

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT HÜCRELİ VE BATARYALI HİBRİT TAŞITLARIN  
FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNDE PERFORMANS ANALİZİ

DOĞUKAN AKÇA

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT HÜCRELİ VE BATARYALI HİBRİT TAŞITLARIN  
FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNDE PERFORMANS ANALİZİ

DOĞUKAN AKÇA

Dr. Öğr. Üyesi Şule KUŞDOĞAN  
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof.Dr. Bora ALBOYACI  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr.Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu TEKDEMİR  
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 27.06.2024

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ... tarafından ...no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Doğukan AKÇA

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Doğukan AKÇA

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde artan çevresel kaygılar ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azalması, elektrikli araçların önemini ve gerekliliğini daha da artırmaktadır. Bu bağlamda, hibrit sistemlerin enerji verimliliği, performansı ve çevresel sürdürülebilirliği üzerine yapılan araştırmalar büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla elektrikli taşıtlarda yakıt hücresi ve batarya hibrit sistemlerinin performans değerlendirmesini ele almaktadır. Tezde, PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt hücresi kullanılarak, Lityum İyon (Li-Ion), Nikel Metal Hidrür (NiMH) ve Kurşun Asit (Pb-Asit) bataryalarla donatılmış üç farklı hibrit araç modeli geliştirilmiş ve bu modeller çeşitli sürüş çevrimleri altında test edilmiştir.

Bu süreçte, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şule KUŞDOĞAN'a değerli rehberliği ve sürekli desteği için teşekkür ederim. Onun bilgi ve deneyimleri, tezimin her aşamasında yol gösterici olmuştur. Ayrıca, bana her zaman moral ve motivasyon kaynağı olan eşim Burcu BOLAT AKÇA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onun sabrı ve desteği, bu çalışmayı mümkün kılmıştır.

Haziran – 2024

Doğukan AKÇA

## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI .....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması .....	2
2. YAKIT HÜCRELİ TAŞITLAR .....	6
2.1. Yakıt Hücreli Taşıtların Tarihi .....	6
2.2. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensipleri.....	7
2.3. Yakıt Hücresi Teknolojileri.....	9
2.3.1. Alkali Yakıt Hücreleri.....	9
2.3.2. Proton Değişim Membranı Yakıt Hücreleri .....	10
2.3.3. Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri.....	11
2.3.4. Fosforik Asit Yakıt Hücreleri.....	13
2.3.5. Katı Oksit Yakıt Hücreleri .....	14
2.3.6. Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri .....	15
2.4. Yakıt Hücreli Araç Topolojileri .....	17
2.4.1. Tip I: Tam Yakıt Hücreli Araç .....	17
2.4.2. Tip II: Yakıt Hücresi ve Batarya Hibridizasyonu .....	18
2.4.3. Tip III: Yakıt Hücresi ve Süperkapasitör Hibridizasyonu .....	18
2.4.4. Tip IV: Yakıt Hücresi, Batarya ve Süperkapasitör Hibridizasyonu.....	19
2.4.5. Tip V: Yakıt Hücresi, Batarya ve Fotovoltaik Panel Hibridizasyonu .....	20
2.4.6. Tip VI: Yakıt Hücresi ve Volan Hibridizasyonu .....	20
2.4.7. Tip VII: Yakıt Hücresi ve Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Hibridizasyonu.....	21
3. YAKIT HÜCRELİ HİBRİT ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA ÇEŞİTLERİ .....	22
3.1. Kurşun Asit Batarya .....	22
3.2. Nikel Metal Hidrür Batarya.....	22
3.3. Lityum-İyon Batarya (Li-Ion) .....	23
4. ADVISOR PROGRAMI TANITIMI VE KABİLİYETLERİNİN AÇIKLANMASI .....	24
4.1. Araç Giriş Sayfası.....	25
4.2. Simülasyon Kurulum Sayfası .....	26
4.3. Sonuçlar Sayfası .....	27
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI.....	29
5.1. Araç Özelliklerinin Belirlenmesi.....	29
5.1.1. Elektrik Motoru Gücünün Belirlenmesi .....	31
5.1.2. Yakıt Hücresi Gücünün Belirlenmesi .....	33
5.1.3. Yardımcı Batarya Gücünün Belirlenmesi .....	34

5.2. Sürüş Çevrimlerinin Belirlenmesi ve Oluşturulması .....	36
5.3. Simülasyon Sonuçları .....	40
5.3.1. Li-Ion Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araca Ait Simülasyon Sonuçları .....	40
5.3.2. Pb-Asit Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araca Ait Simülasyon Sonuçları .....	48
5.3.3. Nikel Metal Hidrür Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araca Ait Simülasyon Sonuçları .....	54
5.3.4. Aynı Sürüş Çevrimlerinde Farklı Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araçların Karşılaştırmalı Analizi.....	60
5.3.5. PEM Yakıt Hücresi Yakıt Türüne Göre Performans Karşılaştırması.....	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Bir yakıt hücresindeki elektrokimyasal reaksiyonlar .....	8
Şekil 2.2.	Hidrojen-Hava yakıt hücresi sistemi .....	8
Şekil 2.3.	Bir alkali yakıt hücresinin şematığı.....	9
Şekil 2.4.	Bir proton değişim membranı yakıt hücresinin şematığı. ....	11
Şekil 2.5.	Bir doğrudan metanol yakıt hücresinin şematığı.....	12
Şekil 2.6.	Bir fosforik asit yakıt hücresinin şematığı. ....	13
Şekil 2.7.	Bir katı oksit yakıt hücresinin şematığı.....	14
Şekil 2.8.	a. Düz SOFC hücre yapısı, b. Tübüler SOFC hücre yapısı .....	15
Şekil 2.9.	Bir erimiş karbonat yakıt hücresinin şematığı.....	15
Şekil 2.10.	Tip I topolojisinin blok diyagramı.....	18
Şekil 2.11.	Tip II topolojisinin blok diyagramı .....	18
Şekil 2.12.	Tip III topolojisinin blok diyagramı.....	19
Şekil 2.13.	Tip IV topolojisinin blok diyagramı.....	19
Şekil 2.14.	Tip V topolojisinin blok diyagramı .....	20
Şekil 2.15.	Tip VI topolojisinin blok diyagramı.....	21
Şekil 2.16.	Tip VII topolojisinin blok diyagramı .....	21
Şekil 4.1.	ADVISOR Araç Giriş Ekranı.....	25
Şekil 4.2.	Simülasyon kurulum ekranı .....	26
Şekil 4.3.	Simülasyon sonuç sayfası.....	27
Şekil 5.1.	Yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli araca ait blok diyagramı .....	29
Şekil 5.2.	Sınıf 2 araçlar için WLTC sürüş çevrimi .....	37
Şekil 5.3.	HWFET sürüş çevrimi.....	38
Şekil 5.4.	İstanbul sürüş çevrimi .....	39
Şekil 5.5.	Li-Ion batarya grubuna sahip aracın ADVISOR programında giriş sayfası arayüzü .....	40
Şekil 5.6.	a) WLTC sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Li-Ion batarya güç çıkış grafiği, d) Li-Ion batarya şarj durum grafiği.....	41
Şekil 5.7.	Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın dinamik performans sonuçları .....	42
Şekil 5.8.	a) HWFET sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Li-Ion batarya güç çıkış grafiği, d) Li-Ion batarya şarj durum grafiği.....	43
Şekil 5.9.	a) İstanbul sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Li-Ion batarya güç çıkış grafiği, d) Li-Ion batarya şarj durum grafiği.....	44
Şekil 5.10.	a) HWFET ve WLTC sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre Li-Ion batarya şarj grafiği .....	45
Şekil 5.11.	a) HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre Li-Ion batarya şarj grafiği .....	46
Şekil 5.12.	Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın emisyon grafiği .....	47
Şekil 5.13.	Pb-Asit batarya grubuna sahip aracın ADVISOR programında giriş sayfası arayüzü .....	48

