında, hidrojen ve oksijen arasındaki kimyasal reaksiyonun yarattığı elektrik gücü, mekanik enerjiye dönüştürülmelidir. Tipik FCV sistemi, bir yakıt depolama tankı, yakıt hücresi yığını, güç kontrol ünitesi ve bir çekiş motorundan oluşur.

Bazı FCV'ler, içlerinde sıvı halde depolanabilen metanol veya benzin gibi bir sıvı yakıt kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bu yakıtları kullanan araçlarda ayrıca yakıtı hidrojen, CO₂ ve suya ayıran bir yakıt işlemcisi olan bir reformcu gerekir. Bu işlem karbondioksit üretmesine rağmen, geleneksel benzinle çalışan araçların ürettiği miktardan çok daha azını üretir (Folley, Smyth, Murphy, 2002) . Metanol ayrıca bir yakıt dönüştürücüsüne ihtiyaç duymadan doğrudan yakıt hücrelerinde kullanılabilir.

Elektrikli araçlara benzer şekilde, FCV'lerde yanmalı motor yerine bir tahrik motoru olarak bir çekiş motoru kullanılmaktadır. Bir yakıt hücresi tarafından üretilen elektrik DC enerjisidir ve voltaj, yakıt hücresi yığına seri olarak bağlanan yakıt hücrelerinin miktarına bağlıdır. Günümüzde yakıt hücresi sistemlerinin çoğu, 12 V ila 100 V gibi düşük voltajlar için tasarlanmıştır. Bu nedenle, çoğu durumda, bir DC/AC invertör ile daha fazla işlemden önce voltajı yükseltmek için genellikle bir DC/DC destek dönüştürücü gerekir.

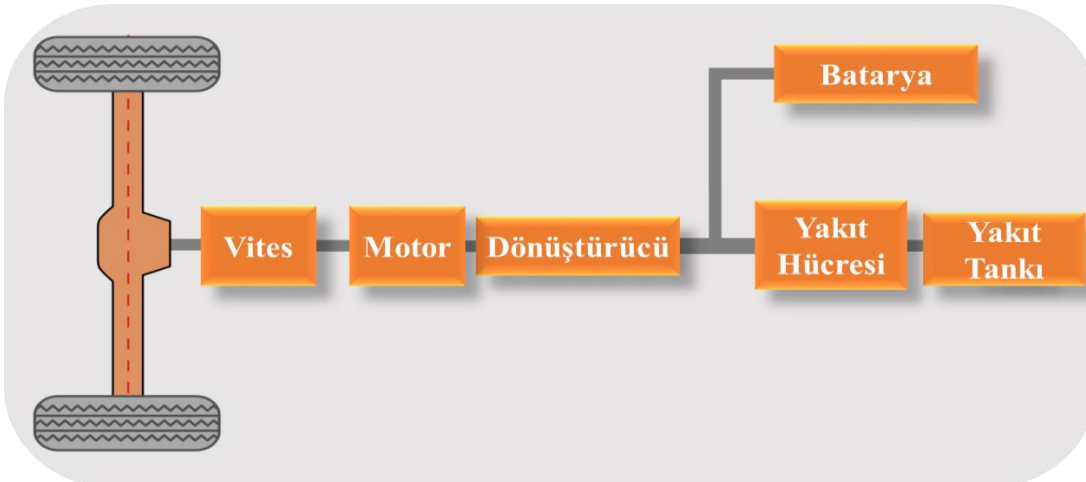


Şekil 1.9. Bir yakıt hücresi aracının şematik gösterimi (Folley, Smyth, Murphy, 2002)

Yakıt hücresi sisteminin ve elektrik motorunun çalışmasını yönetmek için güç kontrol ünitesine ihtiyaç vardır. Yakıt hücresi sistemi serbest nefes alabilir, yani oksijeni basınçsız bir şekilde çevreleyen havadan alır, ya da talebe göre oksijen veya hava akışını kontrol etmek için ek bir hava kompresörü kullanılabilir. Yığına verilen hidrojen her zaman belirli bir aşırı basınçla basınçlandırılır. Son olarak, elektrik enerjisi bir veya birkaç elektrik motoru tarafından harekete dönüştürülür.

Yakıt hücresi hibrit aracı (FCHV)

Araçlar, kullandıkları yakıt türüne göre kolayca kategorize edilebilir, ancak bu, aracın itme sisteminin çoğunu ortaya çıkarmaz. Çeşitli itiş, yakıt ve depolama tekniklerinin birleşimi olan çok sayıda farklı hibrit araç vardır.



Şekil 1.10. Bir yakıt hücresi hibrit aracının şematik diyagramı (Folley, Smyth, Murphy, 2002)

Yakıt hücresi hibrid taşıtları, zaten geniş kamuoyu için mevcut olan hibrit elektrikli taşıtlara (HEA'lar) benzer özelliklere sahiptir. Hibrit elektrikli araçlar tipik olarak geleneksel İYM ile batarya gibi bir enerji depolama cihazını birleştirir. HEA'nın ana bileşenleri; enerji depolama sistemi, güç ünitesi ve elektrik motoru, yani araç tahrik sistemidir (EG&G Teknik Servis, 2004). Toyota Prius, ikincil batarya ile birlikte benzinli motorla çalışan hibrit bir elektrikli araca yaygın bir örnektir. FCHV durumunda, yakıt hücresi hidriy taşıt, İYM bir yakıt hücresi sistemi ile değiştirilir. Her iki durumda da, rejeneratif fren sistemi aküleri şarj etmek için kullanılabilir (Kawai, 2004). FCHV'ler bazen, yakıt hücreli hibrit elektrikli araçlar olarak da adlandırılır. Bir hibrit aracın enerji depolama birimi, bir pil ünitesi, ultrakapasitör, sineklik veya bu seçeneklerin bağlantısı olabilir. Akü, ultrakapasitör ve yakıt hücresi sistemini çekiş motoruna birleştiren bir araca üçlü hibrit araç da denilebilir (Pede, Iacobazzi, Passerini, Bobbio, Botto, 2003).

FCHV'lerde, enerji depolama ünitesi aşağıdaki avantajları elde etmek için kullanılır (Pede, Iacobazzi, Passerini, Bobbio, Botto, 2003):

- Sistemin en pahalı bileşeni olan bir yakıt hücresi boyutu azaltılabilir. Bu, toplam aktarma organı maliyetini önemli ölçüde azaltır.
- Aktarma organlarının esnekliğini artırır, bu da güç geçişlerini ve yavaş yanıt veren yakıt hücresi sistemini dengeleyen tampon enerji depolamasından dolayı verimliliği artırır.
- Soğuk çalışma sistemini ısıtması, yakıt hücresi performansını artıran dahili enerji depolaması ile yapılabilir.
- Fren enerjisi daha sonra elektrik biçiminde geri kazanılabilir ve serbest bırakılabilir. Aksi takdirde bu enerji kaybedilecektir.

Örneğin akü ve ultra-kapasitör ile daha yüksek verimle frenleme enerjisini yeniden üretmek mümkündür. Sadece fren enerjisi geri kazanımı ile kazanılan enerji miktarı çevrime bağlıdır ve %3,5 ile %20 arasında değişmektedir (Pede, Iacobazzi, Passerini, Bobbio, Botto, 2003).

Tüm tahrik sistemlerinde, hibridizasyon yakıt tüketimini azaltır. Hibridizasyonun yararları İYM araçlarında FCV'lerden daha fazladır, çünkü ilk olarak yakıt hücresi araçlarının verimliliği daha yüksektir (Folley, Smyth, Murphy, 2002). FCHV'ler gibi bazı hibrit araçlar

için, sistem yapılandırması, kurulu güç kaynağı ile çekiş için gereken güç arasındaki oran olan "hibridizasyon oranı" adı verilen bir dizinle gösterilebilir.

Bir yakıt aracının yakıt ekonomisi ve verimliliği

Yakıtın elektriğe doğrudan dönüştürülmesi, yakıt hücrelerinin, yanma motorlarından önemli ölçüde daha yüksek verim elde etmelerine olanak tanır; bunun etkinliği Carnot Termodinamik Yasası ile sınırlıdır. Bir FCV'nin verimliliği, rejeneratif frenleme ve atık ısının kullanılmasıyla artırılabilir.

Bekkeheien ve ark. (1999) modern bir İYM, optimum koşullarda %30'un biraz üzerinde bir dönüşüm verimliliği sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, İYM araçlarının sorunu, genellikle ortalama sürüş koşulundan daha yüksek yüklerde en verimli biçimde çalışacak şekilde tasarlanmış olmalarıdır. Bu, ortalama sürüş sırasında %17'den düşük bir araç verimliliği sağlar. (Bekkeheien, 1999) Bir FCHV için, araç verimi neredeyse %50'dir, ancak hidrojen için tank verimi düşüktür. Mevcut benzinli araçlardan üç kat daha yüksek olan %42'lik tekerleğe iyi verimlilik elde etmek için, bir FCHV'nin araç verimliliği %60'a yükselmelidir (Kawai 2004, 64). Yapılan bir Japon hidrojen araçları araştırmasında, orta büyüklükteki FCV'nin yakıt ekonomisi $16,6 \text{ km/Nm}^3 \text{ H}_2$ olarak belirlenmiştir (Oi ve Wada 2003, 348).

Bir FCV'nin iyi tekerlek emisyonları

H_2 aracının tekerlek lastiği sera gazı emisyonları, yakıtın üretilmesi, taşınması ve depolanması için hangi işlemin kullanıldığına bağlıdır. MacLean ve Lave (2003) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, hidrojen FCV'nin GHG emisyonları $70 - 241 \text{ g CO}_2$ eşdeğer/km arasında ve orta ölçekli benzinle çalışan İYM aracı için de aynı şekilde $248 - 333 \text{ g CO}_2$ eşdeğer/km değerlerini tespit etmişlerdir (Maclean & Lave 2003). Dolum istasyonunda yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretildiğinde, iyi tekerleğe sera gazı emisyonları sıfıra yaklaşmaktadır. Geleneksel ICE ile karşılaştırıldığında, CO_2 emisyonları metanol yakıtlı FCV kullanılarak da önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Daimler-Chrysler'e göre, metanol yakıt reformeri ile donatılmış NECAR5, benzinle çalışan ICE aracının karbondioksit emisyonlarının yalnızca üçte birini üretmektedir (Helynen ve ark. 2004, 233).

H₂ pazarındaki binek araçlar

Hidrojen yakıtlı araçlar, araç pazarlarına artan bir hızla giriyor. Her büyük otomobil üreticisinin FCV yarışmasına kendi yanıtları vardır. 90 kW PEMFC'li ilk yakıt hücresi otobüsü 1993 yılında New By Flyer Industries Ltd tarafından tanıtılmıştır ve 400 km'lik bir sürüş mesafesine sahiptir (Kivisaari 2003). Çevrimiçi Yakıt Hücresi Bilgi Kaynağına göre, 2000 yılından önce 18 farklı hidrojen yakıtlı binek aracı tanıtılmıştır. 2003 yılında bu sayı 65'e ulaşmıştır (Kivisaari 2003.) Bu araçlar arasında en yaygın hidrojen depolama yöntemi sıkıştırılmış gaz sistemidir.

2007 yılında bu bilgi kaynağına 74 farklı yakıt hücresi aracı kaydedilmiştir (Fuel Cells 2007), en popüler depolama yöntemi olarak kalan H₂'yi sıkıştırmıştır. MH depolama ile elde edilen en iyi sürüş menzili 300 km idi. Bu mezil 90 kW PEMFC (Fuel Cells 2007) ile donatılmış Toyota FCHV-3 ile elde edilmiştir. Toyota aynı zamanda 2002 yılında Honda ile aynı anda dünyanın ilk FCV'sini ticari pazarlara tanıtan üretici olmuştur (Kawai 2004, 62).

Hidrojen dolun istasyonları

Çevrimiçi Yakıt Hücresi Bilgi Kaynağına (2007) göre, ilk H₂ araç yakıt ikmal istasyonu, 1989 yılında Münih'te, BMW tarafından geliştirilen test araçlarını desteklemek için kuruldu. İlk ticari H₂ akaryakıt istasyonu 2003 yılında Reykjavik'te açıldı. Şubat 2007'de, dünya çapında 138 operasyonel hidrojen yakıt istasyonu vardı ve yakın gelecekte 64'ün açılması planlandı. Akaryakıt istasyonlarının sayısı giderek artıyor, çünkü 2003'te aynı kayıt defteri, sadece hidrojen sağlayan 73 adet yakıt dolun istasyonuna sahiptir (Kivisaari 2003). Hidrojen yakıtlı araçların geliştirilmesi, toplum için üç ana fayda sağlar: ithal yağdan bağımsızlık, düşük CO₂ emisyonu ve yüksek nüfuslu alanlara temiz yerel hava. Operasyonların %22'sinin ve planlanan H₂ akaryakıt istasyonlarının %28'inin Kaliforniya, ABD'de olmasının nedenleri açıktır (Fuel cell, 2007).

Bununla birlikte, Motor Üreticileri ve Tüccarları Derneği raporuna göre (Ezzat, Dincer, 2018), 2017 yılında yakıt hücresi araçlarının sayısı son 4 yıla göre %280 oranında artmıştır. (Dass, Tan, Yatim, 2017) 2020 için YHEA tahmininin maliyet analizlerini, otomobil endüstrisi ve orijinal ekipman üreticileri (OEM) uyarlaması ile ifade edilmiştir; fiyatlar yaklaşık %24 düşecek ve yeni maliyet 32.000-34.000 dolar aralığında olacaktır. Bu

çalışmayı desteklemek için, IEA raporu (Chambers, 2018), 2050 yılında YHEA'lerin 33.400 USD bandında olacağını belirtmiştir. 6.475 YHEA, 2017'nin sonlarında satılmıştır. Bu verilere destek olarak, gelecekteki görüş (Ponssard ve diğerleri, 2015) şu şekilde ifade edilebilir; 2050'de hidrojenle çalışan en az 400 milyon araba olacaktır. Hidrojen iyileştirme ve kullanım ölçeği, 2050 yılına kadar tüm araç segmentlerinde, trenlerde ve uçakların %5'ini kapsayacaktır.

Hidrojen araçlarının ticarileştirilmesi için gelecekle ilgili bazı görüşler

Kawai'ye göre (2004, 64) FCHV'nin ticarileştirilmesinden önceki ana kaygılar güvenlik ve depolama konularıdır. Ayrıca araç kullanımını sırasında maliyet ve servis ve aracın geri dönüşümü ve elden çıkarılmasından kaynaklanan çevresel etkiler de daha fazla araştırılmalıdır. Düşük sıcaklıkta çalıştırma da FCHV'nin karşılaştığı ana teknik zorluklardan biridir, çünkü egzoz suyu düşük sıcaklıklarda donabilir ve yakıt hücresinin çalışmasını felç edebilir. (Kawai 2004, 64.) Bununla birlikte, Sperling ve Cannon (2004b, 236), bugün karşılaştıkları teknik zorluklara rağmen, hidrojen yakıt hücresi araçlarını geliştirmeye değer kılan dört ana faydayı listelemiştir. Her şeyden önce, fosil yakıtları yakan taşıtlara göre çevresel olarak üstündürler ve elektrikli motorun yüksek tork özellikleri hızlı ivmelenme sağlamaktadır. Diğer avantajlar arasında sessiz çalışma ve düşük bakım gereksinimleri olabilir (Sperling & Cannon, 2004).

Yakıt hücresi taşıtlarının önündeki en büyük engellerden biri ortak bir ağ üzerinden dağıtım eksikliğidir ve hem gaz hem de sıvılaştırılmış hidrojen fazının maliyetinin çok yüksek olmasıdır (Colpan ve diğerleri, 2018). Ortalama olarak, bir HRS'nin maliyeti 500 kg/gün için 2,4 milyon USD, bu da 1000 kg/gün'e ulaştığında 5,7 milyon USD'dir (Borgstedt, Neyer, Schewe, Paving 2017). Bu maliyetlerdeki faktörlerden biri, kurulan HRS'lerde aşırı ısınma ve aşırı doldurma gibi risklerin dikkatli bir şekilde muhafaza edilmesidir (Nizetic, 2018). Toyota, Mercedes-Benz, Honda, General Motors, Hyundai ve Nissan Otomobil şirketleri gibi YHEA'i genişletmek ve ticarileştirmek için çalışmalarına devam etmektedir. Bununla birlikte, en büyük sorun yaygın olmayan altyapıdır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, özellikle ABD'de birçok altyapı çalışmaları vardır (Offer ve diğerleri, 2010). Aynı zamanda, HRS için ortalama nakit akışı durumunda, 10 yıllık bir sürenin geçmesi gerektiği belirtilmektedir (Varga ve diğerleri, 2015).

2. ÖNCEKİ CALIŞMALAR

Dünya enerji arzı ile talep arasındaki ilişkiye bakıldığında, artan enerji ihtiyacındaki büyük etki ile enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır (Uluslararası Enerji Ajansı, 2016). Birincil enerji kaynağı ailesine dahil olan petrole ve türevlerine bağıllık da artmaktadır. Santrallerin ve ulaştırma sektörünün bu yakıtları kullandığı göz önüne alındığında, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarına yönelik eğilimin hızlandırılması gerektiği açıkça görülmektedir.

Çevresel faktörler göz önüne alındığında sınırlı rezervuarlar; Alternatif yakıtlı araçlar ile neden bu kadar ilgilenildiğini anlamayı kolaylaştırmaktadır. (Matulka, 2014, Hayes, Goodarzi, 2018) IEA'nın (Uluslararası Enerji Ajansı) raporuna (Chambers, 2018) göre, taşımacılık sektörü dünyadaki emisyonların yaklaşık %30'undan sorumludur ve bunun %70'ine yakını karayolu taşıtlarından kaynaklanan emisyonlardan oluşmaktadır.

Otomotiv endüstrisi, emisyon standartlarında ve gelecekteki hedeflerde iyileştirmeler sağlamak için elektrikli destekli modeller üretmiştir. Elektrifikasyon adımlarının otomotiv adaptasyonunu listelemek istersek şu şekilde sıralanabilir; başlat/durdur teknolojisi, mikro hibrit elektrikli araç (HEA), HEA, takılabilir HEA, elektrikli araç (EV veya akü EV [BEA]) ve son adım olarak Yakıt Hücreli Elektrikli Araç (YHEA) sayılabilmektedir. Özellikle bu kuruluşlar için, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektriğin kullanılabilirliği emisyonlarda önemli bir düşüş gösterecektir (Hidrojen Konseyi, 2017).

Her ne kadar saf elektrikle çalışan arabaların kullanılması öngörüldüğü halde 1900'lerin başında, Ford'un fabrikasyonu ve elektrik marşının icadı (Sürer, Arat, 2018) 1920'lerin başında bazı BEA modelleri ile perçinlenmiştir (Cambridge Üniversitesi, 2018). Temel olarak, aracın tekerleklerinin, içten yanmalı motorla (İYM) değil, elektrik motorundan gelen dönme gücüyle çalıştırılma prensibine dayanan EV'ler. Akü, çekirdek cihazını elektrik motoruna besleyen enerji kaynağıdır. Akü teknolojisindeki gelişmeler hızla devam ederken, General Motors (GM) Sir Grove tarafından icat edilen araçlarda yakıt hücresinin (FC) kullanımı üzerine bir çalışma başlatmıştır (Erjavec, 2013). Bu şekilde otomotiv dünyası YHEA ile tanışmıştır. FC'de elektrik enerjisi üretmek için yakıt olarak hidrojen kullanan bu sistemler; elektriksel yapıya sahip araç, teknik manevralarda EV'lere benzerlik göstermektedir. YHEA'in esası; sıfır emisyon (sadece su), daha hızlı yakıt dolumu, sessiz

sürüş, daha iyi yakıt ekonomisi ve verimlilik, kolay bakım gibi avantajları beraberinde getirmiştir (Gurz ve diğerleri 2017). Bununla birlikte, YHEA'nin bazı dezavantajları; sınırlı menzil, yetersiz hidrojen yakıt istasyonları, depolama ve güvenlik sorunları, pahalı fiyatlar, daha az tanınma ve popülerliktir.

Aralık sınırlaması örneği olarak araştırmacılar çalışmalarında bir akü hücresinin kullanabileceğini söylemiştir. Ortalama 3-5 dakikalık bir dolun süresiyle 360 mil seyahat etmek mümkündür (Hames ve diğerleri, 2018). Bir diğer önemli araştırma, “Kontrollü Hidrojen Filosu ve Altyapı Doğrulama ve Gösteri Projesi ” nin çok kısa dolun sürelerinde 250 mile ulaştığı görülmektedir (Frenette, Forthoffer, 2009).

En büyük engellerinden biri olarak ortaya çıkan durum hem EV hem de YHEA araçların teknolojik maliyetlerinin pahalı olmasıdır. Maliyet analizinde göz önünde bulundurulması gereken önemli parametreler; Araç yakıt hücresi sistemi, hidrojen yakıt istasyonları, batarya/çekiş motoru ve yaşam döngüsü değerlendirmesidir. Bugün, YHEA maliyeti, çeşitli şirketler için 55.000 – 65.000 USD arasında değişmektedir. Almanya için hazırlanan teknik bir raporda YHEA'in ayrıntılı vaka çalışmasını ve maliyet analizini vermiştir (Veziroğlu, Macario 2011). (Huss, Mass, Hass, 2013) yaptıkları çalışmaların altyapıya bakış açısına göre yatırımlarının çok büyük bir maliyet olması gerekmediğini belirtmiştir. Ayrıca (Schoettle, Sivak 2016), 2050'de otomotiv yakıt hücresi sistemlerinin 22 USD/kW'a düşeceğini bildirdi.

Öte yandan, çevresel etkinin değerlendirilmesinde, YHEA'ler hem geleneksel taşıtlardan (İYM) hem de hibrid taşıtlardan (HEA) daha yeşil bir perspektif sunmaktadır. Bu arada, İngiltere'de 2040'ta dizel ve benzinli araçların trafiğe çıkmasının yasaklanacağı (Schoettle, Sivak, 2016) ve Avrupa'nın 2050'de sera gazı (GHG) emisyonlarını %80 azaltmayı hedefliyor olması bu yönde yatırımların olacağı anlamına da gelmektedir (Bicer, Dincer, 2017). EV'ler genel şebeke elektrik hatlarını kullanır. Fosil yakıtlar, enerji kaynağının üretiminde, EV'nin bulunduğu santrallerden gelen elektriğin akü bağlantısıyla motoru çekmek için kullanıldığı enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu durumda, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde (güneş, rüzgar, okyanus vb.) kullanılması, EV'leri ve YHEA'leri daha çevre dostu hale getirecek ve “gerçek” bir sıfır emisyon değerlerine ulaşılacaktır.

Bahsedilen referanslardan tüm beklentilerde bu çalışmanın bir kısmı, hidrojenle çalışan YHEA'lerin performans ve çevre dostu olma konusunda gelecek için vazgeçilmez olacağı sonucuna varmıştır. Bu çalışmada, temel esaslar, teknik bakış, yenilikçi gelişme, fayda ve ciddiyetler, YHEA teknolojisinin son teknoloji ürünü, maliyet ve çevresel faydalar ortaya konulacaktır. Özellikle, YHEA'in en yaygın fenomenlerinden biri olan Hidrojen Akaryakıt İstasyonları (HRS), önümüzdeki çeyrek asırlık vizyona dayanan önceki çalışmalara destek vererek detaylı ve karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir.

18. yüzyıldan beri (Kaliforniya Çevre Koruma Ajansı, 2017), insanoğlu yakıt olarak suyu kullanmıştır. Zaten herkes tarafından bilindiği gibi, su hidrojen ve oksijen atomlarından oluşur. Birbirinden ayırmanın en kolay yollarından biri, suyun elektrolizidir. Yakıt hücreleri, temelde elektrolizlerin zıttı olan bir sistemle çalışan cihazlardır. Bir yakıt hücresi, hidrojenin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine ve ısıya dönüştüren elektrokimyasal bir cihazdır (Erjavec, 2013, AngloAmerikan, 2015).

Da Fonseca ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptığı çalışmada, özel olarak, çeşitli ülkelerin yakıt hücresi sistemlerindeki teknik hedeflerini incelemiştir. Yine aynı çalışmada, hidrojen tedarik tasarımı hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

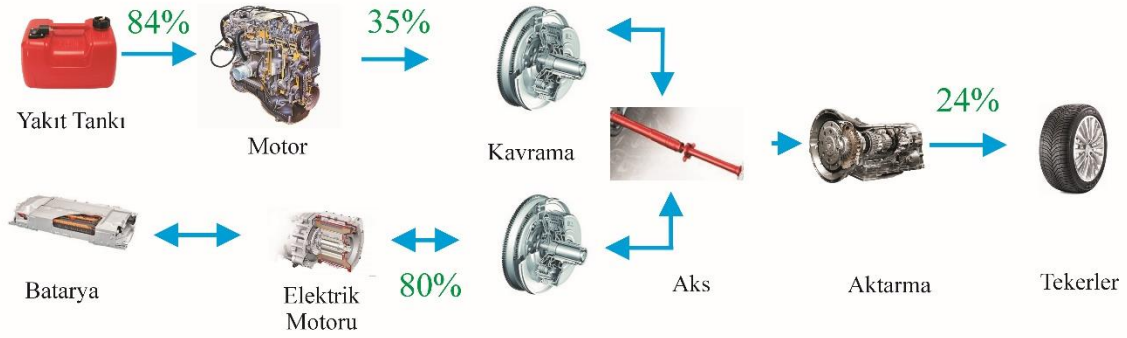
Guzella ve Antonio'nun 2007'deki araştırmasında ise, PEM için elektrot seçme genel prosedürü ve ayrıntıların sistematik açıklaması bulunmaktadır.

Yakıt pilli elektrikli araçlar yıllarca süren araştırma ve elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçların gelişimi sonucudur. Teknolojiler aynı özellikleri paylaşırsa da, enerji kaynakları birbirinden farklıdır ve içerilen WTW (well to wheel) analizlerinin eklenmesiyle Şekil 2.1.'de şematik çizimler verilmiştir. Bir yakıt hücresi tarafından üretilen enerji, aracın çekiş motoruna doğrudan güç verebilir veya bir akü veya ultrakapasitörde depolanabilir. Sistemde depolama (akü veya kondansatör) yoksa rejeneratif frenleme yapılamaz. Onlar gibi bir depolama aparatı varsa, FCHEA (Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araç) (Aouzellag, Ghedamsi, 2015) olarak adlandırılabilir.

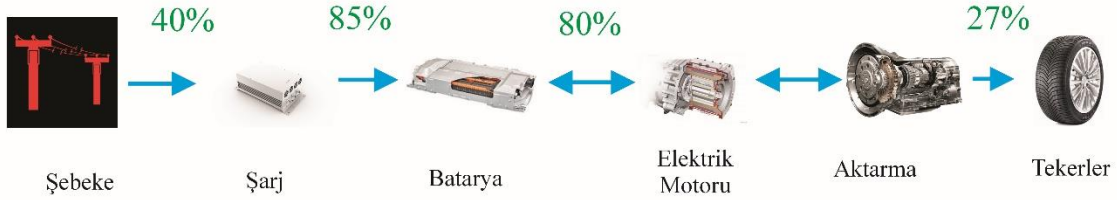
WTW Verimlilikleri



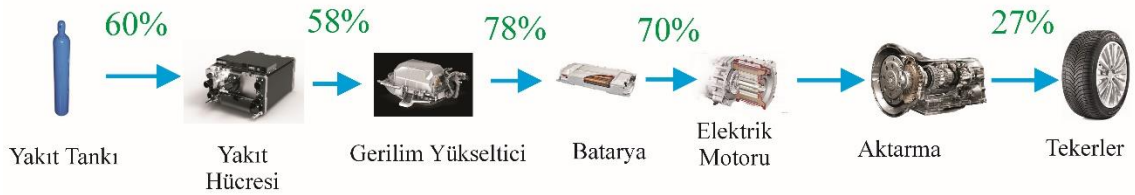
İçten Yanmalı Motor



Hibrit Elektrikli Araç



Elektrikli Araçlar



Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar

Şekil 2.1. ICE, HEA ve YHEAs WTW verimlilikleri (Fernandez ve diğerleri, 2018).