Şekil 5.14.	a) WLTC sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Pb-Asit batarya güç çıkış grafiği, d) Pb-Asit batarya şarj durum grafiği.....	49
Şekil 5.15.	Pb-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın dinamik performans sonuçları .....	49
Şekil 5.16.	a) HWFET sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Pb-Asit batarya güç çıkış grafiği, d) Pb-Asit batarya şarj durum grafiği.....	50
Şekil 5.17.	a) İstanbul sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Pb-Asit batarya güç çıkış grafiği, d) Pb-Asit batarya şarj durum grafiği.....	51
Şekil 5.18.	a) HWFET ve WLTC sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Sürüş çevrimlerine göre Pb-Asit batarya şarj grafiği .....	52
Şekil 5.19.	a) HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrim grafiği, ) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre Pb-Asit batarya şarj grafiği .....	53
Şekil 5.20.	Ni-MH batarya grubuna sahip aracın ADVISOR programında giriş sayfası arayüzü .....	54
Şekil 5.21.	a) WLTC sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) NiMH batarya güç çıkış grafiği, d) NiMH batarya şarj durum grafiği.....	54
Şekil 5.22.	NiMH batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın dinamik performans sonuçları .....	55
Şekil 5.23.	a) HWFET sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) NiMH güç çıkış grafiği, d) NiMH batarya şarj durum grafiği .....	56
Şekil 5.24.	a) İstanbul sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) NiMH batarya güç çıkış grafiği, d) NiMH batarya şarj durum grafiği.....	57
Şekil 5.25.	a) HWFET ve WLTC sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre NiMH batarya şarj grafiği .....	58
Şekil 5.26.	a) HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrim grafiği, ) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre NiMH batarya şarj grafiği .....	59
Şekil 5.27.	a) HWFET sürüş döngüsü SoC durumları, b) WLTC sürüş döngüsü SoC durumları c) İstanbul sürüş döngüsü SoC durumları.....	62

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Yakıt hücresi teknolojilerinin özeti .....	16
Tablo 3.1.	Hibrit elektrikli araçlarda yaygın kullanılan batarya türleri ve özellikleri.....	23
Tablo 5.1.	Araç parametreleri.....	30
Tablo 5.2.	Performans indikatörleri.....	31
Tablo 5.3.	ADVISOR programı üzerinde yer alan 1 modül Li-Ion batarya grubu özellikleri.....	35
Tablo 5.4.	ADVISOR programı üzerinde yer alan 1 modül Pb-Asit batarya grubu özellikleri .....	35
Tablo 5.5.	ADVISOR programı üzerinde yer alan 1 modül Ni-Mh batarya grubu özellikleri .....	35
Tablo 5.6.	WLTC Test Kategorileri .....	36
Tablo 5.7.	Sınıf 2 araçlar için WLTC sürüş çevrimi özellikleri.....	37
Tablo 5.8.	HWFET sürüş çevrimi özellikleri .....	38
Tablo 5.9.	İstanbul sürüş çevrimi özellikleri .....	39
Tablo 5.10.	Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın simülasyon sonuçları .....	42
Tablo 5.11.	Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın yakıt tüketimi değerleri .....	47
Tablo 5.12.	Pb-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın simülasyon sonuçları .....	50
Tablo 5.13.	Pb-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın yakıt tüketimi değerleri .....	53
Tablo 5.14.	NiMH batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın simülasyon sonuçları .....	55
Tablo 5.15.	NiMH batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın yakıt tüketimi değerleri .....	59
Tablo 5.16.	Farklı batarya gruplarına sahip yakıt hücreli araçların performans özellikleri.....	60
Tablo 5.17.	Farklı batarya gruplarına sahip yakıt hücreli araçların sürüş çevrimine göre yakıt tüketimi karşılaştırması .....	61
Tablo 5.18.	WLTC sürüş çevriminde farklı yakıt tipi kullanılarak yapılan analiz sonuçları .....	64
Tablo 5.19.	WLTC sürüş çevriminde farklı yakıt tipi kullanılarak yapılan analizin yakıt tüketimi karşılaştırması.....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Ön Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )
Ah	: Amper Saat
$\alpha_{\max}$	: Maksimum Eğim Açısı
$C_d$	: Aerodinamik Katsayısı
CH <sub>3</sub> OH	: Metanol
CO	: Karbon Monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	: Karbonat İyonu
$\delta$	: Dönen Kütle Düzeltme Katsayısı
e <sup>-</sup>	: Elektron
$f_r$	: Yuvarlanma Direnci Katsayısı
g	: Yerçekimi Kuvveti (m/s <sup>2</sup> )
H <sub>2</sub>	: Hidrojen Gazı
H <sub>2</sub> O	: Su
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sülfürik Asit
H <sup>+</sup>	: Hidrojen İyonu
$\eta_{DC}$	: DC/DC Dönüştürücü Verimliliği
$\eta_T$	: Şanzıman Verimliliği
i	: Maksimum Tırmanma Kabiliyeti
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kW	: Kilo Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
KOH	: Potasyum Hidroksit
L	: Litre
LiCoO <sub>2</sub>	: Lityum Kobalt Oksit
LiFePO <sub>4</sub>	: Lityum Demir Fosfat
Li-Ion	: Lityum İyon
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	: Lityum Manganez Oksit
m	: Kütle (kg)
MW	: Mega Watt
NiMH	: Nikel Metal Hidrür
Ni(OH) <sub>2</sub>	: Nikel (II)Hidroksit
NiOOH	: Nikel Oksit Hidroksit
NO <sub>x</sub>	: Azot Oksit
O <sub>2</sub>	: Oksijen Gazı
O <sup>2-</sup>	: Oksijen İyonları
OH <sup>-</sup>	: Hidroksit İyonu
P <sub>0</sub>	: Yakıt Hücresi Aksesuarlarının Gücü
P <sub>fc</sub>	: Yakıt Hücresi Nominal Gücü
P <sub>max</sub>	: Tepe Gücü
P <sub>n</sub>	: Nominal Güç
Pb	: Kurşun
Pb-Acid	: Kurşun Asit
PbO <sub>2</sub>	: Kurşun Dioksit
S	: Kükürt