Özellikle, artırılmış ek enerji kaynakları için daha yüksek bir araç hızı ve güç artışı gereklidir. İhtiyaç duyulan tüm gücün yakıt hücresinden eldesi, hücre ömrü ve yakıt hücresi membranları üzerinde olumsuz etki yaratır. Bu problem melez mod kullanımı ile çözülebilir. Bir YHEA süper kapasitör, ultra kapasitör vb. ile kaplanırsa, bu tip FCHEA olarak

adlandırılır (Fernandez ve diğeri, 2018, Breyy, Carazo, 2017). YHEA ve FCHEA (Fernandez ve diğeri, 2018, Wang ve diğeri, 2018) arasındaki farkları anlaşılması için, çalışmalarda farklı modelleri; çeşitli pilleri ve bunların etkilerini seçme; kontrol algoritmaları ve araç standartları ve yönetmelikleri detaylı olarak tartışılmıştır. YHEA'lerin dinamik çalışma koşulları Wang ve Fan'ın 2018 yılındaki çalışmasından elde edilebilir; Bu çalışma sonucunda yük değiştirme (%56,5), start-stop (%33), yüksek güç (%5,8) ve rölantide (%4,7) enerji verileri elde edilmiştir.

Zhang ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptıkları çalışmada yakıt hücrelerinin enerji yönetim sistemi modellemesi ve optimizasyon araçları detaylı şekilde anlatılmıştır. ADVISOR'da yakıt ekonomisi ve performansının iyileştirilmesi nedeniyle 22 farklı sürüş çevrimi için optimize edilmiş enerji yönetimi stratejisi rapor edilmiştir (Grüger ve diğeri, 2018). 90 kW PEMFC yığını için sayısal olanlarla yapılan ilk deneysel karşılaştırma Thompson ve arkadaşları tarafından 2017 yılındaki çalışmalarında yapılmış olup ve 8 farklı sürüş çevrimi ile dinamik modeller ve sinir ağı arayüzleri altında simülasyon programında denenmiştir. Tipik bir yakıt hücresi aracındaki ana güç aktarma organı bileşenleri; yakıt hücresi yığını; yüksek basınçlı hidrojen besleme sistemi veya yakıt deposuna sahip reformcu; Hava besleme sistemi; Nemlendirme sistemi; yakıt hücresi soğutma sistemi, akümülatör veya ultra kapasitör, çekiş motoru ve şanzıman, kontrol modülü ve ilgili giriş ve çıkışlar üzerine çalışmalar Auzellag ve Ghedamsi tarafında 2015 yılında yapılmıştır (Aouzellag, Ghedamsi, 2015). Şekil 2.2, YHEA ve bileşenlerini göstermektedir. Ek olarak, temel modelleme denklemleri Kaliforniya Çevre Koruma Ajansı'nın 2017 raporunda detaylı bir şekilde verilmiştir (Kaliforniya Çevre Koruma Ajansı, 2017).

Polimer Elektrolit Membranı (PEM) YHEA'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. PEM yakıt hücresi, düşük çalışma sıcaklığı aralığı (100 °C'den az), küçük boyutu, yüksek verimliliği ve geniş çalışma aralığı nedeniyle otomotiv uygulamaları için tercih edilen teknolojidir (Rejlavik 2013).

Elektrikli bileşenlerin aşırı kullanımı ile kontrol stratejisinin zorluğu arasında doğru orantı bulunmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar YHEA'lerin elektrikli bileşenlerinin kontrol mekanizması üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır. Bu arada, enerji, termal ve akü yönetimi YHEA'lerde çok önemli bir olgudur. Isıtma/soğutma yönetimi de, sıcaklık oranını elde etmek için çok önemli bir noktadır. YHEA'in kontrol stratejileri hakkında Kuroki ve

arkadaşlarının 2018 yılındaki çalışmaları ile ve Xu ve arkadaşlarının 2017 yılındaki çalışmaları mevcuttur.

YHEA'in enerji skalası (Kendall, 2018, Morrison, Stevens, Joseck, 2018), ekserji dengeleme (Campinez-Romero ve diğerleri, 2018, Global Otomotiv Yönetici Anketi, 2018) ve ekserji verimliliği analizleri (Chen ve diğerleri, 2018, Ahmadi, Bathae, Hoisseinpour, 2018) hakkında çeşitli araştırmacılardan yeni çalışmalar incelenmiştir.

Hidrojen Yakıt Dolum İstasyonları (HRS) bu teknolojinin en önemli noktalarından biridir. (Ruffini, Wei, 2018, Alavi ve diğerleri, 2017) Japonya, Kore ve ABD'nin mevcut HRS'i ve 2020 - 2030 beklentileri için önemli rakamlar incelenmiştir. Munoz ve arkadaşları 2017 yılındaki çalışmasında serbest dalgalanmada yakıt ikmali davranışı açısından Almanya'daki araç paylaşım filoları üzerine detaylı bir çalışma yapmışlardır. Ek olarak, HRS üzerinde dinamik bir simülasyon yaklaşımı Wilberforce ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılmış ve deneysel veriler arasındaki benzerliklere değinmişlerdir..

Prototip, seri üretim ve yolda YHEA'ler ve aralıkları (Zhang ve diğerleri, 2018) ve son olarak bu bölüm için; (Dafalla, Jiang 2017) analizleri; 1990-2013 yıllarında elektrikli taşıtlarla ilgili toplam 91.082 adet patent almak üzere 19.375 adet tescilli patenti bulunmaktadır. Gün YHEA patentleri her geçen yıl daha da artmaktadır.

Yakıt hücreli araçların kullanımını yaygınlaştırmak ve maliyetleri en aza indirmek için, hidrojen üretiminin belirlenmesi, depolama ve dağıtım yöntemlerinin detaylıca incelenmesi gerekmektedir (Tuominen ve diğerleri, 2018, Majlan ve diğerleri, 2018). 2050 yılında, sıvı halde üretim ve dağıtım, günümüzün tercih edilen hidrojen gazlaştırma teknolojisi ile karşılaştırıldığında hidrojen fiyatını düşüreceği öngörülmektedir. Hidrojen tedarik ve dağıtım zinciri yapısının detaylı bir araştırması Xu ve arkadaşları tarafından 2017'de yapılmıştır.

Buna ek olarak, Kore hükümeti 2020 yılına kadar 100 tesis inşa etmeyi planlamaktadır (Technology Validation). İspanya'da yapılan çalışmaya göre, HRS'nin artması ve iyi konumlandırılması YHEA'in %10 ila 20 arasında talep artışına neden olacağı öngörülmektedir (Bonlender, 2017). Japonya H₂ Hareketlilik (JHyM) konsorsiyumu 2021 sonuna kadar Japonya'da 80 HRS kurmayı planlamaktadır (Gnörich, Eckstein, 2016). Çin'in

Shenzen şehrinde, 2020 yılına kadar 19,7 milyon dolar değerinde 10 HRS'nin kurulması için çalışmalara başlanmıştır. Bu HRS yatırımının 20 yıl içinde kendini ödeyeceği belirtilmektedir (Kuzeydoğu bölgesel hidrojen ekonomisi, 2017, Ulusal Hidrojen Senaryoları, 2017, Qin, Brooker, Raisi, 2017).

Bu kısımda geleceğe dair ayrıntılı bir bakış açısıyla, YHEA'lere genel bakış, daha önceki çeşitli çalışmalardan gelecek beklentilerinden gelen kritik bilgilerle tartışılmıştır. EV'lerin ve YHEA maliyetlerinin tahmini (Bique, Zondevan, 2018) ve 2040'a kadar potansiyel pazarları araştırılmıştır. Aynı çalışmaya göre, YHEA'lerin stoğu 2040 yılında 28.000.000 olarak kabul edilecek ve pazarın %10,1 payına sahip olacağı tespit edilmiştir.

Üreticiler, YHEA'leri 2020'lerden itibaren araç kartellerine koymak için şu anda fuarlarda birbirleriyle yarışmaktadırlar. Kullanıcı yorumları, hidrojen yakıt istasyonlarının yatırım planlaması, nispeten ucuz teknoloji, artan talebin bir işareti olarak YHEA. “Global Otomotiv Yönetici Anketi” (Paolo, 2007)'e göre, “Yöneticiler 2040'a kadar BEA'ler (%26), YHEA'ler (%25), ICE'ler (%25) ve melezler (%24) için benzer bir bölünme öngörüyor. YHEA'ler, bu yılki 2025 yılına kadar 1 numaralı kilit eğilim olarak BEA'lerin yerini almıştır”. 2017'de, 13 çokuluslu ulaştırma ve enerji şirketi “Hidrojen Konseyi” nin oluşumunu açıklamıştır. “Konseyin temel amacı, hidrojen ve yakıt pille çalışan taşımacılığın ticarileştirilmesini hızlandırmaktır.

Konsey önümüzdeki beş yıl içinde 10 milyar dolarlık bir yatırım yapmayı ve bu hedefe ulaşmak için uygun kamu kurumlarıyla çalışmayı planlamaktadır (Brown, Schell, Romero, Samuelsen, 2013). Toyota'nın YHEA yol haritası (La ve diğerleri, 2017), 2020 ortalarında 3 aylık periyotlar başına en az 30000 araçla önemli bir büyüme başlatmaktadır.

Itaoka ve arkadaşlarının 2017 yılındaki çalışmalarında Çin'in YHEA yol haritasını ayrıntılı şekilde incelemiş ve gelecek senaryosunu aktarmışlardır. Çalışmada, gelişme zaman çizelgesini, mevcut durumu ve gelecekteki anahtarları tartışmışlardır. Yine aynı çalışmada; Çin 2030 yılına kadar bir milyon YHEA'ye ve 1000 HRS'ye hizmet vermeyi planladığını belirtmişlerdir.

Teknik bir yöntem için (Aouzellag, Ghedamsi, 2015, Bourgeois, 2017), metal hibritlerin ve karbon nanotüplerin kullanımının gelecekte hidrojen depolama probleminin çözülmesinde

önemli bir nokta olacağı belirtilmiştir. (Yang, Cho, Yoo, 2017), yakıt hücrelerinde ekonomik olarak platin yoğunluk kullanılmasının, maliyetlerin yaklaşık olarak 0.2 g/s'ye düşürüleceğini belirtilmiştir (bugün yaklaşık olarak 0.6 g/kW'dır). Yine aynı çalışmada, sıcaklık problemi PEM'lerde kullanılan platinden ziyade paladyum ile çözülürse, YHEA'de AFC ve PAFC sistemlerinin de kullanılabilceği belirtilmiştir. Brey ve Carazo, 2017 yılındaki çalışmalarında FCHEA'in değişken enerji kaynağı şebekesi sistemi ile yapılan simülasyon çalışmalarını incelemişlerdir. Güneş, rüzgar ve yağmur suyu enerjilerinin YHEA için ana enerji sağlayıcısı olabileceğine değinmişlerdir.

YHEA otomobil imalatçılarındaki en büyük amaçlardan ikisi, aracın güvenilirliğini arttırmak ve dayanıklılık endişelerini azaltmaktır. Itaoka ve arkadaşlarının 2017 yılındaki çalışmalarında bunların Ar-Ge yatırımlarına etkilerine değinmişlerdir. (Kaliforniya Çevre Koruma Ajansı, 2017, Japonya H₂ Hareketlilik, 2018), YHEA'lerin bir meydan okuma faktörü olarak dayanıklılıklarından söz etmektedir. Ve (Kaliforniya Çevre Koruma Ajansı, 2017), çalışmasını enerji yönetimi stratejisi açısından FC sistem dinamikleri ve dayanıklılık yönleriyle literatüre eklemiştir. Bu sırada (He, Sun, Xu, Lv, 2017, Honselaar, Pasaoglu, Martens, 2018), FC dayanıklılık testi protokollerini, özelliklerini ve çalışma noktalarıyla ilgili çalışmalarda bulunmuşlardır.

Geçmiş çalışmalar ve gelecek tahminleri sonucunda; yirmi yılda, YHEA'ler daha ucuz olacağı; daha fazla menzile ve daha çok tercih edilen statüye sahip olacağı açıktır. Teknolojik gelişmeler ışığında ve (Chambers, 2018, Iordache, Schitea, 2017, Satyapal, 2018, Itaoka, Saito, Sasaki, 2017, Toyota, 2018, Bizon, Thounthong, 2018, Demir, Dincer, 2018, Arat, 2013, Arat ve diğerleri, 2016) öngörülen perspektif çalışmaları; 2025-2035, çevre dostu ve değerli fiyat-performans değerleri aracılığıyla YHEA'lerin yılları gibi görünmektedir.

En başta gelen hükümetlerin gelecek planları, altyapı ve HRS sistemleri açısından incelenmiştir.

YHEA'lerle ilgili daha ileri çalışmalar, üretim maliyetlerini en aza indirmek, güvenlik ve risk kontrollerini yaymak, HRS'leri arttırmak YHEA ve FCHEA'in hibridizasyon oranını arttırmakla yakından ilgili olacaktır. Teknik olarak gelecekteki öneriler ise; ticarileştirme, hücre ömrü ve yoğunluğu, gelişmiş soğuk çalıştırma performansı, yakıt depolama cihazlarının ve membran materyallerinin iyileştirilmesi üzerine olacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Dünya, yenilenebilir enerji kaynakları ve akıllı sistem teknolojilerinin hızlı gelişimi ekseninde mühendisliksel boyutta çığır atlamak üzere. İnsansız hava araçları, denizaltılar, süper akıllı gelişmiş uçaklar, uzay teknolojileri ve diğer gelişmiş uygulamalar bizlere dünyadaki enerji sistemlerindeki değişimleri süper akıllı aygıtlarla nasıl sunduğunu göstermektedir.

Tüm araçların üretiminde elektrifikasyon arttıkça sistem kontrolü giderek zorlaşmaya başlar ve detaylı yazılımlara ihtiyaç duyarlar. İki enerji kaynağına sahip HEA'larda bu durum biraz daha karmaşıklaşmaktadır. Hem hangi motorun ne zaman çalışıp duracağı, hem rejeneratif frenleme sayesinde geri kazanılan enerjinin bataryaya gönderilmesinde hem de yavaşlama anında elde edilecek jeneratör görevi görecektir elektrik motorunun birbirleri ile uyumlu çalışması ve kontrolleri büyük önem arz etmektedir. Hatta seri-paralel konfigürasyon HEA'larda olduğu gibi dışarıdan şarj edilebilen bir HEA (Plug-in HEA)'dan bahsediyorsak, tüm yönetim sistemlerinin (elektrik, termal, batarya, vb.) çok önemli bir şekilde modellenmesi ve üretilmesi gerekmektedir. Ayrıca yakıt hücreli elektrikli araçlar ve hibrit versiyonlarında da bu durum geçerlidir.

Mühendislik uygulamalarında en önemli adımlardan biri, prototipin üretilmesidir. Prototip dahi üretilmeden önce gerçekleştirilecek olan mamul benzetim (simülasyon) uygulamalarından biri ile modellenmelidir. Uygulayıcılara ve üreticilere hem zamandan hem masraftan kar ettiren bu benzetim uygulamaları her türlü enerji, makine ve elektrik mühendisliği uygulaması için geliştirilmekte ve kullanımları kolaylaştırılmaktadır.

HEA'nın hem mekanik hem elektrik-elektronik hem de kontrol olarak karmaşık olan yapısı; üretimden önce tüm aracın her türlü koşul ve değerlendirme için simüle edilmesini zaruri kılmaktadır. Bu yüzden, otomotiv üreticileri ve araştırmacılarının başlıca kullandıkları simülasyon programları ve örneklemeleri bu ve buna bağlı sektörlerde çalışan mühendis ve adayları için önemli bir parametre olmaktadır.

Bu sebepten, bu tez çalışmasının bu bölümü HEA ve YHEA modellemesinde yaygın olarak kullanılan simülasyon programları ve uygulamaları derlenmiştir. Çalışma, alt başlıklar olarak; amaç, ticari olarak kullanılan simülasyon programları örneklerini, örnek bir simülasyon uygulamasını ve genel sonuçları içermektedir.

3.1.1. Araçlarda kullanılan simülasyon programları

ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) programı 1994 yılında A.B.D. Enerji Bakanlığı bünyesinde bulunan NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Lab.(ABD)) laboratuvarlarında Matlab/Simulink ortamı kullanılarak hazırlanmış bir HEA teknoloji geliştiricisi simülasyon uygulamasıdır. (Wipke ve ark., 1999); (Markel ve ark.,2002); (Rajagopalan ve ark., 2003); (Erbeyler ,2007);(Wishart, 2008); (Özden, 2013); (Gahjavarestani ve ark., 2013) ve (Yaich ve ark., 2015) farklı araçlardaki farklı çalışmalarını ADVISOR programı kullanarak yapmışlardır.

Çoğu simülasyon programının yazılımını ve bloklarla birbirlerinin haberleşme ve kontrollerini sağlayan Matlab/Simulink programında her geçen gün geliştirilen sürdürülebilir kütüphane ve kod anlayışı ile hibrit elektrikli araçlar modellenmiş ve sonuçlar alınmıştır. Örneğin; (Bowles ve ark., 2000); (Boyalı, 2008); (Biliroğlu, 2009); (Demirci, 2010); (Bulgu , 2010); (Çimen, 2010), Satılmış, 2013) ve (Atalay, 2015) HEA ile ilgili çalışmalarını Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirmişlerdir.

(Kessels, 2007) otomotiv enerji ağları için enerji yönetimini esas alan bir çalışmayı CarSim simülasyon programı ile yapmıştır. Yine Matlab/Simulink ortamında yazılmış ve Simplev programına çok benzetilmiştir (Suvak, 2016).

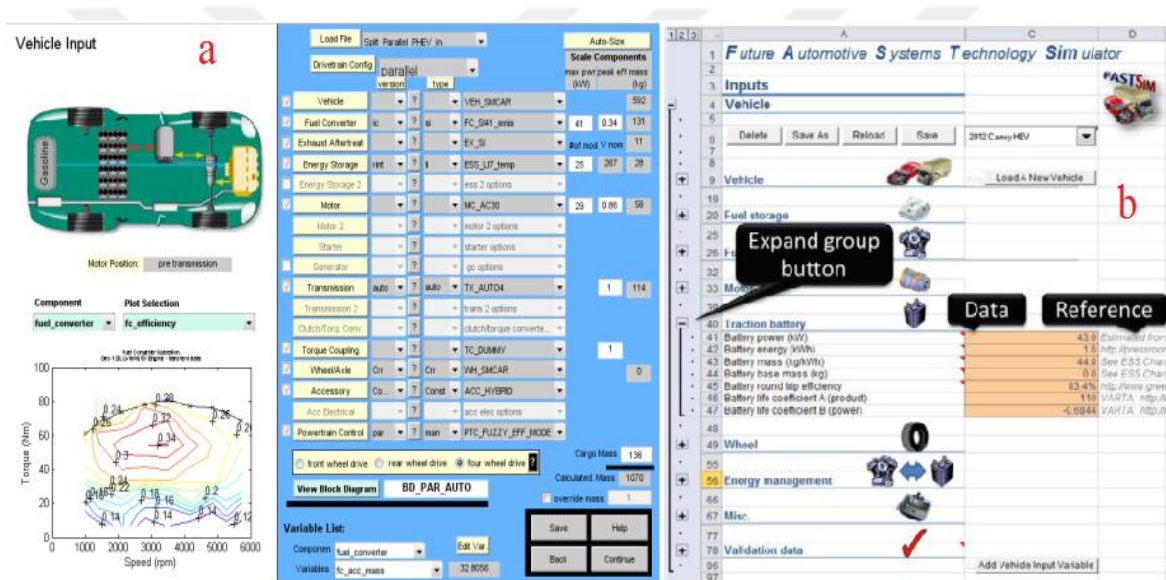
Hem hibrit elektrikli hem de saf elektrikli araçlarda kullanılan bazı programları (Suvak, 2016) şu şekilde sıralamıştır; PSAT (Powertrain System Analysis Toolkit), Advance, Hvec ve Csim. Yine aynı kaynaktan bu programlarla ilgili kısa tarihçelerine ulaşılabilmektedir.

Yine son dönemdeki teknolojik evrenlemeyle birlikte hem bu programların daha kolay kullanılması için grafik tabanlı ara-yüzler (GUI-Graphical User Interface) oluşturulmuş hem de simülasyon verilerinin kararlı ve deneysel verilerle tutarlılığının artırılması için gömülü sistemlerin kodlanması ve bunlarında döngüsel benzetim uygulamaları

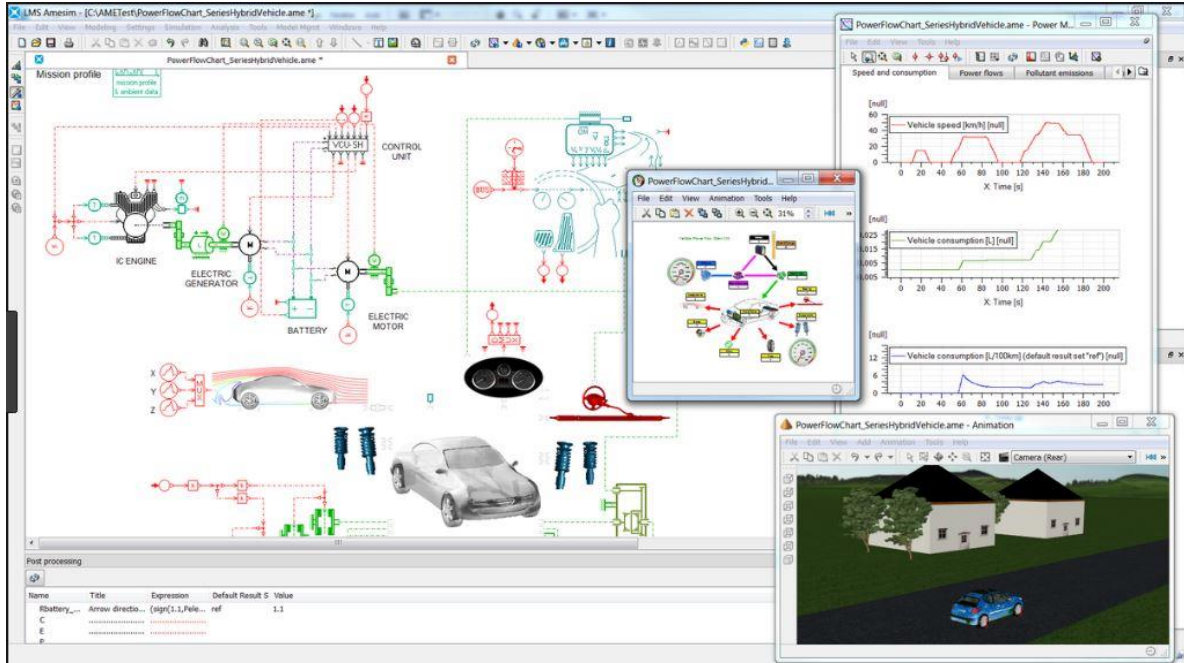
oluşturulmuştur. Döngüde donanımsal benzetim uygulamaları (HIL- Hardware-in-the-loop), döngüde yazılımsal benzetim uygulamaları (SIL-Software-in-the-loop) yeni teknolojinin ürünleri olarak mühendislere ve programcılara detaylı imkânlar sunmaktadır.

Şekil 3.1’de Advisor ve FASTSim ile ilgili ara-yüz örneklerine, Şekil 3.2’de de Siemens PLM ve Şekil 3.3’de OPAL-Rt program ara-yüzü örnekleri verilmiştir.

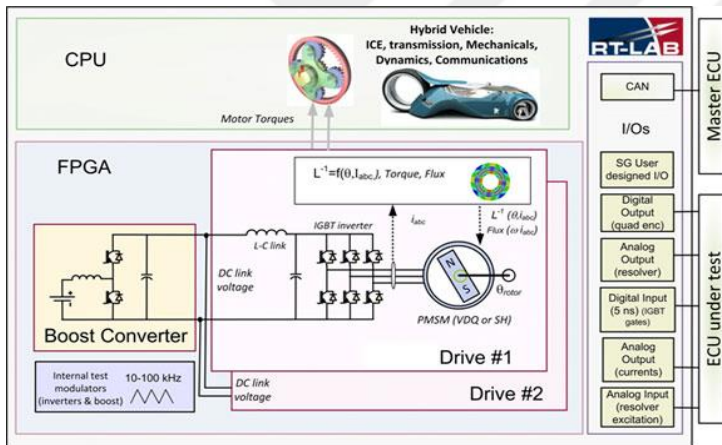
(Otlu, 2010), (Güner, 2013), (Jin ve ark., 2015), çalışmalarında AVL-Cruise programında model simülasyon oluşturulmuştur. Bu program hakkında detaylı bilgi diğer bölümde verilecektir.



Şekil 3.1. ADVISOR (a) ve FASTSim (b) Arayüzü örneği (NREL, 2018)



Şekil 3.2. Siemens PLM arayüz örneği (Siemens, 2018)



Şekil 3.3. Opal-RT arayüzü (OPAL, 2018)

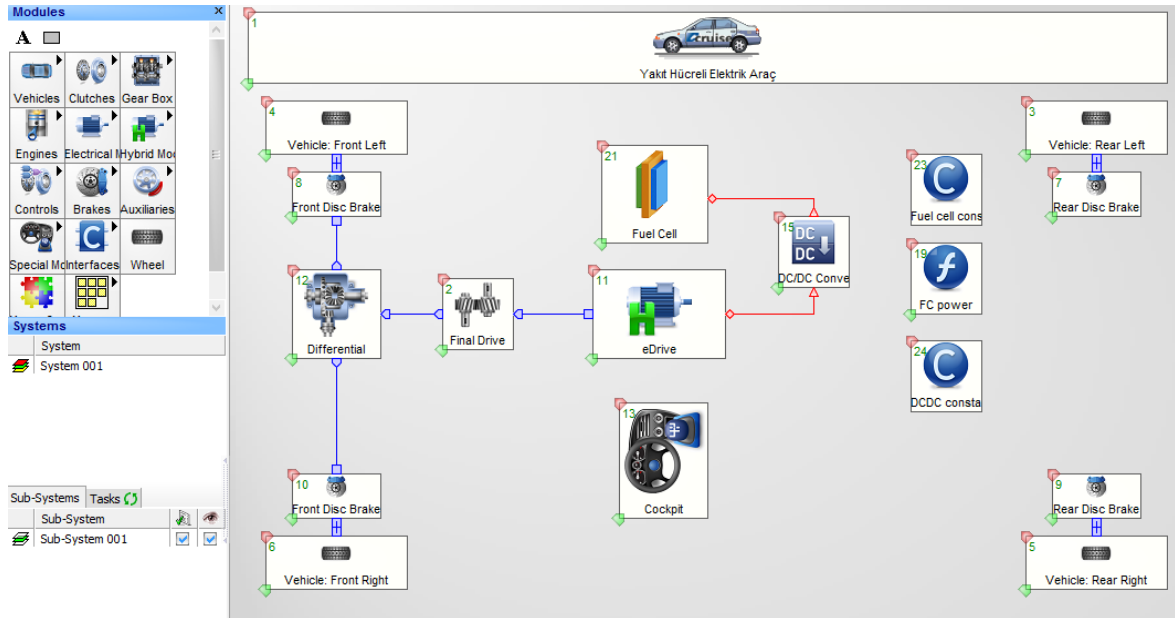
3.1.2. AVL programı

Bu bölümde AVL-Cruise simülasyon programı ile modellenmiş örnek bir yakıt pilli elektrikli aracın simülasyon safhaları ve sonuçlarına yer verilmiştir.

1948 yılında Avusturya’da Profesör Hans LIST tarafından dizel motorlar üzerine çalışılması planlanarak kurulan şirket (AVL-Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List) oğul LIST ile birlikte, Dünya’nın önde gelen mühendislik simülasyon, ölçüm, uygulama, modelleme ve gerçekleştirme şirketlerinden biri haline gelmiştir (AVL, 2018). Bünyesinde bulundurduğu temel simülasyon araçlarından biri, AVL-Cruise’ dur. Bu program ile hem

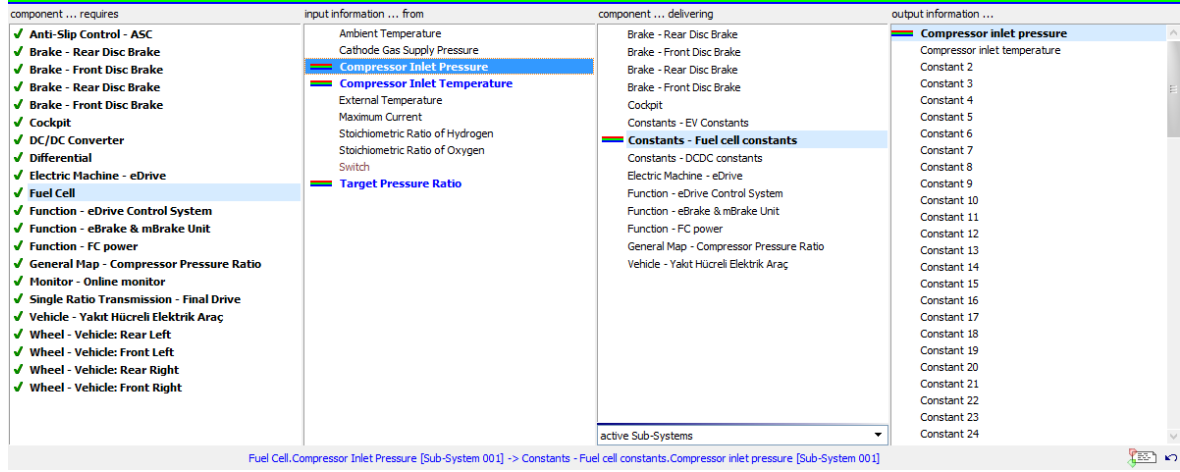
konvansiyonel hem hibrit hemde elektrikli herhangi bir aracın belli sürüş çevrimlerine göre performans, emisyon ve enerji paylaşım sonuçları farklı simülasyon ve kod yazılımları entegreleri (Matlab/Simulink, C++, vs.) ile birlikte sonuçlandırılabilir.

Şekil 3.4’de AVL Cruise içerisinde bulunan örnek bir yakıt hücreli elektrikli aracın simülasyon ara-yüzü görülmektedir. Modüller bankasından araçta kullanılacak tüm mekanik aygıtlar ve etkileşimli program seçenekleri, kullanılacak elektrikli motorlar, ana güç ünite aygıtları, güç aktarım organları ve vites kutusu, sürüş çevrimleri, kokpit ve sürücü detaylarına kadar zengin bir seçenek alanından seçim yapılabilir.



Şekil 3.4. AVL Cruise arayüzü (AVL, 2017)

Modül havuzundan seçilen komponentlerin birbiri ile bağlantısının yapılması gerekmektedir. Sistemin nasıl bağlanması isteniyorsa Şekil 3.4’de görüldüğü gibi mavi: mekanik, kırmızı: elektronik renklerle Şekil 3.5’deki gibi bağlanmalıdır.

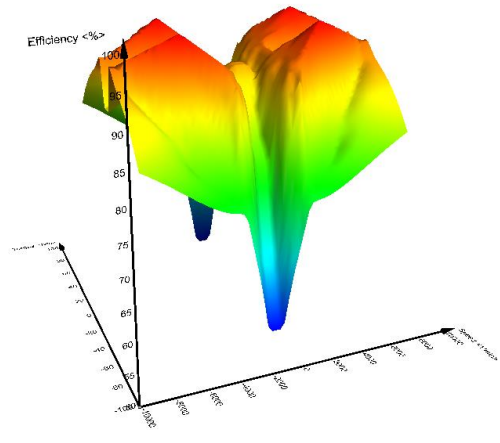
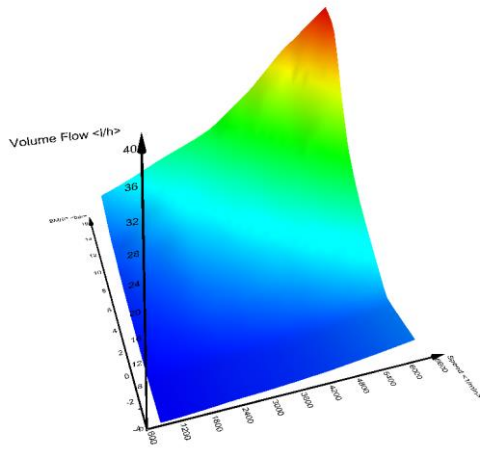
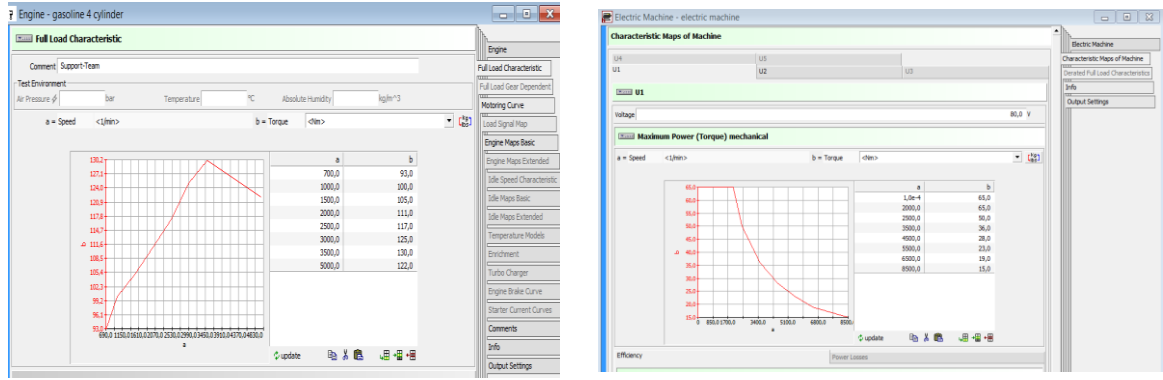


Şekil 3.5. Bağlantı ve haberleşme birimleri sayfa örneği (AVL, 2017)

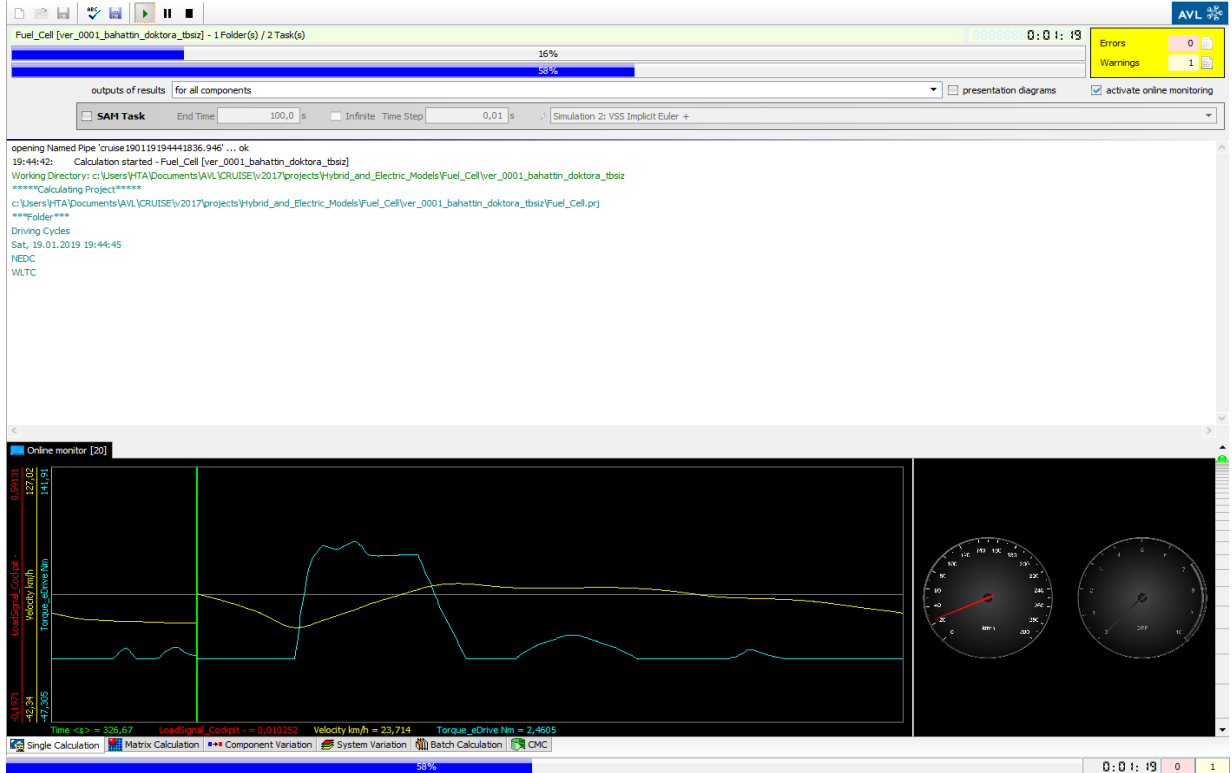
Tüm simülasyon programlarının belli bir çalışma sistemi bulunmaktadır. Kodlarla ve belli matematiksel hesaplamaların (AVL User Guide/Mathematical Models; AVL, 2014) yapılacağı sistemde, giriş şartlarının belirlenmesi ve veri olarak girilmesi gerekmektedir. Programın doğru yaklaşık sonuçları verebilmesi için program tarafından istenen bazı araç teknik özelliklerinin ya daha önce ölçülmüş olması (deneylenmiş olması) ya da üreticiden alınmış ölçülmüş veriler (fabrika verileri) olmuş olması gerekmektedir. Örneğin; Şekil 3.6'da hibrit elektrikli aracın iki ana enerji kaynağı olan içten yanmalı motor ve elektrik motorunun verilerinin girileceği bölümler resmedilmiş ve sonuçları aynı şeklin altında gösterilmiştir.

Batarya, güç aktarım organlarının seçim ve düzeni, fren, tekerler, diferansiyel, monitör, kavrama, enerji yönetim sistemi (bu örnekte Matlab/Simulink uygulamasından alınmış) ve diğer sistem özellikleri girilip birbirlerine bağlandıktan sonra; program simüle edilmeye hazır hale gelmiş olmaktadır.

Her aparatın kendi içerisinde kontrol basamağı bulunmakta ve simülasyonda verilen sınır şartları içerisinde bulunan tüm verilerin girilmemesi dâhilinde hata raporlama özelliği mevcuttur. Sistemde doğruluk raporu alındıktan sonra Şekil 3.7'de gösterilen simülasyon yürütme bölümüne geçilebilmektedir. Burada not edilmesi gereken bir önemli noktada araç, sürüş çevrimi ve kokpit ve sürücü kısmının proje alt basamağında belirlenmiş olması gerekliliğidir.

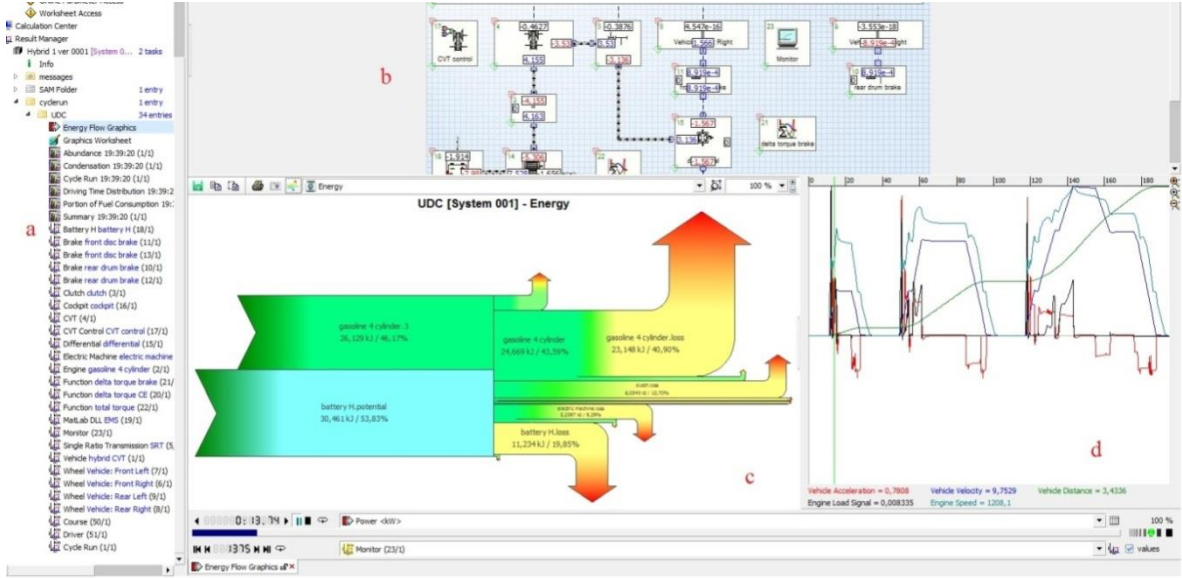


Şekil 3.6. İçten yanmalı motor karakteristik eğrisi ve elektrik motorunun verim çizimi (AVL,2014)



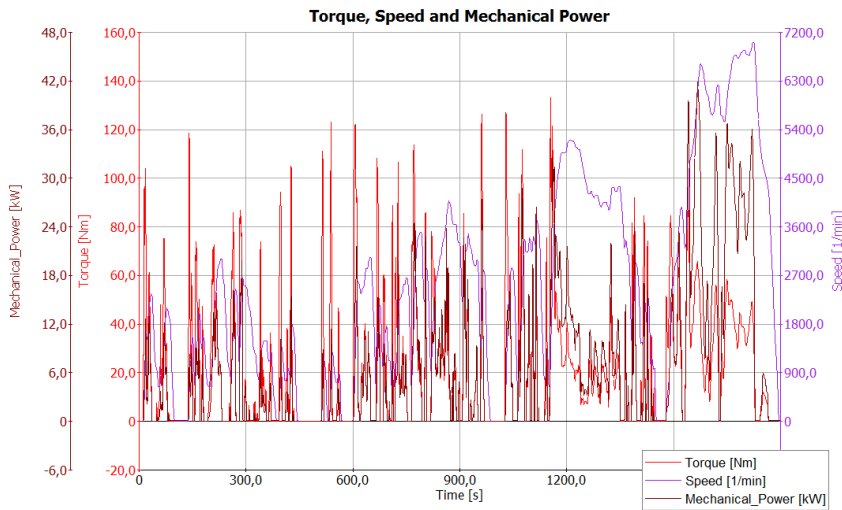
Şekil 3.7. Tekil hesaplamalı çözümlenme ekran görseli (AVL, 2017)

Sonuçlar bölümüne geçildiğinde ana raporlama sonuçları ile birlikte, farklı parametrelere göre verilen girdi verileri ile simüle edilmiş sonuçlar ağaç görseli halinde verilmektedir. Örneğin Şekil 3.8’de anlık enerji girdi/çıkışı diyagramı (Sankey) görülmektedir. Şekilde kırmızı harflerle indisenen bölümlerde görüldüğü gibi; a) sonuç ağaç çizelgesi; b) araç üzerinde anlık güç alışverişi; c) Sankey diyagramı ve d) seçilen sürüş çevrimine göre anlık sonuçların görülebileceği bölge bulunmaktadır.



Şekil 3.8. Örnek model aracın sankey diyagram sonuç örneği (AVL, 2015)

Diğer taraftan, ana sistemi oluşturan komponentlerin sonuçları için sonuç ağacında bulunan komponent seçildiğinde; o aparat ile ilgili belli başlı başlıklar halinde sonuç karşılaştırmaları, verilen girdi verilerine göre analiz edilmektedir. Örneğin Şekil 3.9'da modellenen YHEA'nin elektrik motorunun torku, hızı ve mekanik gücü; sürüş çevrim süresine göre resmedilmektedir.



Şekil 3.9. YHEA'nin elektrik motorunun tork, hız ve mekanik güç grafiği (AVL, 2017)

Üretilmesinin ana amacı; emisyonlarda ve uzun menzil arzında daha tercih edilebilen ve rakiplerine nazaran daha çevreci ve daha tasarruflu olması gereken YHEA'lerin sonuç olarak sistemden verilen genel araç sonuç örneği de Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Cycle	Fault-time [s]	Vehicle mass [kg]	Calculation	Slip	DISTANCE [m]	CONSUMPTION [l/100km]	EMISSIONS			
							NOx [g]	CO [g]	HC [g]	SOOT [g]
WLTC	1481.65	1315.0	Simulation*	Off	23267.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Overall Fuel Consumption: 0.0000 [kg]
 Idle Fuel Consumption: 0.0000 [kg]
 Acceleration Fuel Consumption: 0.0000 [kg]
 Constant Drive Fuel Consumption: 0.0000 [kg]
 Deceleration Fuel Consumption: 0.0000 [kg]
 Overall Energy Consumption: 4.0070 [kWh]

TRANSPORT EFFICIENCY RESULTS:

Fuel Consumption: 0.000 <l/100km>
 0.000 <l/(100km*t)>
 CO2 Emission: 0.000 <g/km>
 0.000 <g/(km*t)>

PHASE RESULTS: CYCLE - WLTC

Fuel Consumption: 0.00 [l/100km]
 CO2 Emission: 0.00 [g/km]
 H2 Consumption: 1.124 [kg/100km]

Şekil 3.10. Örnek model YHEA'nin genel sonuçlar tablosu (AVL, 2017)

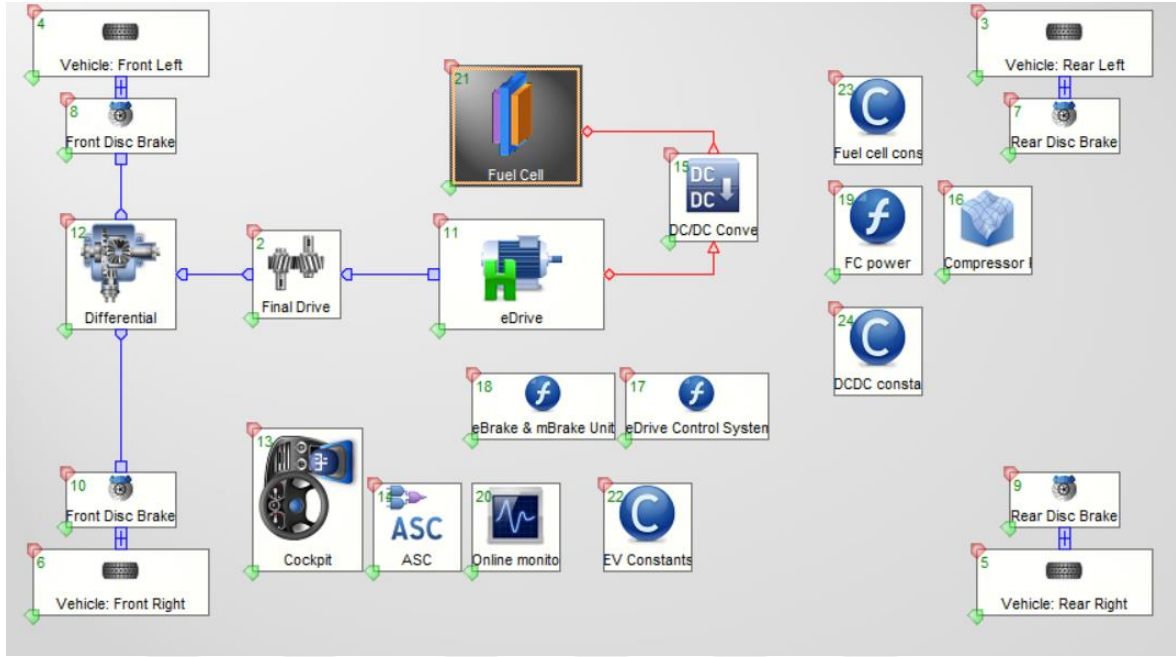
3.2. Yöntem

3.2.1. AVL cruise programındaki YHEA bileşenler

Bu bölümde AVL Cruise simülasyon programındaki komponentleri sırasıyla açıklayıp, sayısal verileri tablolar halinde verilmiştir.

Yakıt Hücresi Sistemi

Yakıt hücresi nominal voltajı 0,6 V, hücre alanı 280 cm² ve toplam 370 hücreden oluşan proton değişim zarlı bir yakıt hücresidir. Şekil 3.11'de program içerisindeki yeri ve bağlantı sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Sistemde yakıt hücresinin gösterimi

Elektriksel bağlantı formülasyonları aşağıda sıralanmıştır.

Yakıt hücresinin elektro-kimyasal modelinin voltajı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$U_{cell} = U_{oc} - \eta_0 - j_0 R_{\Omega} \quad (3.1)$$

Denklemin sağ tarafındaki üç terim açık devre voltajı, katot voltaj kaybı ve yakıt hücresinin omik voltaj kaybıdır.

Katot kaybı,

$$\eta_0 = act + t_{CCL} + t_{GDL} \quad (3.2)$$

Aktivasyon kaybı,

$$act = b \cdot \operatorname{archsinh} \left(\frac{\left(\frac{j_0}{j_0}\right)^2}{2 \frac{c_h}{c_{ref}} (1 - \exp(\frac{-j_0}{2j_*}))} \right) \quad (3.3)$$

ve CCL'deki nakliye kaybı,

$$t_{CCL} = \frac{\frac{\sigma_t b^2}{4FDc_h} \left(\frac{j_0}{j_*} \ln \left(1 + \frac{j_0^2}{j_*^2 \beta^2} \right) \right)}{1 - \frac{j_0}{j_{lim}^* \frac{c_h}{c_{ref}}}} \quad (3.4)$$

ve GDL'deki nakliye kaybı,

$$t_{GDL} = -b \ln \left(1 - \frac{j_0}{j_{lim}^* \frac{c_h}{c_{ref}}} \right) \quad (3.5)$$

ve ohmik kayıp,

$$j_0 R_\Omega = I_{stack} / A_{area} R_\Omega \quad (3.6)$$

$I_{stack} / A_{area} R_\Omega$ yakıt hücresinin aktif alanıdır.

Yığın voltajı,

$$U_{stack} = U_{cell} \cdot \eta_{cell} \quad (3.7)$$

η_{cell} yığındaki hücre sayısıdır.

Yakıt hücresi sistemine gömülü kompresör modelinde, çıkış gazı basıncı şu şekilde hesaplanır,

$$\rho_{out} = \rho_{in} \cdot \pi \quad (3.8)$$

Denklemin sağ tarafındaki iki terim, sırasıyla kompresörün giriş gazı basıncı ve basınç oranıdır. Çıkış gazı sıcaklığı,

$$T_{out} = T_{in} \cdot \pi^{\frac{k_{gas}-1.0}{k_{gas}}} \quad (3.9)$$

T_{in} ve k_{gas} , giriş gazı sıcaklığı ve sabit basınçtaki ısı kapasitesinin sabit hacimdeki ısı kapasitesine oranıdır. Kompresörün güç tüketimi,

$$P_{compressor} = m_{flow,in} \cdot \frac{1}{n_{s,c}} \cdot c_p \cdot T_{in} \cdot \left[\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (3.10)$$

$m_{flow,in}$, $n_{s,c}$ ve c_p sırasıyla, kompresör girişinin kütle akışı, kompresörün izentropik verimliliği ve sırasıyla kompresör giriş ve çıkışı arasındaki sabit basınçtaki spesifik ısının ortalama değeridir.

Yakıt hücresi yığınının akımı,

$$I_{stack} = I_{cell} + \frac{P_{compressor}}{U_{stack}} \quad (3.11)$$

Yakıt hücresinin gücü,

$$P_{cell} = U_{cell} \cdot I_{cell} \quad (3.12)$$

ve yakıt hücresinin güç kaybı,

$$P_{loss,cell} = (U_{oc} - U_{cell}) \cdot I_{stack} \quad (3.13)$$

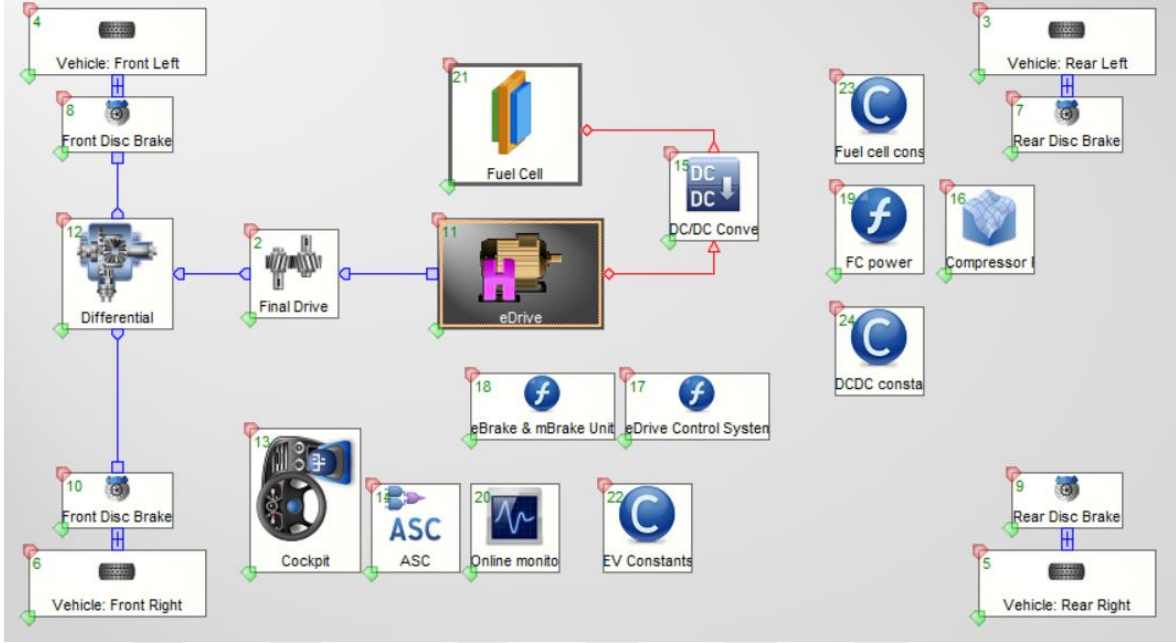
Son olarak ise yakıt hücresinin verimliliği,

$$\eta_{cell} = \left(\frac{U_{oc} - U_{cell}}{U_{oc}} \right) \quad (3.14)$$

formülasyonu ile hesaplanmaktadır.

Elektrik Makinesi

Simülasyonda nominal voltajı 320 V olup en yüksek dakikada 10000 devire kadar çıkabilen bir elektrik motoru kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Sistemde elektrik motorunun gösterimi

Elektrik motorunun mekanik formülasyonları aşağıda verilmiştir.

Aktarma organına uygulanan gerçek tork,

$$M_{EM,dt} = M_{EM} - \phi_{EM,norm}\psi_{EM} \quad (3.15)$$

Tahrik zinciri kapalıysa, makine torku şu şekilde hesaplanmaktadır,

$$M_{EM} = M_{EM,drag} \left(\frac{\psi_{EM}}{\psi_{EM,max}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Ancak aktarma organı açıksa, makine torku şu formülasyona dönüş yapmaktadır,

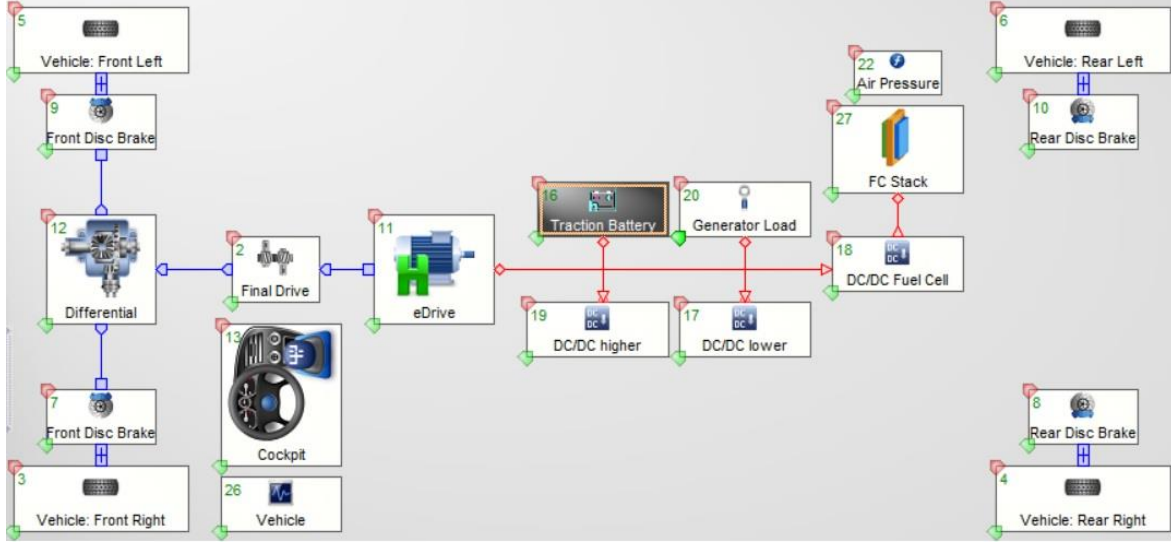
$$M_{EM} = \alpha_{EM} \cdot M_{EM,max} \quad (3.17)$$

Sabit mıknatıslı senkron makineler için, makinenin maksimum torku makine sıcaklığına bağlıdır. Sonuç olarak, maksimum PSM torku,

$$M_{EM,max,PSM} = (1 + \beta_{EM,REM}(T_{EM} - T_{EM,L}))M_{EM,max} \quad (3.18)$$

Destek Bataryası

Simülasyonda nominal voltajı 3,75 V, maksimum voltajı 4,18 V, ayrıca maksimum şarjı 19,5 Ah olan bir destek bataryası kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Sistemde traksiyon baterisinin gösterimi

Destek bataryası ile ilgili denklemler aşağıda verilmiştir.

Başlıca; rölanti gerilimi $U_{Q, idle}$, rölanti ve iç direnç $R_{Q, act}$, mevcut akü şarjı için hazırlanan üretici haritalarından yararlanılmıştır ($Q_{Q, act}$).