sn	: Saniye
t	: Hızlanma Süresi (sn)
V	: Volt
$V_m$	: Maksimum Hız
v	: Hız
W	: Watt
Wh	: Watt Saat
°C	: Santigrat Derece

### **Kısaltmalar**

ADVISOR	: Advanced Vehicle Simulator (Gelişmiş Araç Simülatörü)
AFC	: Alkaline Fuel Cell (Alkali Yakıt Hücresi)
BEV	: Battery Electric Vehicle (Bataryalı Elektrikli Araçlar)
CYC	: Cycle (Döngü)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DMFC	: Direct Methanol Fuel Cell (Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi)
EPA	: United States Environmental Protection Agency (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Kurumu)
FCEV	: Fuel Cell Electric Vehicle (Yakıt Hücresi Elektrikli Araçlar)
GM	: General Motors
GUI	: Graphical User Interface (Grafik Kullanıcı Arayüzü)
HWFET	: Highway Fuel Economy Test (Otoyol/Karayolu Yakıt Test Prosedürü)
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell (Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi)
NEDC	: New European Drive Cycle (Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi)
NREL	: National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell (Fosforik Asit Yakıt Hücresi)
PEM	: Proton Exchange Membrane (Proton Değişim Membranı)
PEMFC	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi)
PMR	: Power to Mass Ratio (Güç/Kütle Oranı Endeksi)
SMES	: Superconducting Magnetic Energy Storage (Süperiletken Manyetik Enerji Depolama)
SoC	: State of Charge (Şarj Durumu)
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell (Katı Oksit Yakıt Hücresi)
SUV	: Sport Utility Vehicle (Spor Amaçlı Arazi Aracı)
WLTC	: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Döngüsü)

# YAKIT HÜCRELİ VE BATARYALI HİBRİT TAŞITLARIN FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNDE PERFORMANS ANALİZİ

## ÖZET

Bu çalışma, elektrikli taşıtlarda yakıt hücresi ve batarya hibrit sistemlerinin performans değerlendirmesini amaçlamaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimi ve elektrikli araçların yaygınlaşması, bu çalışmanın temel motivasyon kaynakları arasında yer alır. Tez kapsamında, PEM yakıt hücresi kullanılarak, Lityum İyon, Nikel Metal Hidrür ve Kurşun Asit bataryalarla donatılmış üç farklı hibrit araç modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle), HWFET (Highway Fuel Economy Test) ve İstanbul sürüş çevrimleri altında test edilmiştir.

Simülasyon sonuçları, farklı sürüş çevrimlerinde araçların enerji tüketimi, güç çıkışı, verimlilik ve çevresel etkileri gibi kritik performans göstergeleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) programı kullanılarak gerçekleştirilen bu simülasyonlar, hibrit sistemlerin enerji yönetim stratejilerinin ve bileşenlerinin verimliliğini ortaya koymuştur. Özellikle, rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımı ile yakıt hücresi ve bataryaların dinamik performansları analiz edilmiştir.

Araştırmanın bulguları, yakıt hücresi ve batarya kombinasyonlarının enerji verimliliği ve performans açısından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bu sistemlerin çevresel sürdürülebilirlik ve enerji tüketiminde optimizasyon potansiyeli sunmaktadır. Tezin sonuçları, gelecekteki elektrikli taşıt tasarımlarında yakıt hücresi ve batarya hibrit enerji sistemlerinin etkin kullanımına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** ADVISOR, Batarya Enerji Depolama Sistemi, Elektrikli Taşıtlar, Yakıt Hücresi.

# **PERFORMANCE ANALYSIS OF FUEL CELL AND BATTERY HYBRID VEHICLES IN DIFFERENT DRIVING CYCLES**

## **ABSTRACT**

This study aims to evaluate the performance of fuel cell and battery hybrid systems in electric vehicles. The development of renewable energy technologies and the increasing prevalence of electric vehicles are the primary motivations for this research. In this thesis, three different hybrid vehicle models equipped with PEM fuel cells and Lithium Ion, Nickel Metal Hydride and Lead Acid batteries were developed. These models were tested under the WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle), HWFET (Highway Fuel Economy Test), and Istanbul driving cycles.

The simulation results focus on critical performance indicators such as energy consumption, power output, efficiency, and environmental impacts of the vehicles under different driving cycles. These simulations, conducted using the ADVISOR program, have demonstrated the efficiency of energy management strategies and components in hybrid systems. In particular, the dynamic performances of regenerative braking energy recovery, fuel cells, and batteries have been analyzed.