Anlık batarya akımı,

$$I_Q = \frac{U_{Q, net} - U_{Q, idle}}{R_{Q, act}} \quad (3.19)$$

Bataryanın ani şarjı balans hesaplaması ile belirlenir.

Aküye bağlı olan, tümleşik ağ, motor ve jeneratör gibi tüm elektrik modülleri için, bu hesaplama, cihazla birlikte verilen ana voltajda henüz emilmiş (yerleşik ağ, motor) veya serbest bırakılmış (jeneratör) akımları toplamayı sağlar.

3.2.2. Sürüş çevrimi

Yaptığımız çalışmada 2017 yılında aktif olarak kullanıma geçilmiş, gerçek sürüş verileriyle elde edilmiş ve sürüş testlerinde çok daha iyi eşleşmeler sağlamış olan Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Producere (WLTP) sürüş çevrimi kullanılmıştır.

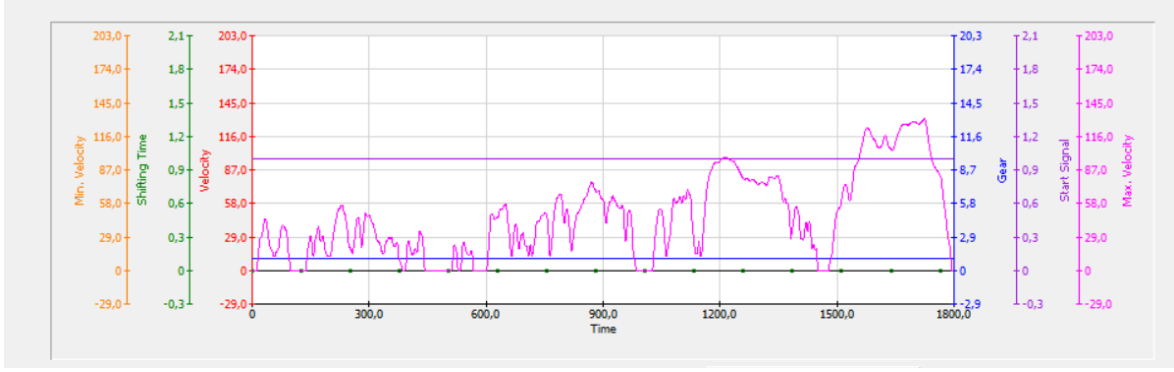
Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (NEDC) adı verilen eski laboratuvar testi 1980'lerde tasarlanmıştır. Teknolojideki gelişmeler ve sürüş koşullarından dolayı değiştirilmiştir. Avrupa Birliği bu nedenle, Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araç Test Prosedürü (WLTP) adı verilen yeni bir test geliştirmiştir. AB otomobil endüstrisi, WLTP'ye geçişi memnuniyetle karşılamakta ve bu yeni test döngüsünün gelişimine aktif olarak katkıda bulunmuştur (<http://wltfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>).

Eski NEDC testi teorik bir sürüş profiline dayanan test değerlerini belirlerken, WLTP döngüsü dünyanın dört bir yanından toplanan gerçek sürüş verileri kullanılarak geliştirilmiştir. WLTP bu nedenle günlük sürüş profillerini daha iyi temsil etmektedir.

WLTP sürüş çevrimi farklı ortalama hızlarda dört bölüme ayrılmıştır: düşük, orta, yüksek ve ekstra yüksek. Her parça çeşitli sürüş aşamaları, duraklar, hızlanma ve frenleme aşamaları içerir. Belirli bir otomobil tipi için, her bir güç aktarma sistemi yapılandırması, otomobilin en hafif (en ekonomik) ve en ağır (en düşük ekonomik) versiyonu için WLTP ile test edilmiştir.

WLTP, farklı dünya bölgelerinde küresel bir test döngüsü olarak kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir, böylece dünya çapında kirletici ve CO₂ emisyonları ile yakıt tüketim değerleri karşılaştırılabilir olacaktır. Bununla birlikte, WLTP'nin ortak bir küresel “çekirdeği” varken, Avrupa Birliği ve diğer bölgeler karayolu trafik yasalarına ve gereksinimlerine bağlı olarak testi farklı şekillerde uygulayacaktır.

30 dakikalık bir sürüş çevrimi olan WLTP'nin hız-zaman grafiği Şekil 3.14'te verilmiştir.

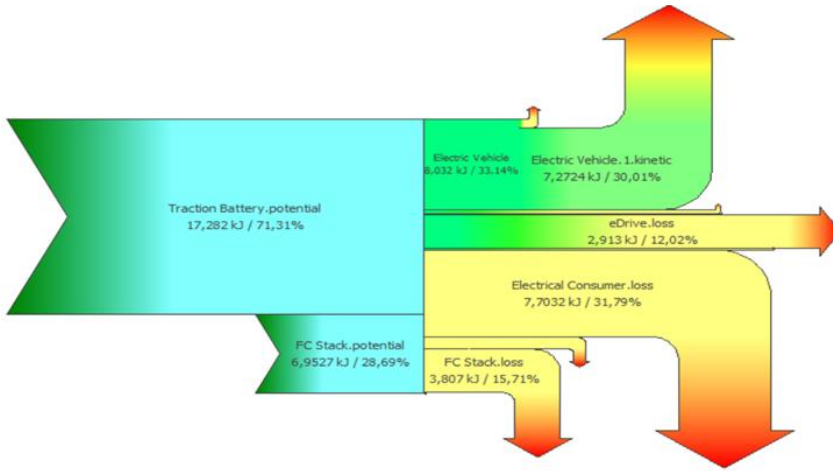


Şekil 3.14. WLTP sürüş çevrimi

3.2.3. Sankey Diyagramı

Sankey Diyagramları, akışları ve miktarlarını birbirine göre görüntülemektedir. Okların veya çizgilerin genişliği, büyüklüklerini göstermek için kullanılmakta, bu nedenle ok ne kadar büyükse, akış miktarı o kadar büyük olmaktadır. Akış okları veya çizgiler bir işlemin her aşamasında bir araya gelebilmekte veya yolları boyunca ayrılabilir. Diyagramı farklı kategorilere bölmek veya işlemin bir durumundan diğerine geçişini göstermek için renkler kullanılabilir.

Tipik olarak, Sankey Diyagramları enerji, para veya malzemelerin transferini görsel olarak göstermek için kullanılır, ancak herhangi bir izole edilmiş sistem işleminin akışını göstermek için de kullanılabilir.



Şekil 3.15. Örnek Sankey Diyagramı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Günümüz araç teknolojisinin önemli bir bölümü haline gelen elektrikli/ hibrit araç üretiminde, önemli parametreler içerisinde hiç şüphesiz en önde gelenleri enerji sağlayıcılar olarak batarya sistemleri, elektriksel dönüştürücüler ve bataryadan gelen enerjiyi hareket enerjisine dönüştürecek olan elektrik motorları ve bunların analizleridir.

Çalışmanın bu bölümünde aynı şartlara sahip olan; yakıt pilli elektrikli araç (YHEA) ile çekiş gücüne yardımcı olabilmesi için destek batarya ile eklenmiş yakıt pilli hibrit elektrikli araç (FCHEA)'lar WLTP (Dünya Çapında Uyumlu Hafif Taşıtlar Test Prosedürü) sürüş çevrimine tabi tutularak sonuçlar derlenmiştir.

YHEA ve FCHEA verilerinin analiz edilmesinde anlaşılabilirliğin ve karşılaştırmanın daha net ortaya konabilmesi için bu bölüm üç ana başlık altında incelenmiştir. İlk olarak YHEA' nin genel performans sonuçlarını etkileyecek önemli parametreler analiz edilmiş ve şekiller ile analiz edilmiştir. İkinci alt başlıkta FCHEA'in destek batarya verileri ve diğer önemli performans sonuçları irdelenmiştir. Son alt başlıkta ise; iki aracın enerji dağılımları parametrik olarak analiz edilmiş; sankey diyagramları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Enerji analizinde önemli bir yere sahip olan sankey diyagramlarının anlatımı ilgili bölümde detaylı bir şekilde izah edilecektir.

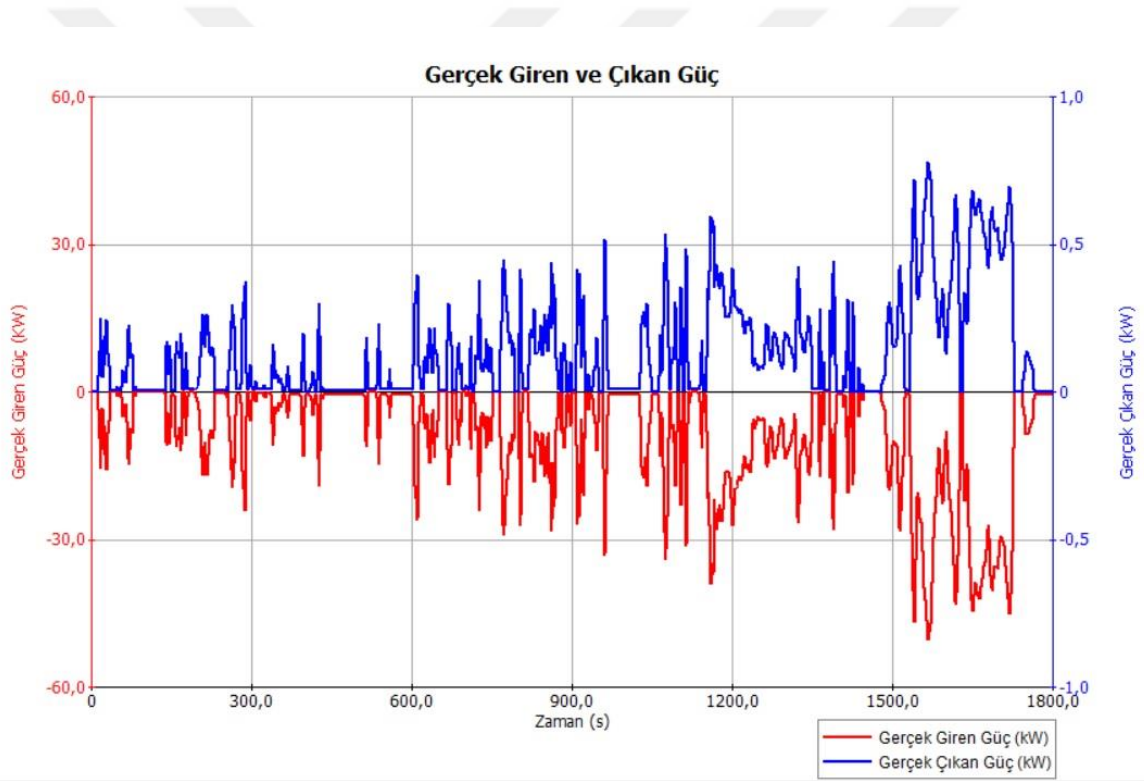
4.1. Yakıt Hücreli Elektrikli Aracın Performans Sonuçları

Elektrikli ve yakıt hücreli elektrikli araçların üretimindeki noktasal parametrelerden biri kuşkusuz uygun değer enerji efektifliğinin elde edilmesidir. Bu enerji verimliliğinin azami şekilde elde edilmesi ve kullanılabilirliğinin artırılabilmesi için; araç içinde kullanılan komponentlerin bu manada önemle analiz edilmesi gerekmektedir.

YHEA' lerde sistemi etkileyen baş aktörler; yakıt pili, elektrik motoru, evirici (DC/DC) ve çeviriciler (DC/AC) lerdir. Elektrik motorlarının çalışma verimlerinin %90'dan fazla oluşu ve araç sürüş esnasında emisyon oluşturmamaları; elektrik ve yakıt pilli elektrikli araçları sektörde ön plana taşısa da, enerji analizlerinin ve tahminlerinin tutarlı ve yerinde yapılması elzemdir. Hal böyleyken, bu alt bölümde modellenmiş YHEA aracın, DC/DC çevirici enerji giriş çıkışları; güç, akım ve voltaj parametreleri; elektrik motorunun tork hız dağılım grafiği,

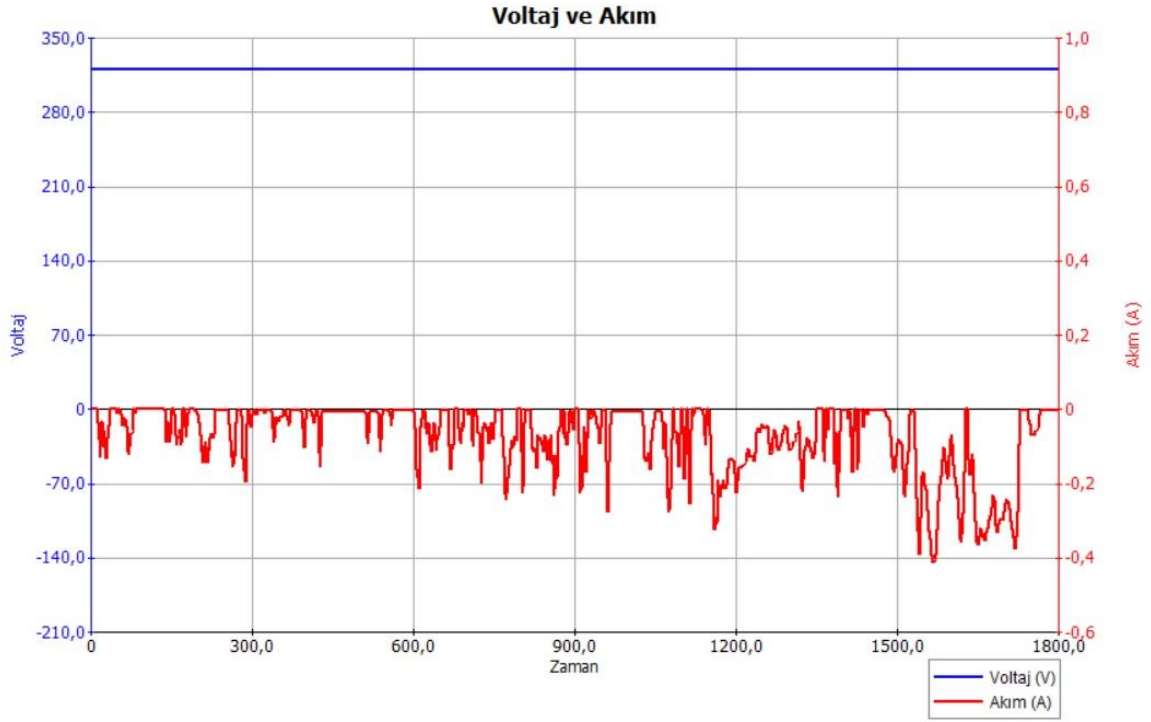
aracın ortalama elektrik enerji tüketim verileri ve yakıt hücresinde kullanılan hidrojen yakıtı, oksijen ve suyun kütleli bazda sonuçları irdelenerek verilmiştir.

Şekil 4.1’de yakıt hücreli elektrik aracın DC-DC dönüştürücü güç giriş çıkış grafiği resmedilmiştir. DC/DC dönüştürücülerin temel görevi yakıt pilinden aldıkları elektrik enerjisini, elektrik motorunun kullanabileceği forma dönüştürmektir. Bu esnada sabit dalga boyunda çalışabilecek elektrik motorlarına doğru akımın düzgün şekilde ve istenilen aralıklarda gönderilmesini de yine DC/DC eviriciler sağlamaktadır. Şekilde görüldüğü üzere; belirlenen parametrik sınır şartlarında (%93 verimlilikte); gerçek giriş ve çıkış güçleri sırası ile 51 kW ve 48 kW’tır.



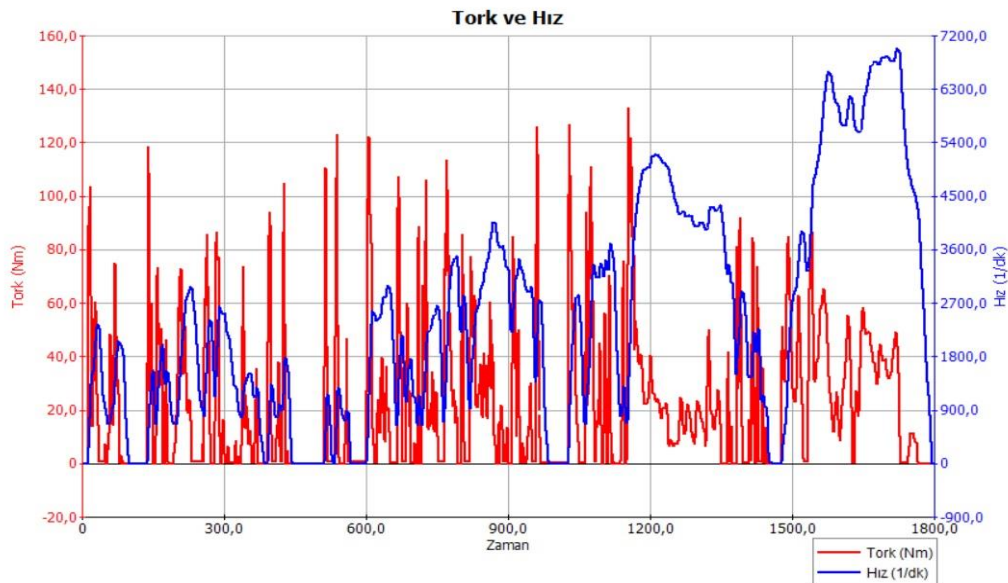
Şekil 4.1. Yakıt hücreli elektrik aracın DC-DC dönüştürücü güç giriş çıkış grafiği

YHEA DC-DC dönüştürücü akım ve voltaj grafiği Şekil 4.2’de görselleştirilmiştir. Elektrik makinesine gönderilebilecek maksimum voltaj 320 V’ta sabit tutulmuştur.

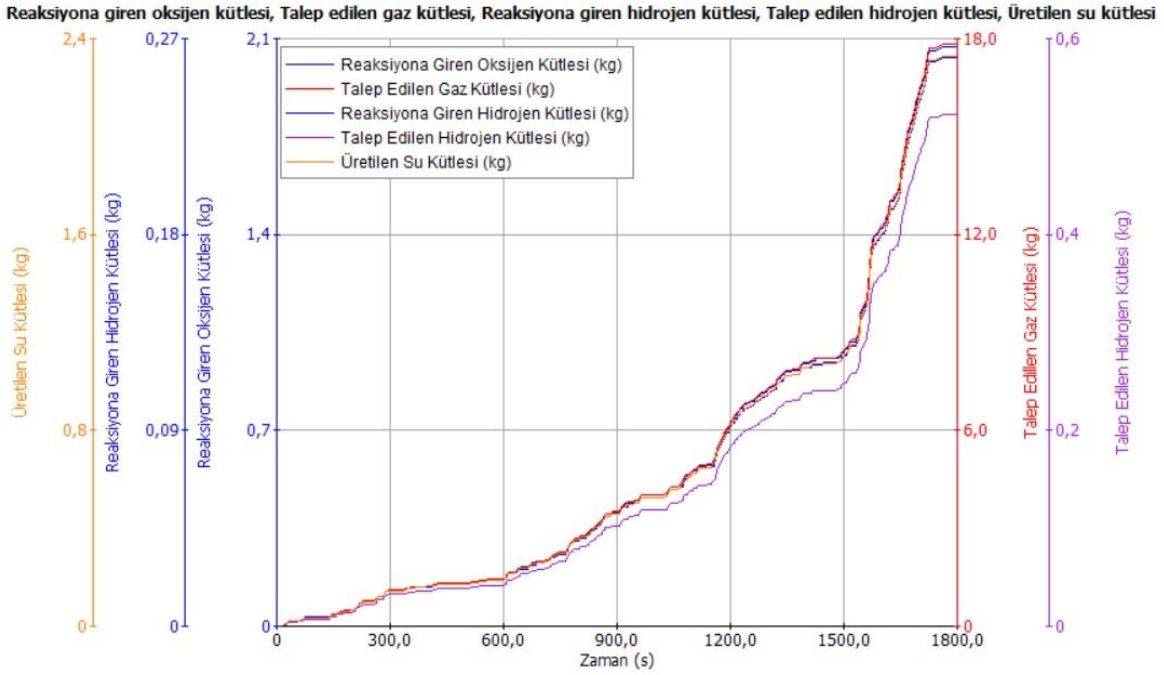


Şekil 4.2. Yakıt hücreli elektrik aracın DC-DC dönüştürücü akım ve voltaj grafiği

YHEA için seçilen elektrik motoru daha önce bahsedildiği gibi 10000 devir/dak azami dönme hızına sahip olan indüksiyon motorudur. Seçilen sürüş çevriminin süresine göre yapılan testte; maksimum tork 135 Nm ve maksimum hızda 7000 devir civarlarında kaydedilmiştir. Özellikle aracın hızının arttığı yani elektrik motorunun devrinin arttığı 20 - 30 dakikalığı arasında; şekilden de görüleceği üzere elde edilen tork düşmektedir.

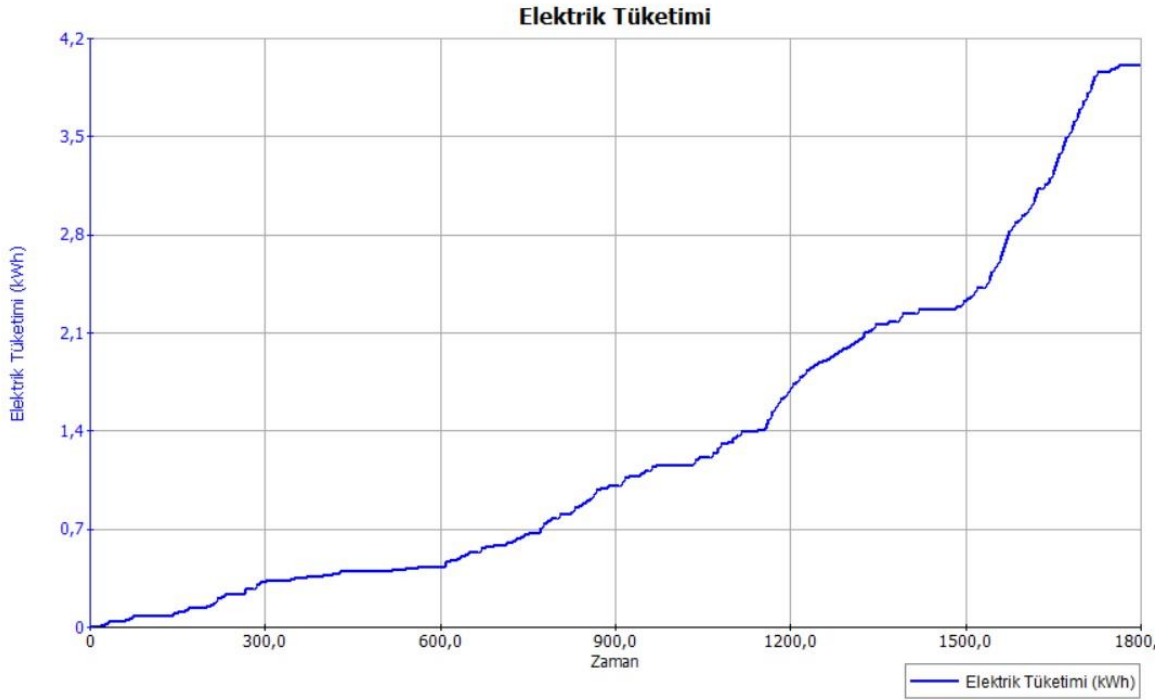


Şekil 4.3. Yakıt hücreli elektrik aracın elektrik motor tork ve hız grafiği



Şekil 4.4. Yakıt hücreli elektrik aracın yakıt hücresi oksijen, hidrojen ve su kütlesi grafiği

YHEA lerin kalbi, ismini aldıkları yakıt pilleridir. Detaylı çalışma prensiplerinin önceki bölümlerde detaylı anlatıldığı yakıt pillerinin, kullandıkları hidrojen ve oksijen miktarı ile ortaya çıkardıkları su buharının kütle bazda resmedilmiş hali Şekil 4.4'te görülmektedir. Zaman-kütle (sn-kg) bandında oluşturulan grafikten de açıkça görüleceği gibi, yüksek hızlarda ve ani enerji ihtiyacında hidrojen ve oksijen gereksinimi aynı doğrultuda artacak şekilde bir grafik oluşturmuştur. Şekil 4.5'de aracın genel elektrik tüketimi resmedilmiştir. Ortalama olarak 4,007 kWh elektrik tüketimini WLTP sürüş çevrimine göre gerçekleştirmiş bu esnada da yakıt pili içerisinde 1,124 (kg/100 km) hidrojen tüketmiştir.



Şekil 4.5. Yakıt hücreli elektrik aracın elektrik tüketim grafiği

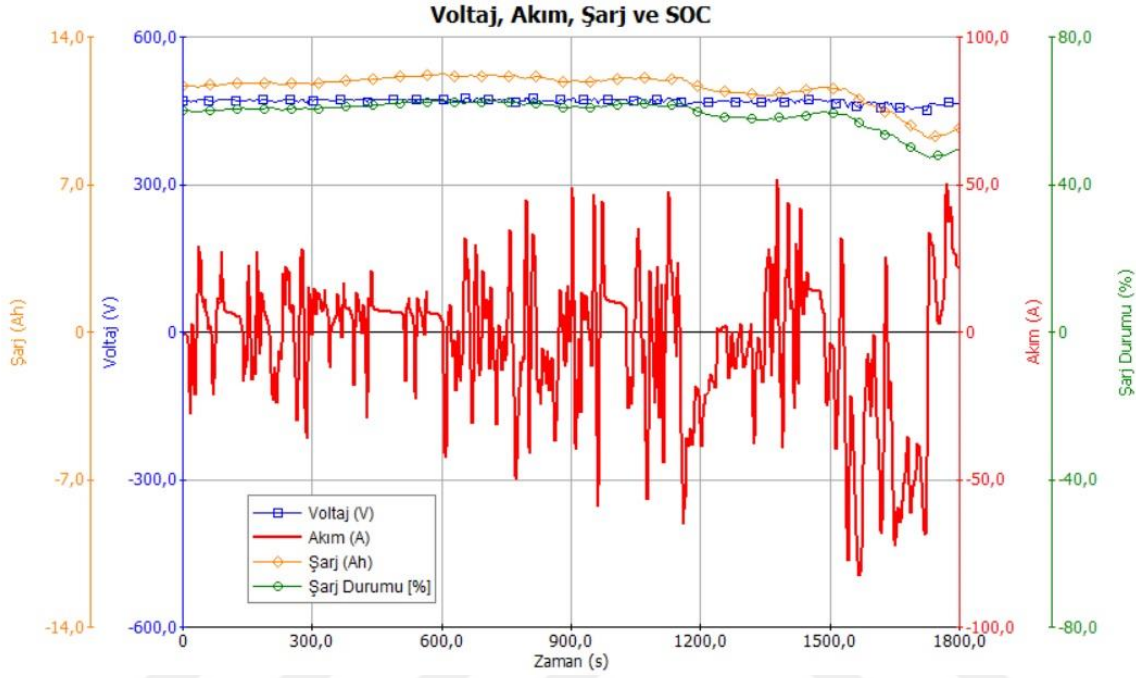
4.2. Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Aracın Performans Sonuçları

YHEA araçların gerek menzilleri gerekse enerji kabiliyetlerini artırmak için hibritleştirilmesi, otomotiv ve makine mühendisliğinin yeni çalışmaları arasındadır. Özellikle elektrifikasyonun giderek arttığı yeni nesil araçlarda, enerji optimizasyonunun önemi giderek artmaktadır.

YHEA araçların muhtemel hibritleşme olanakları arasında günümüzde kullanılan iki ana komponent bulunmaktadır. Bunlardan biri destek aküsü (traction battery) diğeri de süper kapasitörlerdir. Bu elektrikli aygıtların ana görevi, yakıt pili ile çalışan araçlarda enerji sarfiyatının bir bölümünü, yakıt piline yardımcı olmak adına üstlenmeleridir. Bu çalışmada YHEA hibritleştirilirken batarya destekli (traction battery) olarak modellenmiş ve karşılaştıra buna göre gerçekleştirilmiştir.