The findings of the research show that the combination of fuel cells and batteries provides significant advantages in terms of energy efficiency and performance. Additionally, these systems offer potential for optimization in environmental sustainability and energy consumption. The results of the thesis provide valuable insights into the effective use of fuel cell and battery hybrid energy systems in future electric vehicle designs.

**Keywords:** ADVISOR, Battery Energy Storage System, Electric Vehicles, Fuel Cell.

## 1. GİRİŞ

Elektrikli taşıtlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırma ve çevresel ayak izimizi azaltma çabalarında önemli bir rol oynar. Bu tez, "Elektrikli Taşıtlarda Yakıt Hücresi ve Batarya Hibrit Sistemi: Bilgisayar Ortamında Karşılaştırmalı Performans Değerlendirmesi" başlığı altında, yakıt hücreli elektrikli taşıtlar ve bunlara entegre edilen batarya hibrit sistemlerinin performansını detaylı bir şekilde ele alır. Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler ve elektrikli taşıtların yaygınlaşması, bu çalışmanın temel motivasyon kaynaklarından biridir. Elektrikli taşıtların performansını, verimliliğini ve çevresel etkilerini iyileştirecek teknolojik yeniliklerin anlaşılması, bu tezin merkezinde yer alır.

Tezin ana gövdesi beş bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, "Yakıt Hücreli Taşıtlar" bölümünde, bu araçların tarihsel gelişimi, çalışma prensipleri, enerji dönüşüm mekanizmaları ve çevresel avantajları detaylı bir şekilde incelenir. İkinci bölüm, "Yakıt Hücreli Hibrit Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri" başlığını taşır ve farklı batarya teknolojilerinin bu sistemlerde nasıl kullanıldığını ve performans etkilerini ele alır. Üçüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan simülasyon aracının özellikleri ve simülasyon senaryoları için sunduğu olanaklar detaylandırılır. Dördüncü bölüm, "Simülasyon Çalışması" bölümü, ADVISOR programı kullanılarak gerçekleştirilen performans değerlendirme ve karşılaştırmalı analiz çalışmalarını sunar. Son olarak "Sonuçlar ve Öneriler" kısmında, araştırma bulguları özetlenir ve bu bulguların anlamı tartışılır.

Bu tez, belirlenen güç gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmış bir yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli aracın, WLTC, HWFET ve İstanbul sürüş çevrimlerindeki performansını üç farklı batarya çeşidi kullanarak analiz etmeyi hedeflemektedir. Araştırma, ayrıca aracın ana enerji kaynağı olan PEM yakıt hücresinin hem saf hidrojen ile hem de benzinden hidrojen üreten bir sistem kullanılarak yakıt tüketimini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Bu çerçevede gerçekleştirilen sürüş testleri ve analizler, aracın enerji yönetimi stratejilerini, batarya şarj-durum profillerini, yakıt hücresi ve batarya güç çıkışlarını detaylı şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu bilgiler, hibrit araç teknolojilerinin daha da geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

## 1.1. Literatür Taraması

Son 20 yıl içinde hibrit elektrikli araçlar üzerine yapılan yayın sayısının arttığı belirginleşmektedir. Araştırma konuları, laboratuvar ortamlarında sınırlı ya da ücretli test imkanları nedeniyle, genellikle ADVISOR araç simülasyon programını kullanarak yapılan bilimsel çalışmalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmaların çoğu fiziksel testlerle doğrulanmıştır. İlgili yayınların bazıları aşağıda listelenmiştir.

Amaç ve arkadaşları (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; otomotiv elektrik sistemlerinin, ADVISOR programı kullanılarak simülasyonu yapılmış ve örnek modeller karşılaştırılarak analiz edilmiş ve makalede özellikle bu programın nasıl kullanılacağı örnek bir uygulama ile tanıtılmıştır.

Chiver ve arkadaşlarının (2022) yazdıkları makalede, bataryalı elektrikli araçların performansıyla ilgili sorunlar ele alınmıştır. Çalışmayı gerçekleştirmek için ADVISOR yazılımını kullanmışlardır. Yazarlar araç tipi yapılandırmasının yanı sıra, aracın bileşenlerini veya kontrol mantığını değiştirme imkanları ile simülasyon sonuçlarını ve bunların önemini açıklamaktadır.

Ehsani ve arkadaşlarının (2021) yazdığı kitap bölüm 16'da, yakıt hücreli hibrit tahrik sistemi tasarımı tanıtılmaktadır. İlk olarak, işletim prensipleri ve tahrik sistemi kontrol sistemleri analiz edilir. Ardından yakıt hücresinin, elektrikli tahrik sisteminin ve enerji depolama sisteminin sistem tasarımına odaklanan bir tasarım metodolojisi sunulmuştur. Bir tasarım örneği ve buna karşılık gelen performans simülasyon sonuçları da verilmektedir.

Gautam ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, elektrikli ve hibrit araçların modelleme ve simülasyon ihtiyacı tartışılmaktadır. ADVISOR gibi programların modelleme ve simülasyon yetenekleri bir örnek üzerinden gösterilmiştir. Geleneksel araçlar ve hibrit elektrikli araçlar için yapılan genel karşılaştırma ve analiz sonuçları gösterilmiştir.

Kalaiarasi ve arkadaşları (2022) bu araştırma makalesinde, bir yakıt hücreli elektrikli araç için gerekli tahrik sistemini tasarlamışlardır. MATLAB/Simulink altında elde edilen sonuçlar ve bazı deneysel sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır.

Karaoğlan ve arkadaşlarının (2014) alışmasında PEM yakıt hucresi kullanarak tasarlanacak bir taşıt için arzu edilen maksimum yokuş eğimi, maksimum hız ve ivmelenme gibi parametrelere göre elektrik motoru, yakıt hucresi ve bataryanın seçimini esas alan hesaplamalar yapılmıştır ve bu aracın ADVISOR programı üzerinde analizi yapılmıştır.

Kartal ve ekibi (2018), beş farklı bölgeden, ikisi yurt içi olmak üzere, sürüş çevrimlerini kullanarak hibrit araçların günlük kullanım profillerini karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Bu veriler, ADVISOR programı aracılığıyla işlenerek araç performansı ve emisyonlar gibi kritik faktörler üzerinde analizler yapılmıştır.

KoteswaraRao ve arkadaşları (2023), MATLAB/Simulink tabanlı ADVISOR aracılığıyla bir yakıt hücreli ve batarya destekli aracı modellemiş ve analiz etmişlerdir. Araştırmada, güç kaynaklarının optimal boyutlandırılması ve WLTC çevriminde aracın sürüş davranışlarını tahmin etmeye odaklanılmıştır.

Kunt (2019), yaptığı çalışmada ADVISOR araç simülasyon programı kullanarak, bir elektrikli araçta yuvarlanma direncinin değişiminin rejeneratif frenleme üzerindeki etkisini incelemiştir. Yüksek yuvarlanma direncine sahip lastiklerin düşük dirençli lastiklere kıyasla daha fazla kinetik enerji absorbe ettiği ve bu durumun rejeneratif frenleme verimini düşürdüğü bulunmuştur.

Kuşdoğan ve arkadaşı (2021), elektrikli taşıtların batarya sistemlerini detaylı bir Şekilde incelemişlerdir. Bu çalışmada, hibrit elektrikli taşıtlar için kullanılan çeşitli batarya türleri, ADVISOR simülasyon programı aracılığıyla hem seri hem de paralel konfigürasyonlarda test edilmiştir.

Liang ve arkadaşı (2015) yazdığı makalede, bir PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) bazlı hibrit araç için enerji sisteminin optimizasyonunu araştırmışlardır. Araştırma, yakıt hucresi, batarya ve süperkapasitör içeren üç güç kaynağının optimal enerji dağıtımını vurgulamıştır. ADVISOR simülasyon programı kullanarak, bu stratejiyi geliştirip aracın performansını değerlendirmişlerdir.

Ogburn ve ekibinin (2000) alışmasında, beş kişilik bir sedan araç, bir yakıt hücreli hibrit elektrikli araca dnştrlmştir. Araç için ADVISOR simülasyon programı kullanılarak

bir model geliştirilmiş ve bu model, şehir ve karayolu sürüş döngülerinde test edilerek doğrulanmıştır.

Oussama ve ekibinin (2022) çalışmasında, BEV'ler (Battery Electric Vehicle) ve FCEV'ler (Fuel Cell Electric Vehicle) için MATLAB tabanlı ADVISOR programını kullanarak performans parametrelerini analiz etmişlerdir. Ayrıca bu çalışma, her iki araç türünün batarya ve hidrojen yakıtının etkilerini karşılaştırırken, aynı zamanda konvansiyonel araçların elektrikli araçlara dönüşümünün çevresel avantajlarını da inceliyor.

Özen (2021), yüksek lisans tez çalışmasında hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya sistemlerini detaylı bir şekilde incelemiştir. NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen ADVISOR programını kullanarak, farklı hibrit taşıt türlerindeki batarya sistemlerinin performansını karşılaştırmış ve analiz etmiştir.

Rashid ve arkadaşı (2017) çalışmasında, hibrit elektrikli araçların çeşitli konfigürasyonlarını modellerken, güç aktarma sistemlerini fiziksel modellerle ve ADVISOR simülasyon programını kullanarak analiz etmişlerdir. Araştırma aynı zamanda donanımın dinamometre ve gerçek yol testlerindeki performansını test ederek, bu sonuçları simülasyon verileriyle karşılaştırmışlardır.

Rusu ve ekibi (2018) çalışmasında, ana güç kaynağı olarak bir yakıt hücresi kullanan tam elektrikli bir aracın modelini sunmuşlardır. ADVISOR programı kullanarak yakıt hücresinin davranışını analiz etmişler ve daha temiz bir enerji üretimi elde etme potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, çeşitli yakıt hücresi türlerini karşılaştırmak ve farklı işletim modlarında performanslarını değerlendirmek için araca yönelik simülasyonlar yapılmıştır.

Tong ve arkadaşları (2022) yazdığı makalede, orta boy bir araç referans alınarak yakıt hücresi, yardımcı batarya sistemi ve sürüş motorundan oluşan bir güç sistemi için parametre eşleştirme tasarımı yapmıştır. ADVISOR kullanılarak oluşturulan simülasyon modelleriyle, SoC (State of Charge)'u stabilize etmek için güç takip kontrol stratejisi uygulanmış ve "CYC\_UDDS" simülasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu tasarımın aracın dinamik performans ihtiyaçlarını karşıladığını ortaya koymuştur.

Türkmen ve ekibi (2017), ADVISOR programı kullanarak otomobillerdeki yakıt hücresi sistemlerini modellemiş ve farklı yakıt hücresi tiplerini karşılaştırarak analiz etmiştir. Çalışma, maliyet ve güvenlik açısından bu sistemlerin araçlarla uyumunu vurgulamakta ve NREL tarafından geliştirilen ADVISOR yazılımının bu tür karşılaştırmalarda nasıl kullanıldığını örnek üzerinden göstermiştir.

Yaich ve arkadaşları (2015), üç farklı araç topolojisi (elektrikli araç, seri hibrit elektrikli araç ve paralel hibrit elektrikli araç) için ADVISOR kullanarak modelleme ve simülasyon çalışması yapmıştır. Çalışmada, araçların performansı, tüketimi ve kirlilik seviyelerinin dinamik bir analizi gerçekleştirilmiştir.



## 2. YAKIT HÜCRELİ TAŞITLAR

### 2.1. Yakıt Hücreli Taşıtların Tarihi

1839 yılında, Sir William Grove'un suyun elektroliz işlemini tersine çevirerek elektrik enerjisi üretebileceği fikrini ortaya attığı bilinmektedir. 1889 yılına gelindiğinde, Charles Langer ve Ludwig Mond, hava ile kömür gazının kombinasyonunu kullanarak ilk işlevsel yakıt hücresini geliştirirken, "Yakıt Hücresi" kavramını da literatüre kazandırmışlardır. 1900'lerin başında, kömür veya karbonu elektriğe dönüştüren yakıt hücreleri üzerine yapılan çalışmalar artarken, içten yanmalı motor teknolojisinin gelişimi, bu yeni teknolojinin ilerlemesine yönelik umutları geçici bir süre için sekteye uğratmıştır.