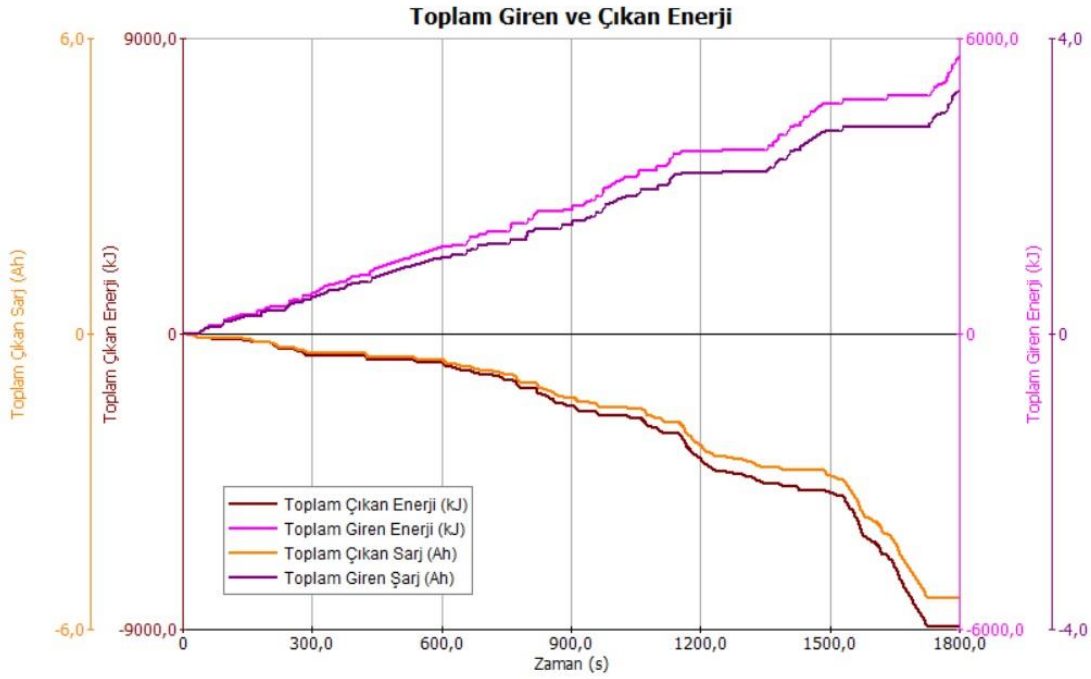
Bu bölümde batarya destekli hibrit aracın performans sonuçları irdelenmiştir. Şekil 4.6'da batarya voltajı sürüş çevrimi boyunca 400-500 V arasında seyir ederken, maksimum şarj değeri 19,5 Ah olan batarya, %60 verimle 10 Ah değerlerinde belirlenmiştir. Bataryanın şarj durumu olarak belirlenen State of Charge (SOC) değeri ise sürüş çevriminin başlarında %60

civarlarında ilerlerken, çevrimin sonlarına doğru yüksek hızlarda bataryanın yakıt hücresine desteğinden ötürü %50 değerlerinin altına inmiştir. Akım değerleri ise sürüş çevrimi boyunca -80 ila 50 A arasında seyrine devam etmiştir.



Şekil 4.6. Yakıt hücreli hibrit aracın batarya voltaj, akım, şarj ve SOC değerleri grafiği

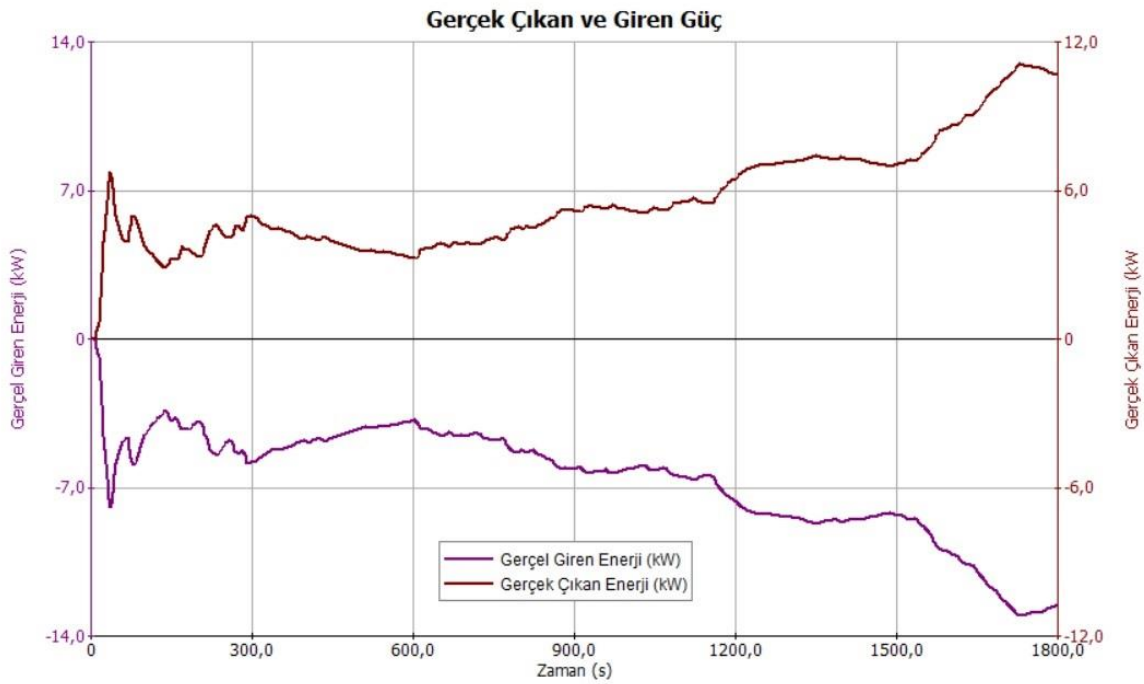
Yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın batarya giriş çıkış enerji değerleri grafiği Şekil 4.7’de belirtilmiştir. Bataryanın giriş enerji değeri sürüş çevrimi sonunda 6000 kJ değerlerine ulaşırken, çıkış enerji değeri ise 9000 kJ’dur. Yine aynı şekilde batarya giriş şarjı sürüş çevrimi sonunda 3,8 Ah değerlerinde iken, çıkış şarjı 5,8 Ah değerlerine ulaşmıştır.



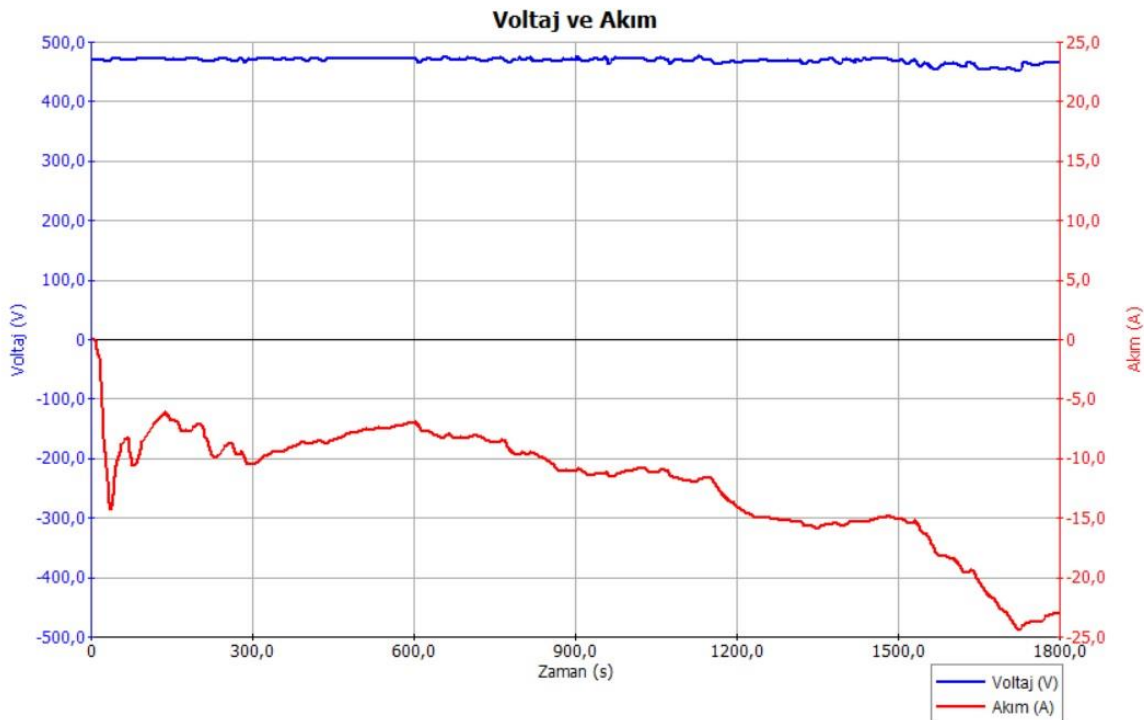
Şekil 4.7. Yakıt hücreli hibrit aracın batarya giriş/çıkış enerji değerleri grafiği

Yakıt hücreli hibrit aracın DC-DC dönüştürücü güç giriş çıkış grafiği Şekil 4.8'de resmedilmiştir. Yine yakıt hücreli elektrikli araçta kullanılan DC-DC dönüştürücü gibi %93 verimli iki dönüştürücü kullanılmıştır. Bunlardan biri yüksek DC-DC dönüştürücü olarak ifade edilmiş ve 600 V'u 300 V'a dönüştürmüştür. Diğer bir DC-DC dönüştürücü ise düşük DC-DC dönüştürücü olarak isimlendirilerek 600-12 V dönüşümü yapmaktadır. Yüksek DC-DC dönüştürücü etki bataryası için; düşük DC-DC dönüştürücüsü ise jeneratör terminali için kullanılmıştır. Şekil 4.8'de ki grafikte verilen 600-12 V dönüşümü sağlayan DC-DC dönüştürücünün güç giriş çıkış grafiğidir. Grafikten de okunacağı üzere sürüş çevrimi sonu giriş ve çıkış değerleri sırasıyla 11,8 ile 10,9 kW'dır.

Yakıt hücreli hibrit aracın DC-DC dönüştürücü akım ve voltaj grafiği Şekil 4.9'da resmedilmiştir. Yüksek net voltaj 490 V değerlerinde hafif dalgalı olarak sürüş çevrimi boyunca ilerlemektedir. Akım değerleri ise sürüş çevrimin ilk dakikalarında sert bir yükseliş ile birlikte daha sonraki dakikalar ve sürüş çevrimi boyunca daha az yükselme ivmesi göstermiştir. Sürüş çevriminin sonunda elde edilen akım değeri yaklaşık olarak -23 Amper civarlarındadır.



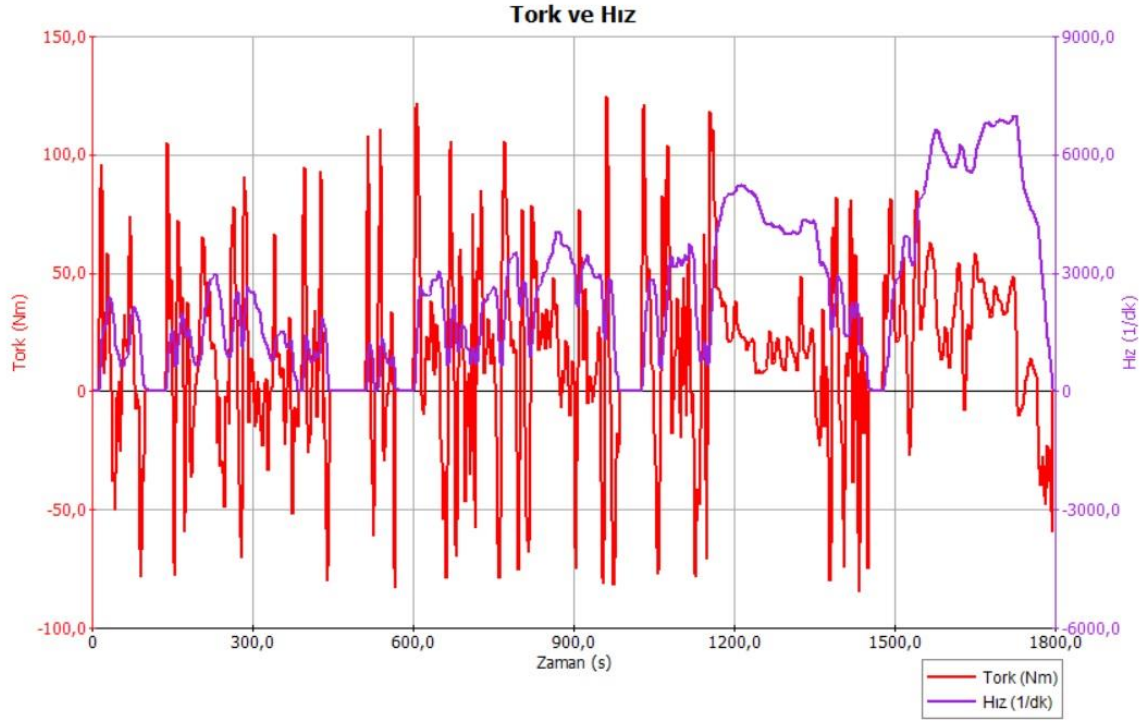
Şekil 4.8. Yakıt hücreli hibrit aracın DC-DC dönüştürücü güç giriş çıkış grafiği



Şekil 4.9. Yakıt hücreli hibrit aracın DC-DC dönüştürücü akım ve voltaj grafiği

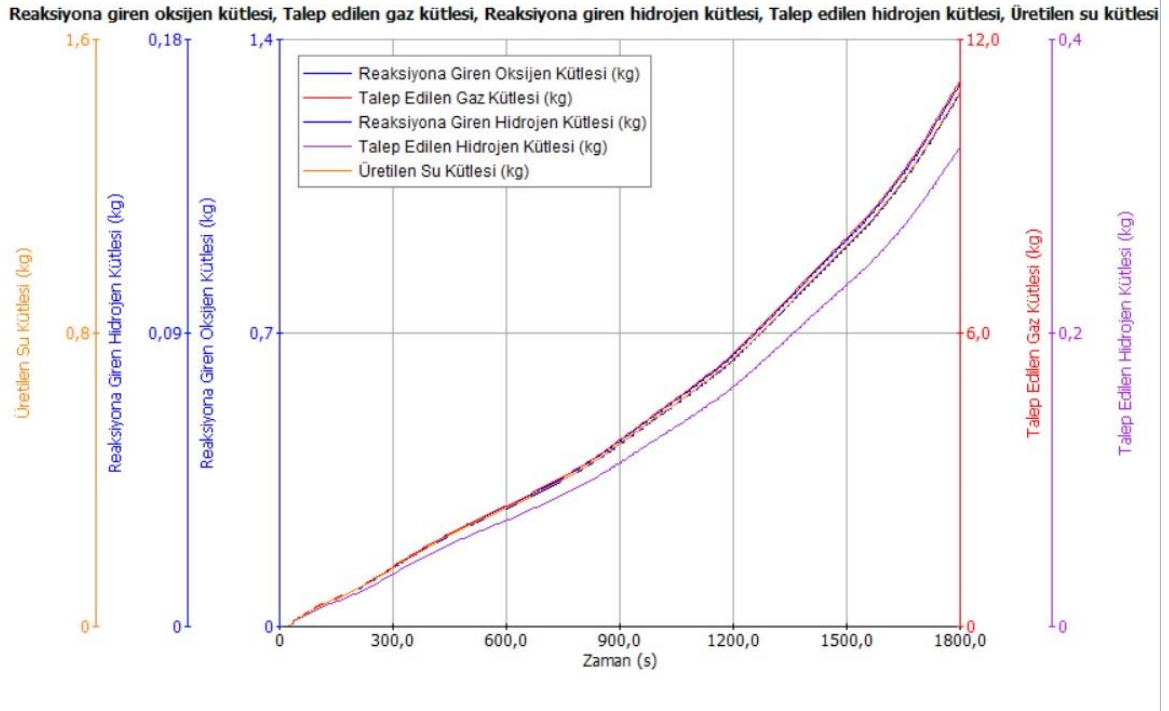
Yakıt hücreli hibrit aracın elektrik motor tork ve hız grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araçta kullanılan elektrik motoru ile özellikleri aynı olduğu için yine

azami hızı 10000 dev/dak'dır. Maksimum tork ile maksimum hız sırasıyla 130 Nm ile 7000 dev/dak olarak belirlenmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç tork ve hız grafiğinden farklı olarak burada dikkati çeken nokta torkun sürüş çevrimin belli noktalarında – yönlü eğilimidir. Bunun nedeni ek batarya destek sistemi ve rejeneratif frenlemenin etkisidir.

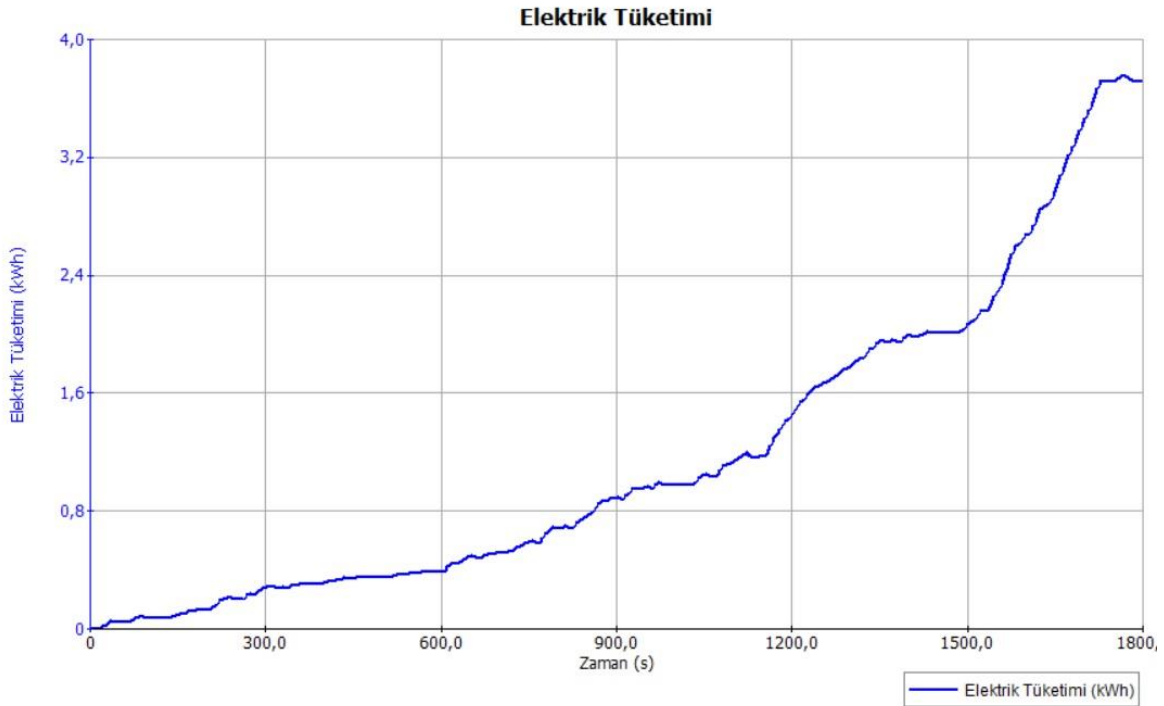


Şekil 4.10. Yakıt hücreli hibrit aracın elektrik motor tork ve hız grafiği

Yakıt hücreli hibrit aracın yakıt hücresi oksijen, hidrojen ve su kütlesi grafiği şekil 4.11'de verilmiştir. Yine yakıt hücreli elektrikli araçta olduğu gibi, yüksek hızlarda ve ani enerji ihtiyacında hidrojen ve oksijen gereksinimi aynı doğrultuda artacak şekilde bir grafik oluşturmuştur. Aracın genel elektrik tüketimi Şekil 4.12'de resmedilmiştir. Ortalama olarak 3,710 kWh elektrik tüketimini WLTP sürüş çevrimine göre gerçekleştirmiş bu esnada da yakıt pili içerisinde 0,701 (kg/100 km) hidrojen tüketmiştir. Hibrit olmayan modeline göre; hibrit versiyonda %8 elektrik sarfiyatı ve %32 hidrojen yakıtı azalması elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Yakıt hücresi hibrit aracın yakıt hücresi oksijen, hidrojen ve su kütlesi grafiği



Şekil 4.12. Yakıt hücresi hibrit aracın elektrik tüketim grafiği

4.3. Parametrik Enerji Dağılım ve Analiz Karşılaştırması

Enerji analizleri, her türlü sistemin düzgün ve verimli çalışıp çalışmadığının ortaya koyulabilmesi için yapılan ve özellikle makine mühendisliğinin önemli uygulama saha ve safhalarında vaz geçilmez olan parametrik hesaplamaların başında gelmektedir. Bir sisteme giren ve sistemden alınan verim doğrultusunda harcanan enerjinin hesaplanması ve bu hesaplamaların sınır şartlarının düzgün belirlenebilmesi için yapılan işlemler 3. Bölümde bahsedilen ve genel olarak enerji girdi ve çıktıların analiz edilebileceği sankey diyagramları ile basit ve anlaşılır halde izlenebilmektedir.

Tezin bu bölümünde, YHEA ve hibrit versiyonu olan FCHEA arasında; belirlenen sürüş çevrimi için (WLTP) araç enerji analizleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.13'ten Şekil 4.25'e kadar; belirlenen zamanlarda alınan veriler ışığında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Anlık karşılaştırmaların zamanlaması WLTP sürüş çevriminin önemli noktalarını kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Başlangıçtan bitiş noktasına kadar analiz edilen sankey diyagramlarının zamanlamaları şu şekilde sıralanmıştır: 0:11; 0:33; 0: 49; 7:41; 13:13; 15:00; 17:43; 19:46; 24:36; 26:16; 27:50; 28:45 ve 30:00' dur.

Enerji analizi yapılırken dikkat edilen ilk nokta; enerji kaynağı, enerji dağılımı ve kayıplar olarak belirlenmiştir. YHEA'de enerji kaynağı sadece yakıt pili olduğundan; giriş enerjisi yakıt pili yoğunluğu olarak gösterilmiş; değerleri ve yüzdece payları ile verilmiştir. FCHEA' de ise hibrit itki sistemi elemanlarından yakıt pili ve etki bataryası giriş enerji kaynakları olarak görülmektedir.

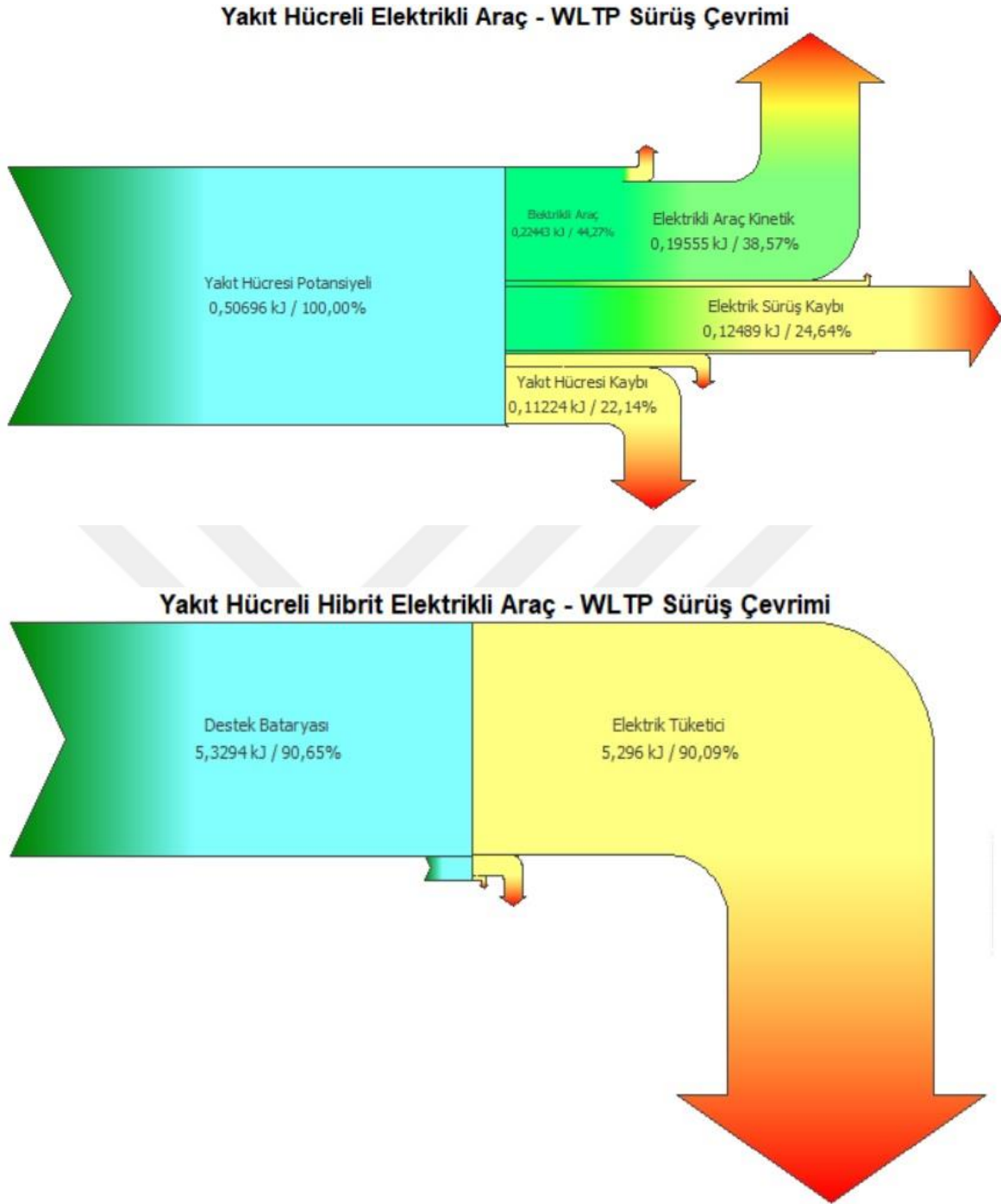
Enerji harcanması kısmında ise; YHEA için; araç kayıpları, fren kayıpları, elektrik sürüş kayıpları ve yakıt hücresi kayıpları olarak minimize edilebilmektedir. FCHEA içinse; bunlara ek olarak DC-DC dönüştürücü kayıpları ve terminal kayıpları göz önünde bulundurulmaktadır. Seçilen anlık verilerin değer ve yüzdece dağılımları Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. YHEA sankey analiz değerleri ve yüzdece dağılımları

Zaman	Enerji Girdisi		Enerji Çıktısı							
	Yakıt pili Potansiyeli		Araç Kayıpları		Fren Kayıpları		Elektrik Sürüş Kayıpları		Yakıt Hücresi Kayıpları	
	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)
0:11	3,314	100	1,478	44,61	-	-	0,669	20,82	0,868	26,19
0:33	271,51	100	128,73	47,41	-	-	28,56	10,52	92,022	33,89
0:49	291,34	100	54,438	18,69	67,484	23,16	31,635	10,86	97,981	33,63
7:41	2318,2	100	536,19	23,13	567,19	24,47	248,84	10,73	783,61	33,80
13:13	4644	100	996,43	21,46	954,46	20,55	489,57	10,54	1617,7	34,83
15:00	6073,4	100	1442,6	23,75	1194,5	19,67	636,89	10,49	2135,5	35,16
17:43	7370,7	100	1782,0	24,18	1635,3	22,19	754,74	10,24	2630,2	35,68
19:46	10186	100	2289,5	22,49	1874,4	18,40	960,24	9,43	3856,5	37,86
24:36	14134	100	4080,4	28,87	2268,3	16,05	1450,4	10,26	5298,5	37,49
26:16	18534	99,12	4830,6	25,84	2320	12,41	1707,2	9,13	7832,6	41,89
27:50	23775	99,22	6564,7	27,40	2334,6	9,74	2073,8	8,65	10671	44,53
28:45	27942	99,27	7925,2	28,15	2334,6	8,29	2351,9	8,36	12945	45,99
30:00	28249	99,27	8583,4	30,16	2710,2	9,52	2401	8,44	13052	45,87