Francis Thomas Bacon, 1939 yılında ilk yakıt hücresini test etmiştir. Bacon'un geliştirdiği bu yakıt hücresi, nikel elektrotlar ve doğal bir katalizör olarak görev yapan alkali bir madde içeriyordu. Çalışmanın temel reaktanları olarak hidrojen ve oksijen kullanıldı. Teknik zorluklar nedeniyle, Bacon ve ekibinin gerçek anlamda işlevsel bir 5 kW gücünde yakıt hücresi sistemini ilk kez üretmeleri 1959 yılına kadar ancak gerçekleşebilmiştir. 1959 yılında, 15 kW'lık bir yakıt hücresiyle donatılmış modifiye bir Allis Chalmers çiftlik traktörü, modern yakıt hücreli araçların öncüsü olmuştur.

NASA, 1950'lerin sonlarına doğru, uzay misyonlarında kullanılmak üzere kompakt elektrik jeneratörlerinin geliştirilmesine başladı. Bu dönemden itibaren, yakıt hücresi teknolojisine odaklanan yüzlerce projeye, bu alandaki araştırmaları desteklemeye yönelik adımlar atıldı. Yakıt hücreleri, uzay programında ispatlanmış bir değere büründü ve bir dizi uzay görevinde güvenilir elektrik kaynağı olarak hizmet etti.

1970'te, General Electric ve diğer firmalar PEM teknolojisi üzerinde çalışmaya başladılar. Otomobil endüstrisi, 1990'larda yakıt hücreli elektrikli araçlara büyük bir ilgi göstermeye başladı ve 2001'de, 700 bar kapasiteli hidrojen yakıt tanklarını içeren bir yakıt hücreli araç geliştirildi (Ehsani ve diğ., 2021). Otomobil sektörü tarihinde, ilk konsept yakıt hücreli elektrikli araç olarak "FCX Clarity" adıyla Honda tarafından tanıtıldı. Bu öncü araç, Japonya'daki müşterilere kiralama yoluyla sunuldu ve 2015 yılında üretimi sona erdi. Honda, toplamda 45 adet FCX Clarity üretti; bu araçlar, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki müşteriler tarafından da kiralık olarak kullanıldı. 2008'den 2015'e kadar

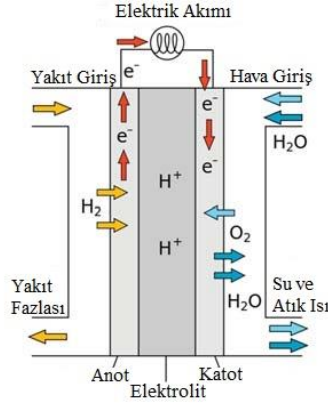
20 farklı yakıt hücreli elektrikli araç piyasaya sürüldü. Hyundai, 2014'ten sonra “ix35” yakıt hücreli elektrikli araç modelini tanıttı ve bu model 2014-2018 yılları arasında kiralama yöntemi ile müşterilere sunuldu. Aynı yıl Hyundai, “Nexo” modelini piyasaya sürdü. Toyota, “Toyota Mirai” adında bir yakıt hücreli elektrikli araç geliştirdi; Mirai'nin toplam üretim adedi 5300 olup, bunların 2900'ü ABD'de, 2100'ü Japonya'da ve 200'ü Avrupa'da satıldı. 2011 yılı itibarıyla, yakıt hücreli elektrikli otobüslerin sayısı 100 adettir. 2020'ye gelindiğinde, sadece üç otomobil üreticisi yakıt hücreli elektrikli araç üretmiştir (Gupta ve Perveen, 2023).

Son dönemlerde, yakıt hücresi teknolojisinin taşıtlar başta olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanımının geliştirilmesine yönelik, birçok üretici ve kamu kurumu tarafından desteklenen araştırmalar dikkat çekmektedir. Hidrojenin üretim, depolama ve dağıtım gibi süreçler büyük zorluklar barındırmaktadır. Yakıt hücresi teknolojisine dayalı taşıtların piyasa sürülmesi yolunda, bu zorlukların aşılması için önemli bir mesafe kat edilmesi gerekmektedir (Ehsani ve diğ., 2021).

## **2.2. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi**

Yakıt hücresi, bir yakıtın içerdiği kimyasal enerjiyi elektrokimyasal süreçler kullanarak elektrik enerjisine çeviren bir tür galvanik hücre olarak tanımlanır. Yakıt ve oksidan, reaksiyon gerçekleştiren hücrenin iki elektrotu tarafından sürekli bir şekilde sağlanır (Ehsani ve diğ., 2021).

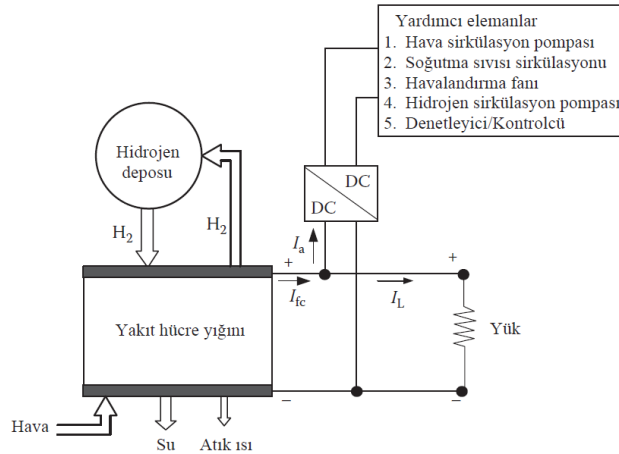
Şekil 2.1, basit bir yakıt hücresinin yapısını sergilemektedir. Yakıt hücresi temelde üç ana parçadan meydana gelir: elektrolit, anot ve katot. Anot bölümüne hidrojen gazı verilirken, katoda oksijen gazı sağlanır. Hidrojen gazı, pozitif yüklü protonlar ve elektronlar olarak ayrışır. Elektrolit membranı sadece protonların geçişine müsaade eder ve elektronların geçişine engel olur. Elektrolit, protonların katoda ulaşmasına aracılık eden bir ortam olarak işlev görür. Elektronlar, dış devrede elektrik akımı üreterek katoda doğru hareket eder. Pozitif yüklü protonlar, katotta elektronlarla tekrar birleşir ve bu süreç sonucunda su ve ısı yan ürünleri oluşur (Mitra ve diğ., 2022). Yakıt hücresi tarafından teorik olarak üretilen gerilim yaklaşık 1,2 V civarındadır ancak pratik uygulamalarda bu durum aynı değildir. Pratik uygulamalarda, yakıt hücresi tarafından üretilen gerilim, nominal akımda 0,6 - 0,7 V civarında olur.



Şekil 2.1. Bir yakıt hücresindeki elektrokimyasal reaksiyonlar (Rusu ve diğ., 2018)

Üretilen gerilimin değeri, yakıt hücrelerinde meydana gelen çeşitli kayıplar nedeniyle küçüktür; bu kayıplar üretilen gerilimi düşürür ve akımı artırır. Bu kayıplar aktivasyon kaybı, konsantrasyon kaybı ve omik kayıptır. Üretilen gerilim az olduğundan, gereksinime göre gerilim değerini artırmak için bir dizi olarak birbirine bağlanan çeşitli yakıt hücreleri, yakıt hücresi yığını olarak bilinir. Bağlanacak hücre sayısı, belirli bir işlev için gerekli olan gerilim gereksinimine bağlıdır (Mitra ve diğ., 2022).

Pratikte, yakıt hücrelerinin işlevini sürdürebilmesi için ek donanımlara gereksinim duyulur. Şekil 2.2'de belirtildiği üzere, bu ek donanımlar esasen hava sirkülasyon pompası, soğutma sirkülasyon pompası, bir havalandırma fanı, yakıt sağlama pompası ve elektronik kontrol ünitelerini kapsar. Bu yardımcı donanımlar içerisinde, hava sirkülasyon pompası en yüksek enerji tüketimine sahip parçadır. Diğer ek ekipmanlar ise hava sirkülasyon pompasına kıyasla oldukça düşük enerji tüketirler (Ehsani ve diğ., 2021).



Şekil 2.2. Hidrojen-Hava yakıt hücresi sistemi (Ehsani ve diğ., 2021)

## 2.3. Yakıt Hücresi Teknolojileri

Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi ve verimliliği, kullanılan elektrolit türüne büyük ölçüde bağlıdır. Bu bağlamda, elektrolitlerin kimyasal yapısı, yakıt hücrelerini farklı özelliklere ve uygulama alanlarına sahip altı ana kategoriye ayırır. Bu sınıflandırma, yakıt hücreleri teknolojisinin anlaşılması ve geliştirilmesi için temel bir çerçeve sunar.

Bunları; Alkali Yakıt Hücreleri, Proton Değişim Membranı Yakıt Hücreleri, Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri, Fosforik Asit Yakıt Hücreleri, Katı Oksit Yakıt Hücreleri ve Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri olarak altıya ayırabiliriz.

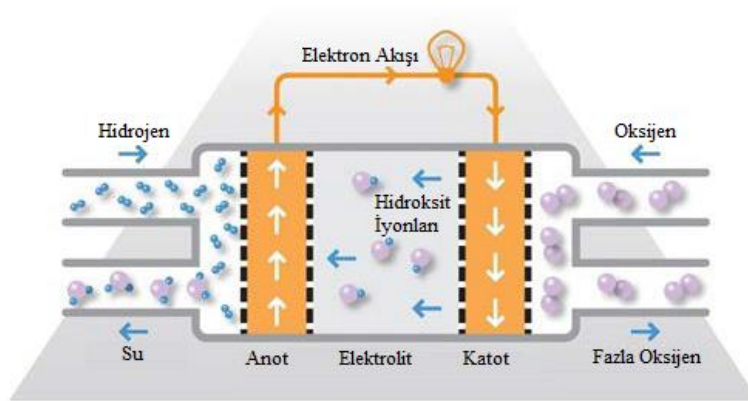
### 2.3.1. Alkali Yakıt Hücreleri

Alkali yakıt hücrelerinde, iyon taşınımı amacıyla, elektrotlar arası köprü görevi gören elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) bazlı sulu bir çözelti tercih edilir. Bu çözeltinin alkalik doğası, iyon taşıma işlevini hidroksit iyonları ( $\text{OH}^-$ ) üzerinden gerçekleştirir (Ehsani ve diğ., 2021).

Meydana gelen ana tepkimeler Denklem (2.1),(2.2) ve (2.3);



şeklindedir.



Şekil 2.3. Bir alkali yakıt hücresinin şematiği (Tronstad ve diğ., 2017)

AFC (Alkaline Fuel Cell) normalde bir nikel anot, bir gümüş katot ve alkali bir elektrolitten oluşur. Yakıt olarak hidrojen ( $H_2$ ) ve oksijen ( $O_2$ ) kullanılır ve hidroksit iyonları ( $OH^-$ ) elektrolitten katottan anoda taşınır. AFC'nin bozulmaması için hidrojen ve oksijenin saf olması gerekmektedir. Bir AFC'nin şematik bir görünümü Şekil 2.3'te yer almaktadır (Tronstad ve diğ., 2017).

AFC teknolojisi, ekonomik katalizörler ve kolay bulunan elektrolitler sayesinde maliyet açısından avantajlı bir seçenektir. Bu hücrelerin oda sıcaklığında çalışabilme kabiliyeti, onları güvenlik perspektifinden çekici kılar. AFC sistemlerinin operasyonel esnekliği sayesinde, soğuk ortamlarda hızlı bir şekilde devreye alınmaları mümkündür. Yan ürün olarak su üreten AFC'ler, diğer zararlı emisyonları barındırmazlar. Bu hücrelerin verimliliği genellikle %50 ila %60 arasındadır, bu da yakıtların yeniden işlenmesine veya ilave ısı geri kazanım sistemlerinin kullanımına olan ihtiyacı ortadan kaldırır (Tronstad ve diğ., 2017).

AFC teknolojisinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, karbondioksit zehirlenmesidir. Alkali elektrolit, karbondioksit ile yoğun bir şekilde reaksiyona girme eğilimi gösterir ve bu süreçte karbonat iyonları ( $CO_3^{2-}$ ) meydana gelir. Bu iyonlar, yakıt hücresinin reaksiyon sürecine katılmazlar ve dolayısıyla hücrenin performansını negatif yönde etkilerler. Karbonat oluşumu, ayrıca elektrotların tıkanmasına ve çökelti birikimine neden olabilir. Bu problem, elektrolitin sürekli dolaşımı yoluyla çözülebilir; fakat bu yaklaşım, sistemin maliyetini ve karmaşıklığını artırır (Ehsani ve diğ., 2021).