Çizelge 4.2. FCHEA sankey analiz değerleri ve yüzde dağılımları

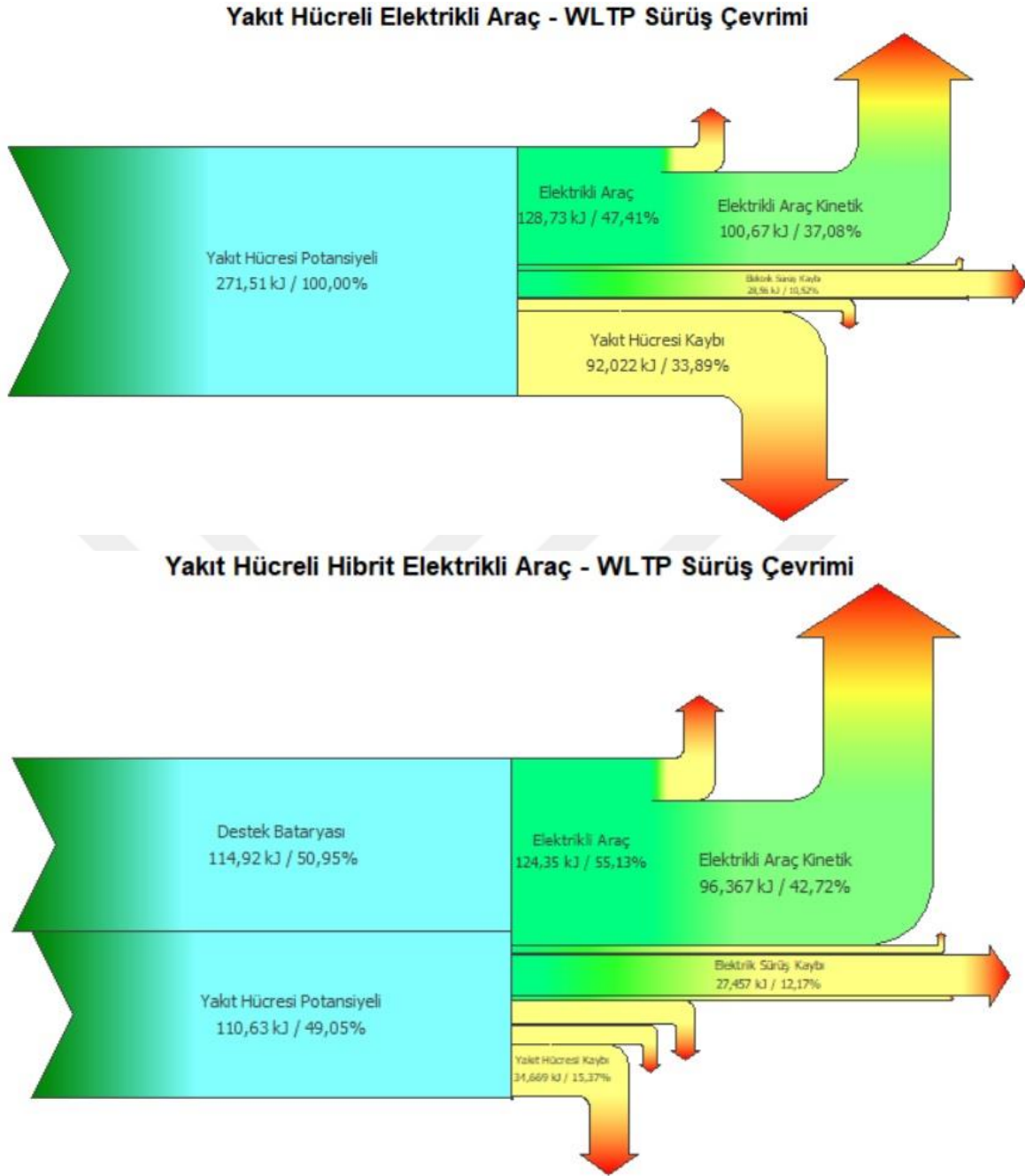
Zaman	Enerji Girdisi						Enerji Çıktısı					
	Yakıt pili Potansiyeli		Batarya		Araç Kayıpları		DC/DC Kayıpları		Terminal Kayıpları		Yakıt Hücresi Kayıpları	
	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)	(kJ)	(%)
0:11	0,54	9,33	5,32	90,65	-	-	0,38	7,34	4,81	91,93	-	-
0:33	110,63	49,05	114,92	50,95	124,3	55,1	12,59	5,58	15,8	7,04	34,66	15,37
0:49	279,6	100	-	-	54,86	19,6	30	10,7	23,5	8,44	91,23	32,63
7:41	3161	100	-	-	538	17	340	10,7	221	7	1000	31,65
13:13	5272	100	-	-	996	19	571	11	381	7,2	1657	31,44
15:00	6167	100	-	-	1444	23	665	11	432	7	1946	31,56
17:43	7661	100	-	-	1789	23,3	822	10,7	511	6,67	2435,5	31,79
19:46	8865,7	100	-	-	2287	25,8	947,7	10,7	570	6,43	2833	31,96
24:36	12571	98,64	173,13	1,36	4092	32,1	1322	10,8	710	5,57	4108	32,2
26:16	13891	90,86	1397	9,1	4840	31,6	1456	9,52	758	4,96	4566	29,87
27:50	15433	84,19	2898	15,81	6576	35,8	1607	8,77	803	4,38	5121	27,94
28:45	16485	79,89	4148	20,11	7910	38,3	1708	8,2	829	4	5511	26,71
30:00	18047	84,08	3417	15,92	8602	40	1857	8,6	866	4	6098	28,41



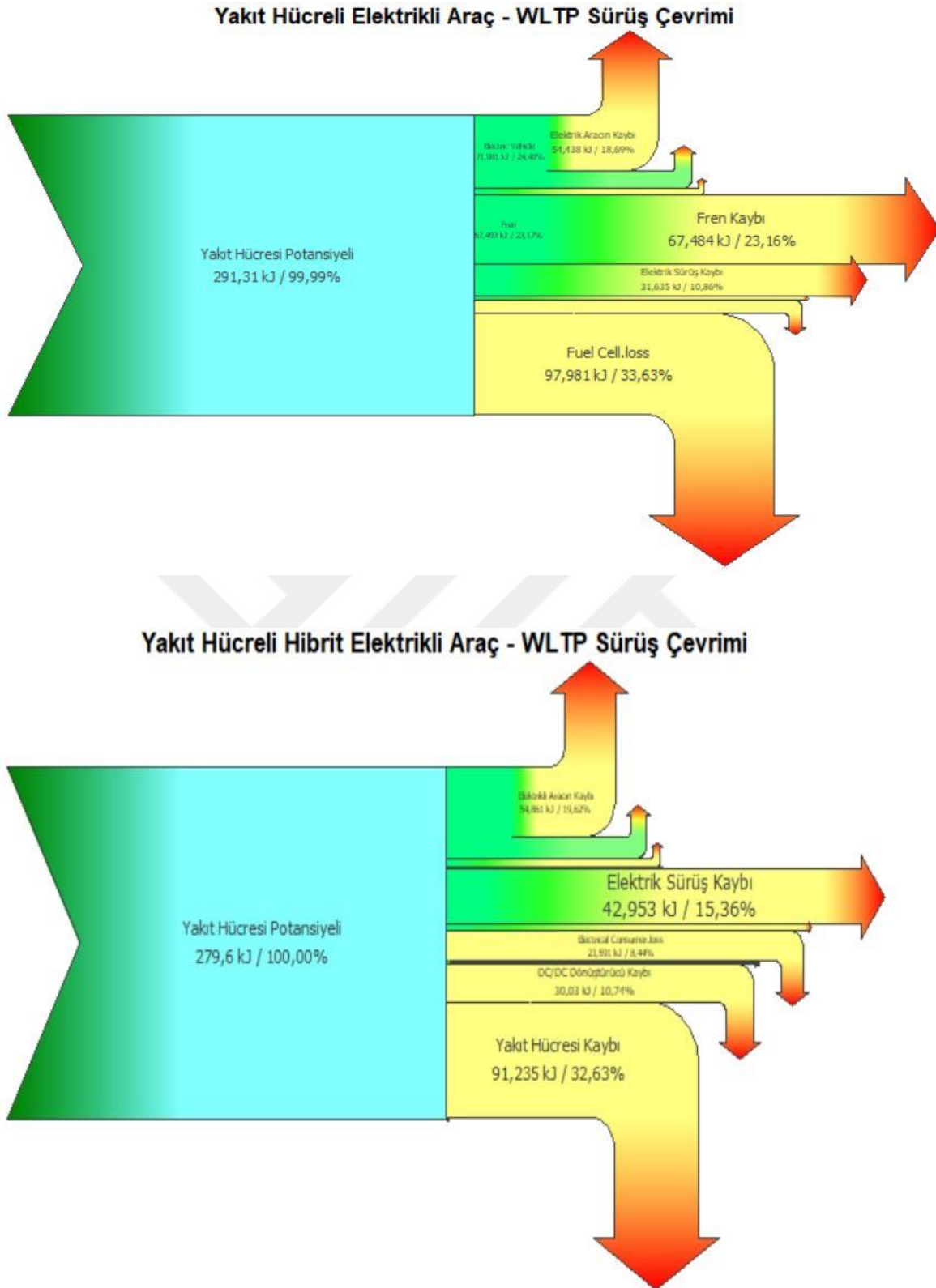
Şekil 4.13. Enerji dağılım grafiği 0:11 dakika

Şekil 4.13'te 00:11 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde araç hareketlenmesinin ilk anı olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 3,314 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 1,329 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 0,68 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 0,86 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Tüm veriler göz önünde bulundurulduğunda; 00:11 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %44,11 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 5,87 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %90,65'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Hibrit versiyonda araç ilk olarak destek bataryası üzerinden hareket ettirilmeye başlandığı için bataryadan elde edilen tüm enerjisi girdisi elektrik tüketimi olarak 5,29 kJ'lük bir enerji çıkışı söz konusudur. Tüm veriler göz önünde bulundurulduğunda; 00:11 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %90,09 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

Şekil 4.14'te 00:33 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde araç hareketlenmesinin ilk hızlanma (gaz pedal aktivasyonu) olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 271,5 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 100,67 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 28,8 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 90 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Tüm veriler göz önünde bulundurulduğunda; 00:33 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %47,01 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 225,5 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %50,95'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Harekete başlayan araçta; 96,3 kJ'lük bir araç kinetik enerjisi; 27 kJ'lük elektrik motor, 15 kJ'lük elektrik tüketici, 35 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. Tüm veriler incelendiğinde; 00:33 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %55,3 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

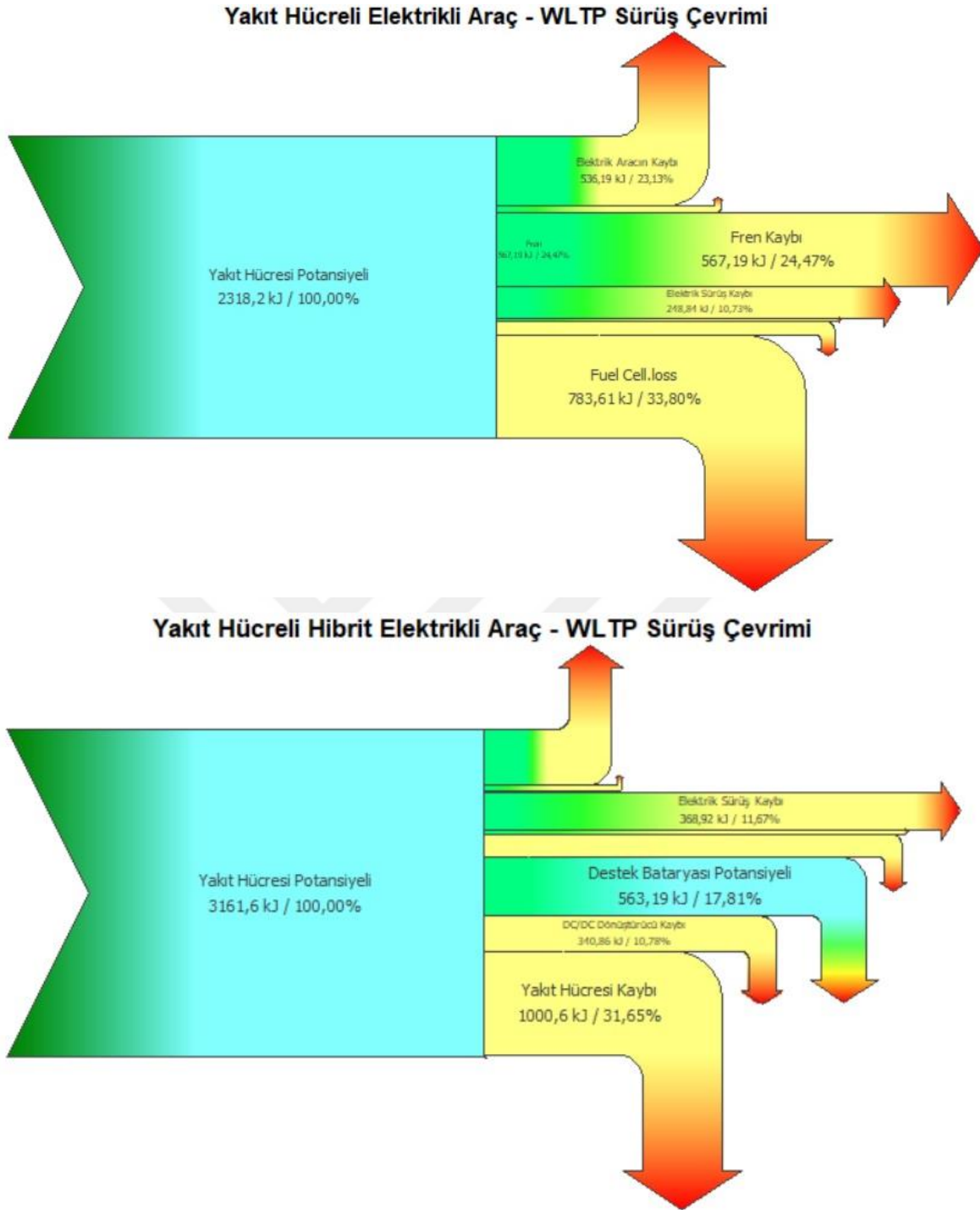


Şekil 4.14. Enerji dağılım grafiği 0:33 dakika

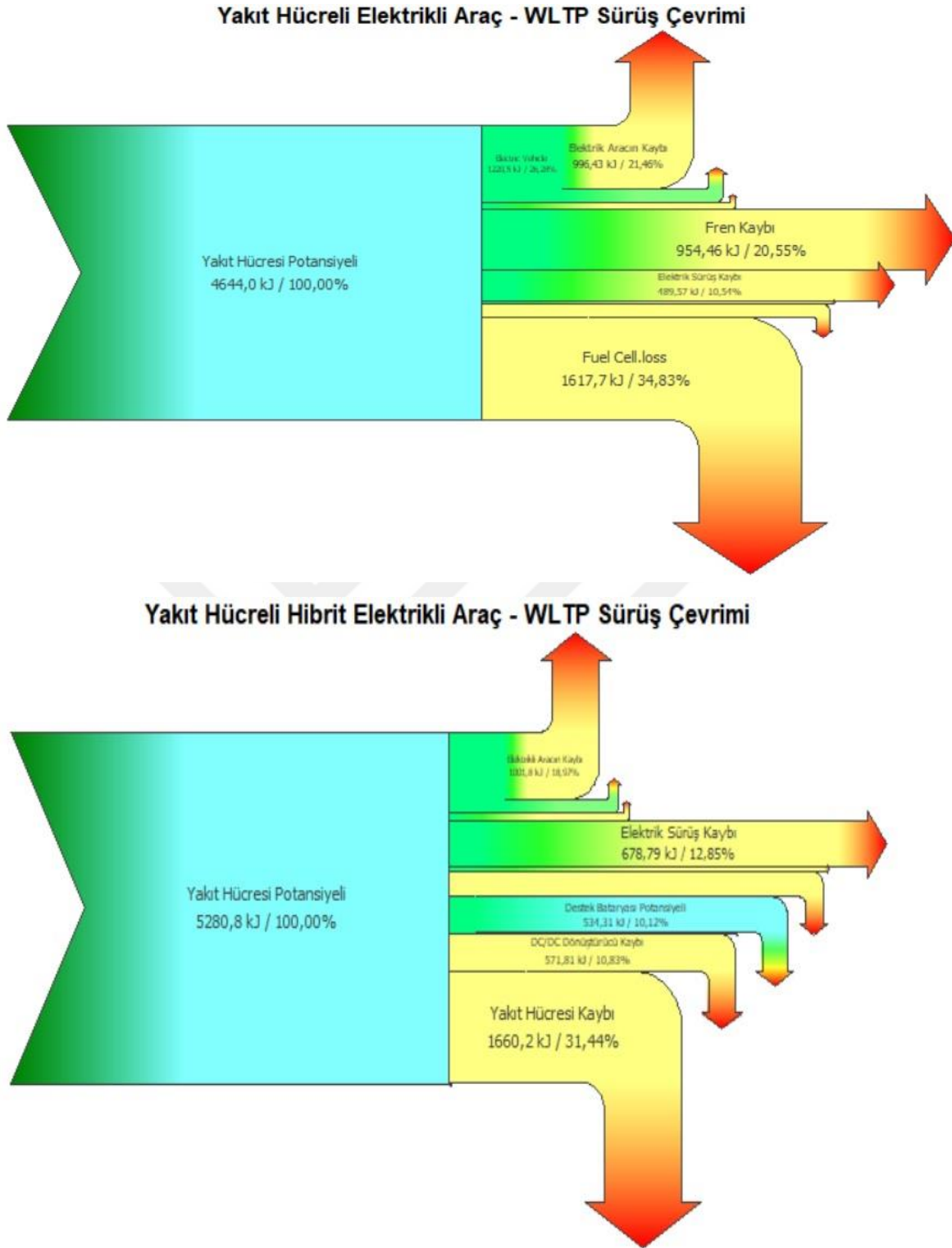


Şekil 4.15. Enerji dağılım grafiği 0:49 dakika

Şekil 4.15'te 00:49 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde hibrit versiyondan destek batarya kapanışı olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 291,3 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 16,5 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 31,69 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 98,04 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı, 67,4 kJ'lük frenleme kaybı gerçekleştirmiştir. 00:49 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %24 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 271,4 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %0'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Sürüş çevriminin basamaklarına göre destek bataryasının kullanıma kapatıldığı an olarak alınmıştır. 29,13 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 42,83 kJ'lük elektrik motor, 22,11 kJ'lük elektrik tüketici, 88,49 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 00:49 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %24,4 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Şekil 4.16'da 07:41 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde ilk duruş platformu için belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 2318,2 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 538,19 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 248,84 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 783,6 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Buna göre, 07:41 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %23,13 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 3161,6 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %0'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Aracın durduğu ilk platform anı olarak alınan bu anda; 563,1 kJ'lük geri kazanım destek bataryasından sağlanmıştır. 340,86 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 369,92 kJ'lük elektrik motor, 221,92 kJ'lük elektrik tüketici, 1000,6 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 07:41 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %17,04; ilaveten destek bataryasından %17,8 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

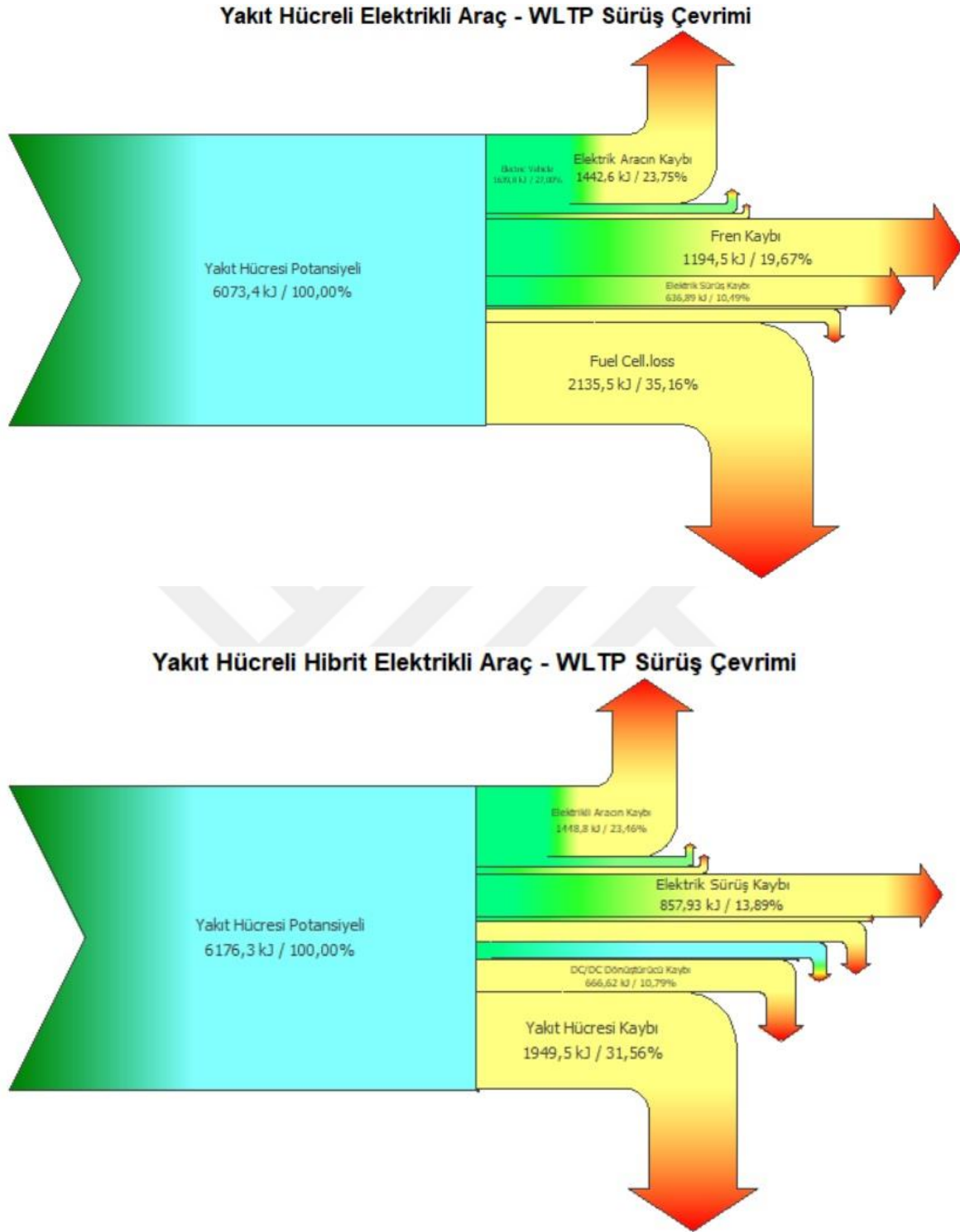


Şekil 4.16. Enerji dağılım grafiği 7:41 dakika

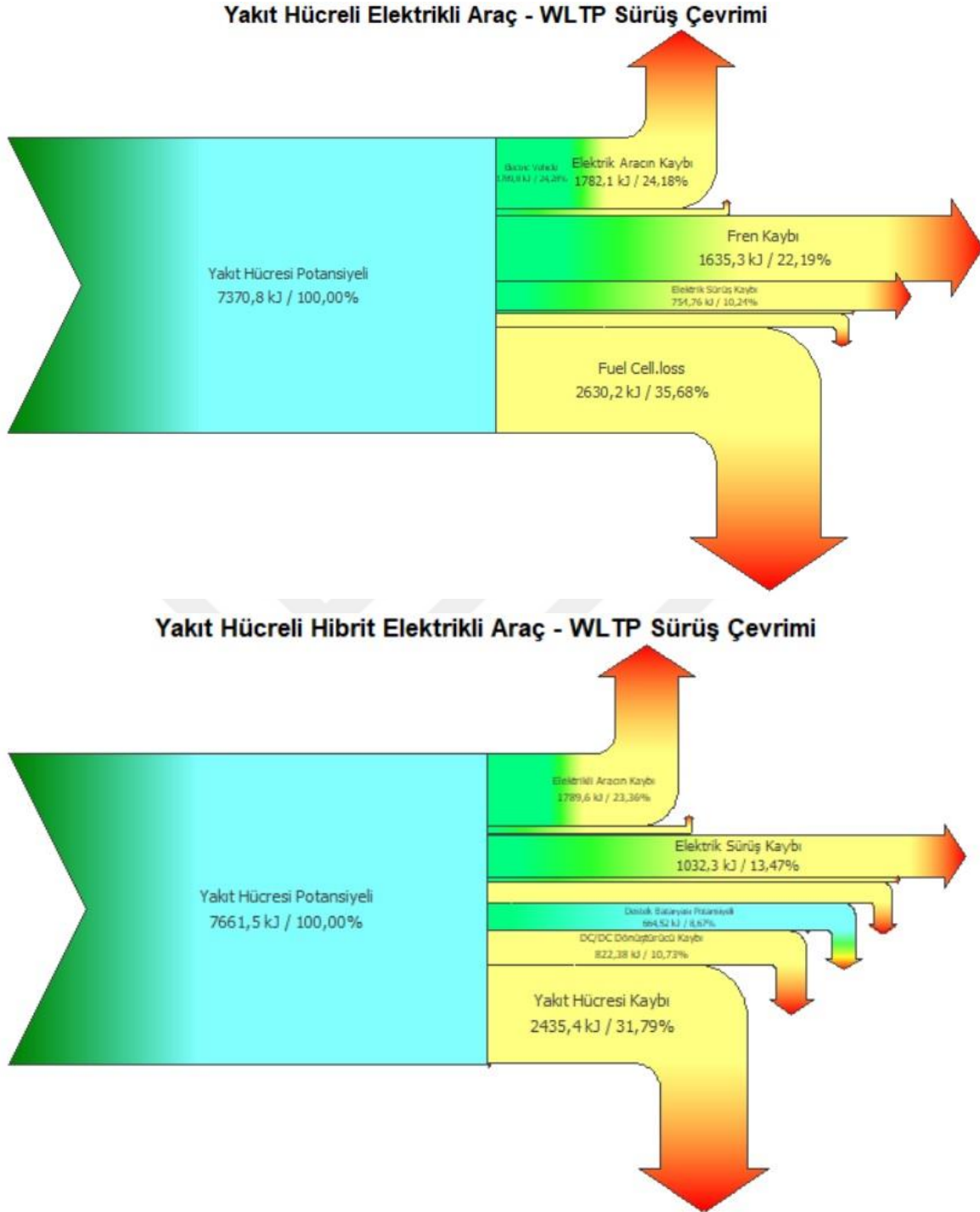


Şekil 4.17. Enerji dağılım grafiği 13:13 dakika

Şekil 4.17’te 13:13 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde ikinci platformun maksimum hız noktası (66 km/saat) olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 4644 kJ’lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 1222 kJ’lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 489,5 kJ’lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 1617 kJ’lük bir yakıt hücresi kaybı, 954,6 kJ’lük frenleme kaybı gerçekleştirmiştir. 13:13 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %28,2 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 5280 kJ’lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %0’lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Sürüş çevriminin basamaklarına göre ikinci platform azami hız anı olarak alınmıştır. 571,8 kJ’lük DC/DC evirici kaybı; 678,7 kJ’lük elektrik motor, 381 kJ’lük elektrik tüketici, 1660,2 kJ’lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 13:13 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %22,8; ilaveten destek bataryasından %10,2 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Şekil 4.18’de 15:00 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde ikinci platform frenlemesi için belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 6073,4 kJ’lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 1689 kJ’lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 636 kJ’lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 2135,5 kJ’lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Buna göre, 15:00 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %27 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 6176,3 kJ’lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %0’lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Aracın durduğu platform frenleme anı olarak alınan bu anda; 323,4 kJ’lük geri kazanım destek bataryasından sağlanmıştır. 666,6 kJ’lük DC/DC evirici kaybı; 857,9 kJ’lük elektrik motor, 432 kJ’lük elektrik tüketici, 1946,5 kJ’lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 15:00 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %26,3; ilaveten destek bataryasından %5,24 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.



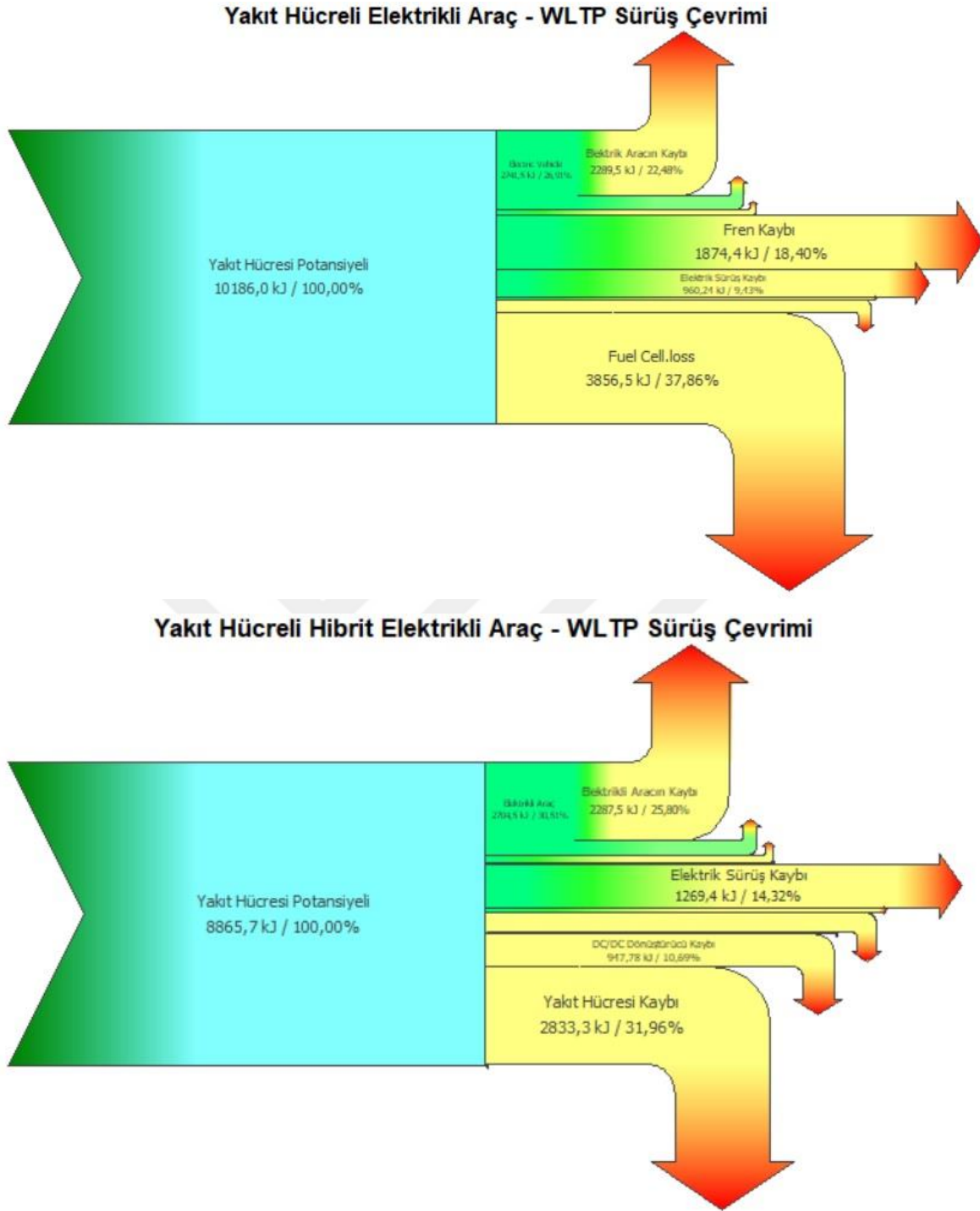
Şekil 4.18. Enerji dağılım grafiği 15:00 dakika



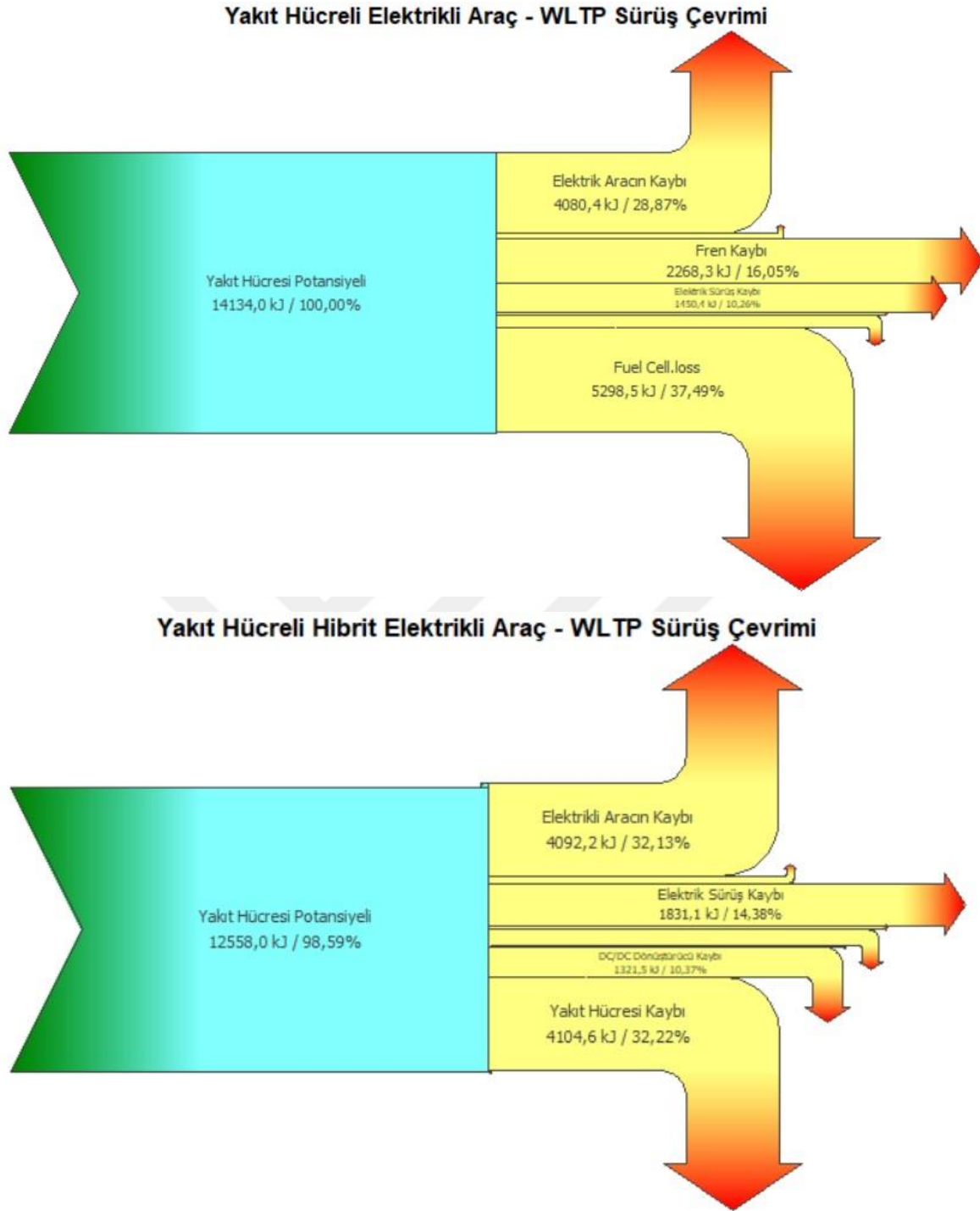
Şekil 4.19. Enerji dağılım grafiği 17:43 dakika

Şekil 4.19'da 17:43 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde ikinci platformun durma anı olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 7370 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 1782 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 754 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 2630,2 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı, 1635,3 kJ'lük frenleme kaybı gerçekleştirmiştir. 17:43 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %24,2 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 7670 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %0'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Sürüş çevriminin basamaklarına göre ikinci platformun durma anı olarak alınmıştır. 823,3 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 1032,4 kJ'lük elektrik motor, 511,6 kJ'lük elektrik tüketici, 2438,3 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 17:43 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %23,4; ilaveten destek bataryasından %8,72 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

Şekil 4.20'da 19:46 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde üçüncü platform azami hızı için (94 km/saat) belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 10187 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 2741 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 960,24 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 3856,5 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Buna göre, 19:46 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %26,91 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 8865,7 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %0'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Aracın üçüncü platform için azami hızı olarak alınan bu anda; 947,6 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 1269,9 kJ'lük elektrik motor, 570,7 kJ'lük elektrik tüketici, 2833 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 19:46 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %30,6 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.



Şekil 4.20. Enerji dağılım grafiği 19:46 dakika

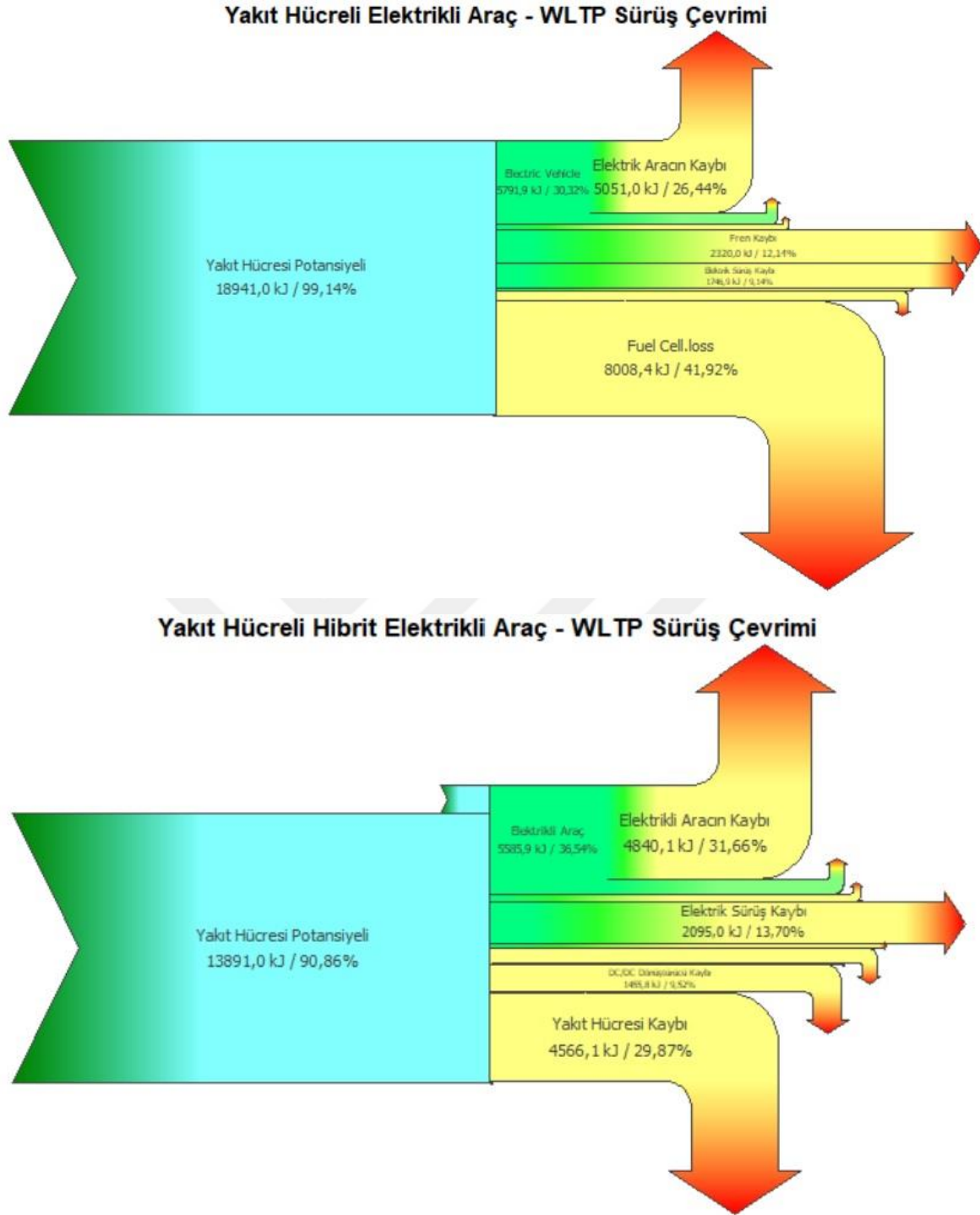


Şekil 4.21. Enerji dağılım grafiği 24:36 dakika

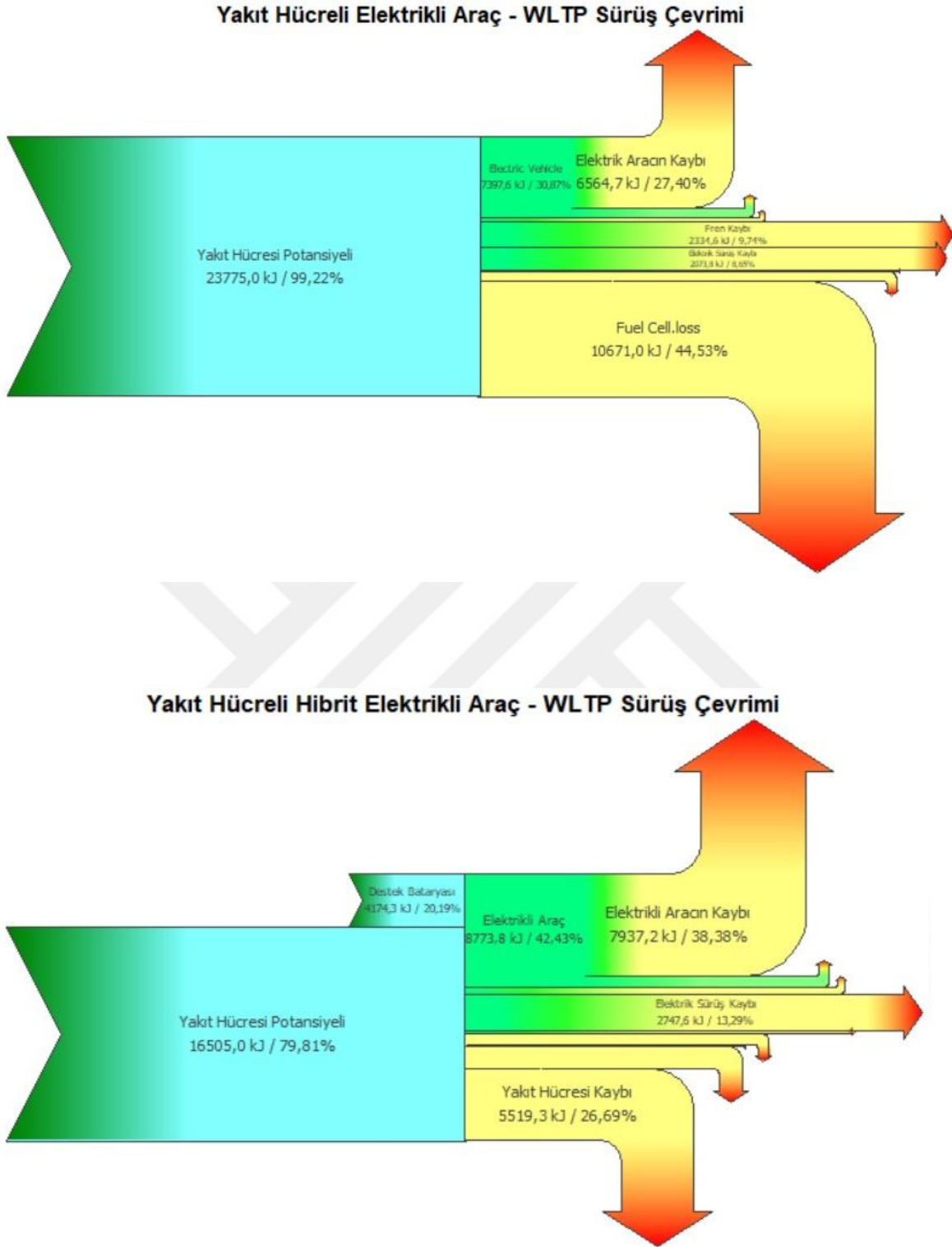
Şekil 4.21'da 24:36 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde üçüncü platformun durma anı olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 14134 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 4080 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 1450 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 5298,5 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı, 2268 kJ'lük frenleme kaybı gerçekleştirmiştir. 24:36 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %28,8 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 12738 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %1,5'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Sürüş çevriminin basamaklarına göre üçüncü platformun durma anı olarak alınmıştır. 1321 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 1831 kJ'lük elektrik motor, 709,7 kJ'lük elektrik tüketici, 4104,6 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 24:36 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %32,13 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

Şekil 4.22'da 26:26 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP çevriminde dördüncü platform hızlanma için belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 18534 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 5627 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 1707 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 7832,6 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Buna göre, 26:26 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %30,1 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 15564 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %9,8'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Aracın dördüncü platform hızlanması için alınan bu anda; 1469,5 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 2132 kJ'lük elektrik motor, 762 kJ'lük elektrik tüketici, 4615 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 26:26 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %36,9 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.



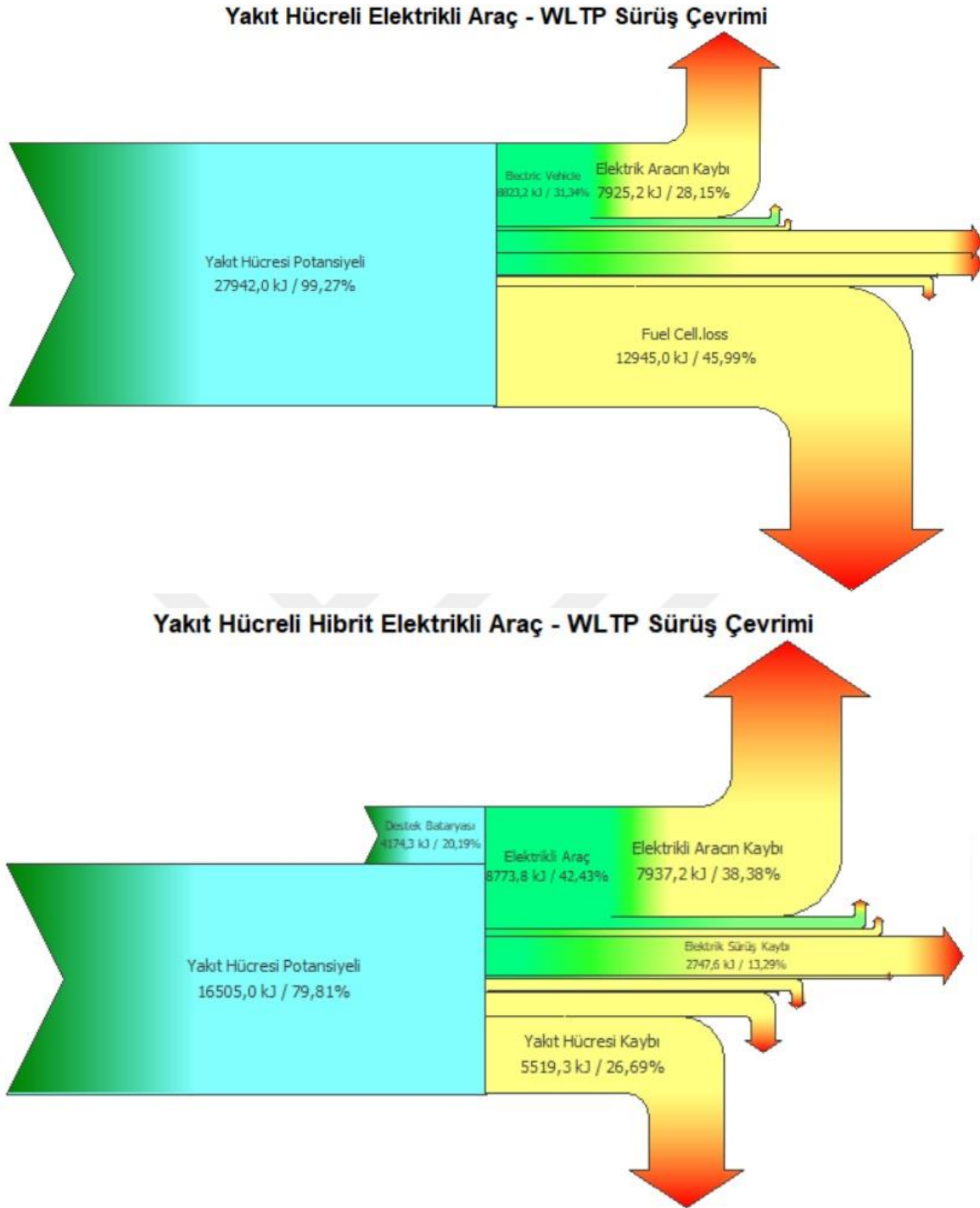
Şekil 4.22. Enerji dağılım grafiği 26:26 dakika



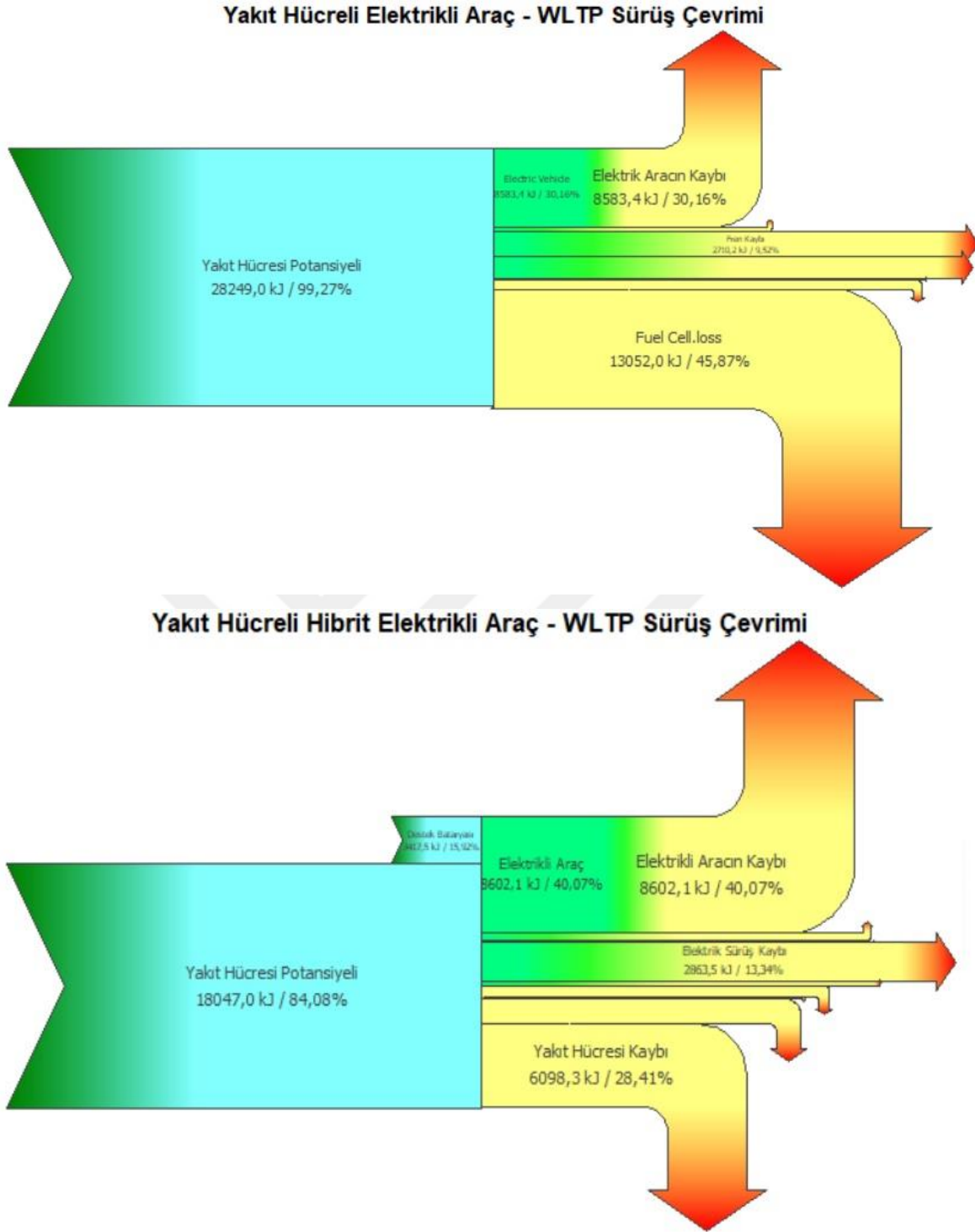
Şekil 4.23. Enerji dağılım grafiği 27:50 dakika

Şekil 4.23’de 27:50 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminde dördüncü platformda destek bataryası kullanımı anı olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 23775 kJ’lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 7397 kJ’lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 2073 kJ’lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 10671 kJ’lük bir yakıt hücresi kaybı, 2334,6 kJ’lük frenleme kaybı gerçekleştirmiştir. 27:50 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %30,8 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilisidir. Model araca; 18331,6 kJ’lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %15,8’lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Ayrıca; 1607,3 kJ’lük DC/DC evirici kaybı; 2468,3 kJ’lük elektrik motor, 803,5 kJ’lük elektrik tüketici, 5121 kJ’lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 27:50 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %40,1 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

Şekil 4.24’te 28:45 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP çevriminde dördüncü platform azami hız için belirlenmiş (131 km/saat) olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 27942 kJ’lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 8823,2 kJ’lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 2351 kJ’lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 12945 kJ’lük bir yakıt hücresi kaybı gerçekleştirmiştir. Buna göre, 28:45 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan % 31,3 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir. Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilisidir. Model araca; 20633,3 kJ’lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %20,11’lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Aracın dördüncü platform azami hızı için alınan bu anda; 1708 kJ’lük DC/DC evirici kaybı; 2742 kJ’lük elektrik motor, 829,5 kJ’lük elektrik tüketici, 5511,5 kJ’lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 28:45 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %42,39 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.



Şekil 4.24. Enerji dağılım grafiği 28:45 dakika



Şekil 4.25. Enerji dağılım grafiği 30:00 dakika

Şekil 4.25'te 30:00 dakika için enerji dağılım grafiği hem yakıt hücreli elektrikli araç hemde yakıt hücreli hibrit araç için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. WLTP sürüş çevriminin bitiş ve toplam tüketim anı olarak belirlenmiş olan bu sürede, anlık sankey diyagramı yardımıyla enerji dağılımı resmedilmiştir. Yakıt hücreli elektrikli araç için; ana enerji kaynağı turkuaz renkle gösterilmiş olan yakıt hücresi enerjisidir. Model araca; 28249 kJ'lük bir enerji girdisi sağlayan yakıt pili, 8583 kJ'lük araç kinetik enerjisi tüketmiştir. Bunun yanında 2401 kJ'lük bir elektrik motor (eDrive) kaybı, 13052 kJ'lük bir yakıt hücresi kaybı, 2710,2 kJ'lük frenleme kaybı gerçekleştirmiştir. 30:00 dakikası için yakıt hücreli elektrik araçtan %30,16 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç için; ana enerji kaynakları turkuaz renkle gösterilmiş olan destek bataryası ve yakıt hücresi ikilidir. Model araca; 21464 kJ'lük bir toplam enerji girdisi sağlayan hibrit sistemin %15,9'lik kısmı destek bataryasından beslenmektedir. Ayrıca; 1857 kJ'lük DC/DC evirici kaybı; 2863,5 kJ'lük elektrik motor, 866 kJ'lük elektrik tüketicisi, 6098,3 kJ'lük de yakıt hücresi kaybı bulunmaktadır. 30:00 dakikası için yakıt hücreli hibrit elektrik araçtan %40,07 oranında kullanılabilir enerji elde edilmiştir.

5. MALİYET VE VERİMLİLİK ANALİZLERİ

Bu kısa maliyet analizi bölümünde modellemiş olduğumuz iki araç olan, yakıt hücreli elektrik araç ile yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımız arasındaki yakıt kazanımlarımızın maliyet olarak eldeleri ve yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımız için yakıt hücreli elektrikli aracımızdan farklı olarak destek bataryamızın ve DC/DC dönüştürücümüzün ek maliyetleri sonucunda ortalama olarak kendini geri ödeme sürelerinin hesabına odaklanılacaktır. Bu nedenle öncelikli olarak gerekli destek bataryamız ile DC/DC dönüştürücümüz maliyetleri birçok firmadan fiyat alınarak en optimum şekilde seçilmiştir.

Destek bataryamız şekil 5.1.'de görüldüğü üzere, 80 kW gücünde ve her biri 3,75 nominal voltaja sahip 120 hücreden oluşan Eternity Technologies şirketinin kataloglarından seçilmiş olup, fiyat olarak 2500 dolar belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Destek Bataryası

DC/DC dönüştürücümüz şekil 5.2.'de görüldüğü gibi, nominal voltajı 600V-300V dönüşümünü yapan, Infineon firmasının katalogundan seçilmiş olup, fiyat olarak 500 dolar belirlenmiştir.



Şekil 5.2. DC/DC Dönüştürücü

Ayrıca yakıt hücreli elektrik araçtan farklı olarak ekipman eşleşmeleri için gerekli programlamalar için 300 dolarlık bir maliyet öngörülmüştür.

Hidrojen kilogram fiyatının ise 12,95 dolar ile 16,49 dolar arasında seyretmesi ve literatürde araştırıldığına yaklaşık olarak kilogram fiyatının 14 dolar alınabileceği görülmüştür (Brown, 2015).

Araştırma bulguları ve tartışmalar bölümünde elde ettiğimiz veriler ışığında yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımızın yakıt hücreli elektrikli aracımıza göre 100 km'de 0,423 kg hidrojen yakıtından tasarruf sağladığını göz önünde bulundurursak, yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımızın her 100 km'de 5,9 dolar maliyet olarak yakıttan tasarruf ettiği görülmektedir.

Yukarıdaki destek bataryası ile DC/DC dönüştürücünün maliyetleri doğrultusunda yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın 55000 - 56000 km sonunda ek maliyetlerini yakıt tasarrufu nedeniyle geri ödediği hesaplanmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, taşıma sektöründe gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı ile daha temiz bir yaşam ortamı sağlamak amacıyla yakıt hücreli elektrikli araçlar üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmanın asıl amacı enerji verimliliğini en optimize değerlere çıkararak, hidrojen yakıt tüketimini azaltmak için hali hazırda günümüzde örnekleri gün geçtikçe artan yakıt hücreli elektrikli araç üzerine destek batarya sistemi eklenmiştir. Ortaya çıkan performans verileri, yakıt tüketimleri ve enerji verimlilikleri AVL Cruise simulasyon programında detaylı olarak incelenmiştir.

Enerji dağılımını ve verimliliği belirlemek için; yakıt hücreli elektrikli araç ve yakıt hücreli hibrit elektrikli araç olmak üzere iki ana araç modellenmiştir. AVL programında; ağırlık ve şase özellikleri aynı olan araçlar yakıt hücreli ve hibrit versiyonlar olarak atanmıştır. Ana modellemede yakıt hücreli araçta ana komponentler olarak; yakıt hücresi, elektrik motoru, kontrol sistemleri için kokpit, DC/DC dönüştürücü, diferansiyel, fren ve lastik takımı kullanılmıştır. Yakıt hücreli hibrit araçta ise; yakıt hücresi, destek bataryası, elektrik motoru, elektrikselsel terminal, evirici ve çeviriciler, kontrol sistemleri için kokpit, DC/DC dönüştürücüler, diferansiyel, fren ve lastik takımı kullanılmıştır.

Aynı zamanda yapılan bu çalışmada kullanılmak üzere 2017 yılında çıkan ve tüm otomotiv dünyasında ar-ge testleri için kullanılan WLTP sürüş çevrimi seçilmiştir. 30 dakika olan bu çevrimde, sistemsel önem arz eden 13 farklı zaman dilimi seçilmiş ve bu zaman dilimleri her 2 aracımız içinde sankey diyagramları üzerinde enerji girdi ve çıktıları tablolara dönüştürülerek incelenmiştir.

Anlık sürüş çevrim zamanlamaları, sürüş çevriminin karakteristiğine göre belirlenmiştir. İlk an; gaza ilk dokunuş ve ivmelenme; birinci platform başlangıcı; azami birinci platform hızı; birinci platform frenleme ve durma pozisyonları; ikinci platform başlangıcı; azami ikincii platform hızı; ikinci platform frenleme ve durma pozisyonları; üçüncü platform başlangıcı; azami üçüncü platform hızı; üçüncü platform frenleme ve durma pozisyonları; son platform başlangıcı; azami son platform hızı; son platform frenleme ve durma pozisyonları sistematik olarak incelenmiş ve anlık enerji dağılımları verilmiştir.

Araştırma bulguları ve tartışma kısmında öncelikle modellenen araçlarla ilgili yakıt hücresi, elektrik motoru ve batarya verilerine değinilmiş, sonuçlar irdelenerek araçlar için

ön komponent sonuçları alınmıştır. Akabinde, detaylı verileri anlık olarak verilmiş olan enerji dağılımı ve sankey diyagramları yardımı ile enerji verimliliği sonuçları derlenmiştir.

Genel olarak;

Bu çalışmanın en önemli sonuçları aşağıda sıralanmıştır;

- Modellenen yakıt hücreli elektrikli aracın enerji tüketimi 4,070 kWh, hidrojen yakıt tüketimi ise 1,124 kg/100 km olarak bulunmuştur.
- Destek batarya sistem ilavesi ile hibritleştirilmiş yakıt hücreli aracın enerji tüketimi 3,701 kWh, hidrojen tüketimi ise 0,701 kg/100 km olarak tespit edilmiştir.
- Modellenmiş iki aracın yüzdesel açıdan kıyaslamasında ise yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın, yakıt hücreli elektrikli araca göre ortalama enerji tüketimi ve yakıt tüketimi sırasıyla %8 ile %35 oranında daha iyileştirilmiş halde analiz edilmiştir.
- Maliyet analizleri sonucunda yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın ek ekipman maliyetlerini 55000 – 56000 km sonunda geri ödeyeceği hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın ışığında destek sistem kullanılan yakıt hücreli elektrikli araçların gelecekte hem yakıt ve enerji tüketimi açısından hem de emisyonlarında zararlı gaz salınımlarının olmamasından dolayı çevreci yapılarından ötürü çok büyük bir öneme sahip olacaklardır.

Bu çalışmanın gerekli projeler dâhilinde deney düzeneklerinin oluşturulması ve süper kapasitör, ultra kapasitör gibi enerji depolama yardımcılarıyla birlikte batarya teknolojisinin geliştirilmesi hakkında çalışmaların yoğunlaştırılarak literatüre kazandırılması ise gelecek çalışmalar için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Agnolucci, P. (2007). Hydrogen infrastructure for the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(15), 3526-3544.
- Ahmadi, S., Bathaee, S. M. T., & Hosseinpour, A. H. (2018). Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy. *Energy Conversion and Management*, 160, 74-84.
- Alavi, F., Lee, E. P., van de Wouw, N., De Schutter, B., & Lukszo, Z. (2017). Fuel cell cars in a microgrid for synergies between hydrogen and electricity networks. *Applied energy*, 192, 296-304.
- Allcock, C. (2012). *EV City Casebook-a look at the global electric vehicle movement*. International Energy Agency.
- Angloamerikan. Hydrogen fuel cell vehicle technology Roadmap. 2015. Technical report.
- Aouzellag, H., Ghedamsi, K., & Aouzellag, D. (2015). Energy management and fault tolerant control strategies for fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicles to enhance autonomy, efficiency and life time of the fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(22), 7204-7213.
- Arat, H. T., Aydin, K., Baltacıoğlu, E., Yařar, E., Baltacıoğlu, M. K., Conker, Ç., & Burgaç, A. (2013). A review of hydrogen-enriched compressed natural gas (HCNG)-fuel in diesel engines. *The Journal of MacroTrends in Energy and Sustainability*, 1(1), 115-122.
- Arat, H. T., Baltacıoğlu, M. K., Aydin, K., & Özcanlı, M. (2016). Experimental investigation of using 30HCNG fuel mixture on a non-modified diesel engine operated with various diesel replacement rates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 3199-3207.
- Atalay, B., (2015). Hibrit otomobil tasarımı, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi ve simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- AVL (2018, 16 Eylül), Erişim Adresi <https://www.avl.com/>
- AVL Product Description Cruise, (2014). AVL Advanced Simulation Technologies.
- Bagotsky, V. S. (2012). *Fuel cells: problems and solutions* (Vol. 56). John Wiley & Sons.
- Barbir, F. (2006). PEM fuel cells. In *Fuel Cell Technology* (pp. 27-51). Springer, London.

- Bayindir, K. Ç., Gözükcük, M. A., & Teke, A. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1305-1313.
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(6), 3767-3777.
- Biliroğlu, A.Ö., (2009). Seri hibrit elektrikli araçların modellenmesi ve kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bioenergy, I. E. A. (2011). *Technology roadmap biofuels for transport*. Paris: International Energy Agency.
- Bique, A. O., & Zondervan, E. (2018). An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050—Design of novel fuel infrastructures in Germany. *Chemical Engineering Research and Design*, 134, 90-103.
- Bizon, N., & Thounthong, P. (2018). Real-time strategies to optimize the fueling of the fuel cell hybrid power source: A review of issues, challenges and a new approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1089-1102.
- Borgstedt, P., Neyer, B., & Schewe, G. (2017). Paving the road to electric vehicles—A patent analysis of the automotive supply industry. *Journal of Cleaner Production*, 167, 75-87.
- Bourgeois, T., Brachmann, T., Barth, F., Ammouri, F., Baraldi, D., Melideo, D., ... & Lemonnier, D. (2017). Optimization of hydrogen vehicle refuelling requirements. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13789-13809.
- Bowles, P., Peng, H., & Zhang, X. (2000, September). Energy management in a parallel hybrid electric vehicle with a continuously variable transmission. In *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000* (Vol. 1, No. 6, pp. 55-59). IEEE.
- Boyalı, A., (2008). Hibrit elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- BP. “BP Energy Outlook Booklet,” British Petroleum, London, 2018
- Brey, J. J., Brey, R., & Carazo, A. F. (2017). Eliciting preferences on the design of hydrogen refueling infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13382-13388.
- Brey, J. J., Carazo, A. F., & Brey, R. (2018). Exploring the marketability of fuel cell electric vehicles in terms of infrastructure and hydrogen costs in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2893-2899.
- Brown, A., Müller, S., & Dobrotkova, Z. (2011). *Renewable energy markets and prospects by technology*. IEA information paper.

- Brown, T., Schell, L. S., Stephens-Romero, S., & Samuelsen, S. (2013). Economic analysis of near-term California hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 3846-3857.
- Brunet, J., & Ponssard, J. P. (2017). Policies and deployment for Fuel Cell Electric Vehicles an assessment of the Normandy project. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7), 4276-4284.
- Bulgu, A.E., (2010). Tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli araçlar için kontrol algoritmalarının geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bvumbe, T. J., Bujlo, P., Tolj, I., Mouton, K., Swart, G., Pasupathi, S., & Pollet, B. G. (2016). Review on management, mechanisms and modelling of thermal processes in PEMFC. *Hydrogen and Fuel Cells*, 1(1), 1-20.
- Cameron, D. S., Hards, G. A., Harrison, B., & Potter, R. J. (1987). Direct methanol fuel cells. *Platinum Metals Review*, 31(4), 173-181.
- Campiñez-Romero, S., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., & Mur-Pérez, F. (2018). A hydrogen refuelling stations infrastructure deployment for cities supported on fuel cell taxi roll-out. *Energy*, 148, 1018-1031.
- Chen, H., Song, Z., Zhao, X., Zhang, T., Pei, P., & Liang, C. (2018). A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle. *Applied energy*, 224, 289-299.
- Choudhury, R. (2002). Well to Wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems. A european study, LB-Systemtechnik GmbH, Daimlerstr, 15, 85521.
- Çimen, M.A., (2010). Elektrikli ve seri hibrit elektrikli araçlarda simülasyon kullanılarak kalıcı mıknatıslı senkron tahrik motoru kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Colpan, C. O., Nalbant, Y., & Ercelik, M. (2018). 4.28 Fundamentals of Fuel Cell Technologies.
- Creti, A., Kotelnikova, A., Meunier, G., & Ponssard, J. P. (2015). A cost benefit analysis of fuel cell electric vehicles (Doctoral dissertation, -).
- Da Fonseca, R. (2013). Optimization of the sizing and energy management strategy for a hybrid fuel cell vehicle including fuel cell dynamics and durability constraints. These de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Dafalla, A. M., & Jiang, F. (2018). Stresses and their impacts on proton exchange membrane fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4), 2327-2348.

- Das, H. S., Tan, C. W., & Yatim, A. H. M. (2017). Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 268-291.
- Demir, M. E., & Dincer, I. (2018). Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10420-10430.
- Demirci, Y., (2010). Hibrit araçlarda elektrik motoru denetimi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Dicks, A., & Rand, D. A. J. (2018). *Fuel cell systems explained*. Wiley.
- Erbeyler, S.E, (2007). Hibrit elektrikli hafif ticari araçta dizel motoru azotoksit (NOx) emisyonlarının optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erjavec, J. (2012). *Hybrid, electric, and fuel-cell vehicles*. Cengage Learning.
- European Commission. "Energy prices and costs report," Brussels, 2014.
- European LPG Association. (2013). *Autogas in Europe, The Sustainable Alternative: An LPG Industry Roadmap*.
- Ezzat, M. F., & Dincer, I. (2018). Development, analysis and assessment of fuel cell and photovoltaic powered vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 968-978.
- Fathabadi, H. (2018). Fuel cell hybrid electric vehicle (FCHEA): Novel fuel cell/SC hybrid power generation system. *Energy Conversion and Management*, 156, 192-201.
- Fernández, R. Á., Caraballo, S. C., Cilleruelo, F. B., & Lozano, J. A. (2018). Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms. *Renewable and sustainable energy reviews*, 81, 655-668.
- Frenette, G., & Forthoffer, D. (2009). Economic & commercial viability of hydrogen fuel cell vehicles from an automotive manufacturer perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), 3578-3588.
- Fuel cell electric vehicle deployment and hydrogen fuel station network development. California Environmental Protection Agency; 2017.
- Fuel Cell Electric Vehicle Fleet Deployment Plan. Northeast regional hydrogen economy. 2017.
- Future of Fuel Report. Hitachi capital vehicle solutions. 2017.
- Gigaom, "Storage tank of natural gas vehicle," [Online]. Available: <https://gigaom.com/2010/11/23/the-doe-gives-natural-gas-car-some-love/> [Accessed 2015-01-07].

- Giorgi, L., & Leccese, F. (2013). Fuel cells: Technologies and applications. *The Open Fuel Cells Journal*, 6, 1-20.
- Global Automotive Executive Survey. KPMG automotive institute. 2018.
- Global market for hydrogen fuel cell vehicles-2018. Information Trends; 2018.
- Gnörich, B., & Eckstein, L. (2016). Battery Electric Vehicles. *Fuel Cells: Data, Facts, and Figures*, 3.
- Granovskii, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2006). Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(3), 337-352.
- Greene, D. L., & Duleep, G. (2013). Status and prospects of the global automotive fuel cell industry and plans for deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling infrastructure. Oak Ridge National Laboratory.
- Grüger, F., Dylewski, L., Robinius, M., & Stolten, D. (2018). Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. *Applied energy*, 228, 1540-1549.
- Güner, C., (2013). Dışarıdan şarj edilebilen hibrit elektrikli araç ile menzil artırıcı elektrikli araç konseptlerinin karşılaştırmalı analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gurz, M., Baltacıoğlu, E., Hames, Y., & Kaya, K. (2017). The meeting of hydrogen and automotive: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23334-23346.
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2007). *Vehicle propulsion systems (Vol. 1)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hames, Y., Kaya, K., Baltacıoğlu, E., & Turksoy, A. (2018). Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10810-10821.
- Harrop, P., & Das, R. Materials vulnerable to price hikes. *Car Traction Batteries-the New Gold Rush 2010, 2020*.
- Hayes, J. G., & Goodarzi, G. A. (2017). *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. John Wiley & Sons.
- He, C., Sun, H., Xu, Y., & Lv, S. (2017). Hydrogen refueling station siting of expressway based on the optimization of hydrogen life cycle cost. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(26), 16313-16324.
- Hirschenhofer, J. H., Stauffer, D. B., & Engleman, R. R. (1994). *Fuel cells: a handbook (revision 3) (No. DOE/METC-94/1006)*. Gilbert/Commonwealth, Inc., Reading, PA (United States).

- Honselaar, M., Pasaoglu, G., & Martens, A. (2018). Hydrogen refuelling stations in the Netherlands: An intercomparison of quantitative risk assessments used for permitting. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Huss A, Maas H, Hass H. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. European commission; 2013. JRC Technical Reports.
- Hydrogen fuel stations in California: a practical guide to permitting and ceqa review. Arnold and Porter LLP; 2016.
- Hydrogen scaling up, a sustainable pathway for the global energy transition. Hydrogen Council; 2017.
- Hyundai, "Hyundai ix35 Fuel cell," worldwide.hyundai.com. [Online]. Available: <http://worldwide.hyundai.com/WW/Showroom/Eco/ix35-Fuel-Cell/PIP/index.html> [Accessed 2015-01-02].
- IEA Energy Technology Essentials. "Hydrogen Production & Distribution," International Energy Agency, Paris, France, 2007.
- IEA., T. R. (2009). *Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. OECD Publishing.
- İnternet, <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. Erişim 15.12.2018
- Iordache, I., Schitea, D., & Iordache, M. (2017). Hydrogen refueling station infrastructure roll-up, an indicative assessment of the commercial viability and profitability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(8), 4721-4732.
- Itaoka, K., Saito, A., & Sasaki, K. (2017). Public perception on hydrogen infrastructure in Japan: Influence of rollout of commercial fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7290-7296.
- Japan H2 Mobility to accelerate deployment of hydrogen stations. *Fuel Cell Bull* 2018:9.
- Jin, L. Q., Zheng, Y., Li, J. H., & Liu, Y. L. (2015). A study of novel regenerative braking system based on supercapacitor for electric vehicle driven by in-wheel motors. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(3), 1687814015573762.
- Kampman, B. E., Verbeek, R., Grinsven, A. H., van Mensch, P., Croezen, H. J., & Patuleia, A. (2013). Bringing biofuels on the market: options to increase EU biofuels volumes beyond the current blending limits. CE Delft.
- Kawai, T. (2004). Fuel cell hybrid vehicles: the challenge for the future. *The hydrogen energy transition: moving toward the post petroleum age in transportation*. Amsterdam: Elsevier, cop, 59-71.
- Kendall, M. (2018). Fuel cell development for New Energy Vehicles (NEVs) and clean air in China. *Progress in Natural Science: Materials International*.

- Kessels, J. T. B. A. (2007). Energy management for automotive power nets. Dissertation Abstracts International, 68(04).
- Keste, A. A., Vise, S. B., Adik, A. N., & Borase, P. R. (2013). Vehicle operating on compressed air by inversion of slider crank mechanism. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Department of Mechanical Engineering, MES College of Engineering, Pune, Maharashtra, India, ISSN (e), 2278, 1684.
- Kordesch, K., Gsellmann, J., Cifrain, M., Voss, S., Hacker, V., Aronson, R. R., ... & Daniel-Ivad, J. (1999). Intermittent use of a low-cost alkaline fuel cell-hybrid system for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 80(1-2), 190-197.
- Krishnan, V., Gonzalez-Marciaga, L., & McCalley, J. (2014). A planning model to assess hydrogen as an alternative fuel for national light-duty vehicle portfolio. *Energy*, 73, 943-957.
- Kuroki, T., Sakoda, N., Shinzato, K., Monde, M., & Takata, Y. (2018). Dynamic simulation for optimal hydrogen refueling method to Fuel Cell Vehicle tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5714-5721.
- LaFleur, A. C., Muna, A. B., & Groth, K. M. (2017). Application of quantitative risk assessment for performance-based permitting of hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7529-7535.
- Lee, D. Y., Elgowainy, A., Kotz, A., Vijayagopal, R., & Marcinkoski, J. (2018). Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium-and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217-229.
- Leung, V. (2011). Slow diffusion of LPG vehicles in China—lessons from Shanghai, Guangzhou and Hong Kong. *Energy policy*, 39(6), 3720-3731.
- Li, H. (1993). A heat transfer model applicable to the refuelling process for natural gas vehicles (Doctoral dissertation, Victoria University of Technology).
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 117-134.
- Markel, T., Brooker, A., Hendricks, T., Johnson, V., Kelly, K., Kramer, B., ... & Wipke, K. (2002). ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of power sources*, 110(2), 255-266.
- Mistry, C. S. (2005). Comparative assessment on performance of multi cylinder engine using CNG, LPG and Petrol as a fuel. *SAE transactions*, 222-226.
- Mockus, S. (2007). The influence of gaseous fuel on the characteristics of car engines (Doctoral dissertation, PhD thesis. Kaunas University of Technology).

- Montazeri-Gahjavarestani, M., Mahmoodi-Kaleybar, M., & Madanipour, V. Comparative fuel economy and environmental analysis of conventional hybrid and Plug-in hybrid vehicles.
- Morrison, G., Stevens, J., & Joseck, F. (2018). Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 87, 183-196.
- Muñoz, P. M., Correa, G., Gaudiano, M. E., & Fernández, D. (2017). Energy management control design for fuel cell hybrid electric vehicles using neural networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(48), 28932-28944.
- National Hydrogen Association. 2007b. The history of hydrogen. Retrieved February 26, 2007. from http://www.hydrogenassociation.org/general/factSheet_history.pdf
- National Hydrogen Scenarios. Howmany stations, where, When H2USALocation RoadmapWorkingGroup;October 2017.
- Nijboer, M. (2010). The contribution of natural gas vehicles to sustainable transport.
- Nižetić, S. (2018). Carbon free electricity production from the alternative energy concepts based on the utilization of the convective vortex systems as a heat engines: Review of the current status and perspective. *Journal of Cleaner Production*, 170, 85-95.
- NREL (2018, 15 Eylül), Erişim Adresi <https://www.nrel.gov/>
- O'hayre, R., Cha, S. W., Prinz, F. B., & Colella, W. (2016). *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons.
- Opal-RT (2018, 15 Eylül), Erişim Adresi <https://www.opal-rt.com/hybrid-electrical-transportation-overview/>
- Ortiz-Rivera, E. I., Reyes-Hernandez, A. L., & Febo, R. A. (2007, August). Understanding the history of fuel cells. In *Electric Power, 2007 IEEE Conference on the History of* (pp. 117-122). IEEE.
- Otlu, S., (2010). İçten yanmalı motorlu bir taşıtın basit bir hibrit elektrikli taşıta dönüşümü için bir model. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özden, B.Ş., (2013). Modeling and optimization of hybrid electric vehicles. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Özgür, T., & Yakaryılmaz, A. C. (2018). Thermodynamic analysis of a Proton Exchange Membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(38), 18007-18013.
- Papson, A., Creutzig, F., & Schipper, L. (2010). Compressed air vehicles: Drive-cycle analysis of vehicle performance, environmental impacts, and economic costs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2191), 67-74.

- Pede, G., Iacobazzi, A., Passerini, S., Bobbio, A., & Botto, G. (2004). FC vehicle hybridisation: an affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train. *Journal of Power Sources*, 125(2), 280-291.
- Qin, N., Brooker, R. P., & Raissi, A. (2017). *Fuel Cell Vehicle Technologies, Infrastructure and Requirements* (No. EVTC Report Number: FSEC-CR-2059-17). University of Central Florida. Electric Vehicle Transportation Center (EVTC).
- Rajagopalan, A., Washington, G., Rizzoni, G., & Guezennec, Y. (2003). Development of fuzzy logic and neural network control and advanced emissions modeling for parallel hybrid vehicles. *Center for Automotive Research, Intelligent Structures and Systems Laboratory*, 43-51.
- Ramesohl, S., & Merten, F. (2006). Energy system aspects of hydrogen as an alternative fuel in transport. *Energy Policy*, 34(11), 1251-1259.
- Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513-525.
- Reddi, K., Elgowainy, A., Rustagi, N., & Gupta, E. (2017). Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(26), 16675-16685.
- Redfield, J., Surampudi, B., Gustavo, R., Montemayor, A., McKee, H., Edwards, T., & Lasecki, M. (2006). Accessory electrification in class 8 tractors (No. 2006-01-0215). *SAE Technical Paper*.
- Reijnders, L. (2006). Conditions for the sustainability of biomass based fuel use. *Energy policy*, 34(7), 863-876.
- Ruffini, E., & Wei, M. (2018). Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach. *Energy*, 150, 329-341.
- Saleh, H. E. (2008). Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine. *Fuel*, 87(13-14), 3031-3039.
- Salvi, B. L., Subramanian, K. A., & Panwar, N. L. (2013). Alternative fuels for transportation vehicles: a technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 404-419.
- Sandalow, D. B. (Ed.). (2009). *Plug-in electric vehicles: what role for Washington?*. Brookings Institution Press.
- Satılmış, O., (2013). Batarya beslemeli üç-fazlı iki-seviyeli dc/ac dönüştürücülerde farklı modülasyon metotları ve çalışma durumları için batarya akımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Schulte, I., Hart, D., & Van der Vorst, R. (2004). Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(7), 677-685.

- Siemens PLM (Product Lifecycle Management) Software (2018, 15 Eylül), Erişim Adresi <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/webinar/system-simulation-simcenter-amesim/32178>
- Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource technology*, 101(6), 1570-1580.
- Sobrino, F. H., Monroy, C. R., & Pérez, J. L. H. (2010). Critical analysis on hydrogen as an alternative to fossil fuels and biofuels for vehicles in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 772-780.
- Srinivasan, S. (2006). *Fuel cells: from fundamentals to applications*. Springer Science & Business media.
- Status of existing hydrogen refueling stations, alternative and renewable fuel and vehicle technology program. 2015. Project Report.
- Suvak H. (2016). Gerçek Zamanlı Hibrit Elektrikli Taşıt Tasarımı Ve Simülasyon Programının Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Szabłowski, Ł., & Milewski, J. (2011). Dynamic analysis of compressed air energy storage in the car. *Journal of Power Technologies*, 91(1), 23-36.
- Technology Roadmap. Hydrogen and fuel cells. International Energy Agency; 2016. Energy use and renewable energy sources. *Environ Trends Report*. Page 8-Updated 8/2017.
- Technology Validation. Summary of annual merit review of the technology validation sub-program. DOE/Hydrogen&Fuel cell program subdivision; 2017. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress17/vii_0_marcinkoski_2017.pdf.
- Tesla, “Tesla Model S 60 kWh,” [teslamotors.com](http://www.teslamotors.com). [Online]. Available: http://www.teslamotors.com/sv_SE/models/design. [Accessed 2018-12-28]
- The history of the electric car. 2014. www.energy.gov/articles/history-electric-car. [Accessed 1 June 2018].
- Thompson ST, James BD, Huya-Kouadio JM, Houchins C, DeSantis DA, Ahluwalia R, Papageorgopoulos D. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: system
- Toyota (2018, 15 Eylül), Erişim Adresi <https://www.toyota.com.tr/new-cars/prius/index.json>
- Toyota plans mass production of fuel cell stacks and hydrogen tanks, 10-fold increase from 2020. *Fuel Cells Bulletin*; 2018. ISSN 1464-2859.
- Toyota, “Mirai fuel cell vehicle,” www.toyota-global.com [Online]. http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/

- Tuominen, R., Helppolainen, N., Itonen, J., & Viitakangas, J. (2018). Probabilistic risk model for assessing hydrogen fuel contamination effects in automotive FC systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4143-4159.
- US Energy Department "Life cycle of biofuel ," Available: <http://www.xfuels.com/trillion-dollar-niche/infrastructure-matters.php>. [Accessed 2018-02-18].
- US Energy Department, The Alternative Fuels Data Centre, [Online]. Available: <http://www.afdc.energy.gov/> [Accessed 2014-10-06].
- Van Mierlo, J., Maggetto, G., & Lataire, P. (2006). Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 47(17), 2748-2760.
- Veziroglu, A., & Macario, R. (2011). Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. *International journal of hydrogen energy*, 36(1), 25-43.
- Wang, G., Yu, Y., Liu, H., Gong, C., Wen, S., Wang, X., & Tu, Z. (2018). Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review. *Fuel Processing Technology*, 179, 203-228.
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F. N., Al Makky, A., Baroutaji, A., Carton, J. G., & Olabi, A. G. (2017). Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25695-25734.
- Wipke, K.B., Cuddy M.R., and Burch S.D., (1999). A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. National Renewable Energy Laboratory, NREL/JA-540-26839.
- Wishart, J. (2008). Modelling, simulation, testing, and optimization of advanced hybrid vehicle powertrains (Doctoral dissertation).
- Xu, L., Li, J., Reimer, U., Huang, H., Hu, Z., Jiang, H., ... & Lehnert, W. (2017). Methodology of designing durability test protocol for vehicular fuel cell system operated in soft run mode based on statistic results of on-road data. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(50), 29840-29851.
- Xu, X., Xu, B., Dong, J., & Liu, X. (2017). Near-term analysis of a roll-out strategy to introduce fuel cell vehicles and hydrogen stations in Shenzhen China. *Applied energy*, 196, 229-237.
- Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A., & Tandiroğlu, A. (2016). Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat. *Energy*, 111, 923-932.
- Yaich, M., Hachicha, M. R., & Ghariani, M. (2015, December). Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles for recreational vehicle. In *Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2015 16th International Conference on (pp. 181-187). IEEE.

- Yang, H. J., Cho, Y., & Yoo, S. H. (2017). Public willingness to pay for hydrogen stations expansion policy in Korea: Results of a contingent valuation survey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 10739-10746.
- Yönet, N. (2018). AVL Programı İle Modellenen Hibrit Araç İçin Optimum Elektrik Motor Seçimi Ve Araç Performansına Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Zhang, T., Wang, P., Chen, H., & Pei, P. (2018). A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition. *Applied energy*, 223, 249-262.
- Zhang, X., Luo, M., Dai, W., Yao, C., Wang, J., Huang, D., & Wang, C. (2018). Automotive fuel cell engine test cell design and its thermal flow analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(36), 17409-17419.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TANÇ Bahattin
 Uyuşu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 28.09.1988, Kayseri
 Medeni hali : Evli
 Telefon : -
 e-mail : bahattin.tanc@iste.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2019
Yüksek lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2014
Lisans	Kocaeli Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2011
Lise	İçel Mersin Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	İskenderun Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Tanç, B., Arat, H. T., Baltacıoğlu, E., & Aydın, K. (2018). Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles. International Journal of Hydrogen Energy.

DİZİN

A

Azotdioksit · iv, xv, 1
azotoksit · 1

B

biyokütle · 1, 4, 6, 13, 15

E

elektrikli araçlar · 2, 3, 23, 30, 37

emisyön · 15, 28, 29, 40, 52

H

hibrit elektrikli araçlar · 2, 24
Hidrojen · vii, 1, 11, 12, 13, 14,
20, 21, 25, 26, 28, 29, 30, 33,
34

J

jeotermal · 1

K

karbondioksit · 1, 9, 22, 25

R

rüzgar · 1, 13, 29, 34

T

temiz enerji · 1, 2



TEKNOVERSİTE





teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