AFC'lerin avantajları, ekonomik katalizörler ve maliyeti düşük elektrolitler kullanmaları, yüksek verimlilik oranlarına sahip olmaları ve düşük sıcaklık koşullarında çalışabilme yetenekleri olarak söylenebilir (Ehsani ve diğ., 2021).

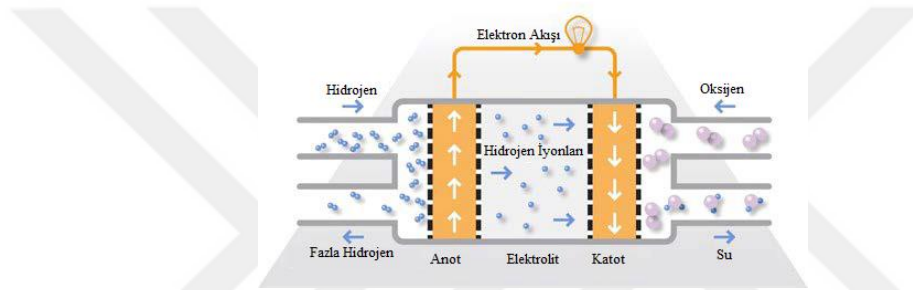
### **2.3.2. Proton Değişim Membranı Yakıt Hücreleri**

PEMFC, platin bazlı elektrotlar kullanır ve elektrolit, hidrojen iyonlarını ( $H^+$ ) geçiren elektriksel bir yalıtkan olan nemlendirilmiş bir polimer membrandır. Çalışma sıcaklığı 50-100°C arasındadır, 100°C üzerindeki sıcaklıklar membranın nemli kalması gerektiği için uygun değildir. PEMFC'nin şematik bir gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir. PEMFC, yakıt olarak saf hidrojen ve oksitleyici olarak oksijen veya hava kullanılır. Elektrik ve

ısıya ek olarak su üretir. Hidrojenden başka yakıt kaynakları kullanılacaksa, PEMFC'ye enjekte edilmeden önce hidrojene dönüştürülmesi gerekmektedir. PEMFC'de gerçekleşen ana tepkimeler Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6);



şeklindedir.



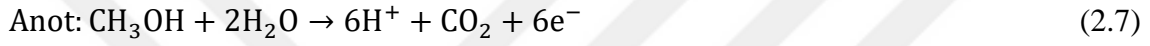
Şekil 2.4. Bir proton değişim membranı yakıt hücresinin şematiği (Tronstad ve diğ., 2017)

Platin bazlı katalizör kullanımı, maliyetleri yükseltir ve aynı zamanda karbon monoksit (CO) ve kükürt (S) gibi maddelerin varlığında zehirlenme riski taşır. PEMFC sistemleri saf hidrojen gerektirse de, AFC'ler kadar zehirlenmeye karşı duyarlı değildir. Hidrokarbon tabanlı yakıtlar, PEMFC için alternatif olarak değerlendirilebilir; ancak, bu durumda hidrojenin gerekli saflıkta elde edilmesi için buhar reformasyonu ve su-gaz kaydırma işlemleri zorunlu hale gelir. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında, PEMFC sistemleri sadece su buharı salımı yaparken; hidrokarbonlar kullanıldığında karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve düşük düzeyde azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları ortaya çıkar (Tronstad ve diğ., 2017).

### 2.3.3. Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri

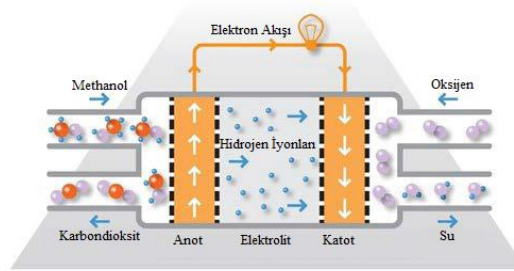
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), adından da anlaşılacağı üzere, hidrojene dönüşüm gerektirmeden metanolü doğrudan kullanabilen bir sistemdir. Bu teknoloji, PEMFC ile benzer bir yapıda olup, polimer bir membran elektrolit içerir. Elektrotlar, metanol içindeki hidrojeni direkt olarak elektrokimyasal reaksiyona sokabilen platin-rutenyum

alaşımı bir katalizöre sahiptir, bu sayede elektrik üretimi gerçekleşir. DMFC sistemleri, özellikle düşük enerji gereksinimlerini uzun süre boyunca karşılayabilme avantajıyla, 5 kW'a kadar olan güç çıkışlarında etkili bir çözüm sunar. Bu hücreler tipik olarak 50-120°C aralığında çalışır; yüksek sıcaklık ve basınç, hücrenin verimliliğini artırma potansiyeline sahip olmasına rağmen, sistemdeki toplam enerji kayıplarını da artırabilir, bu da kazanılan avantajı ortadan kaldırabilir. DMFC teknolojisi, yakıt olarak zayıf bir metanol su çözeltisi (%3) kullanır. Metanolün anotta oksidasyonu gerçekleştiğinde, bu süreç karbondioksit emisyonu üretir, böylece DMFC'nin çevresel etkisi de dikkate alınması gereken bir faktör haline gelir (Tronstad ve diğ., 2017). Bir DMFC'nin yarı-tepkimleri Denklem (2.7), (2.8) ve (2.9);



şeklindedir.

Metanol kullanan bir DMFC için bir akış şeması, Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Bir doğrudan metanol yakıt hücresinin şematığı (Tronstad ve diğ., 2017)

Metanol, hidrojenle kıyaslandığında daha kolay taşınabilir ve depolanabilir, yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir yakıttır. Ancak, metanol kullanımı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarına sebep olmakla birlikte, DMFC sistemlerinden nitrojen oksitler (NO<sub>x</sub>) gibi emisyonlar yayılmaz. DMFC'nin verimliliği genellikle düşük olup, yaklaşık %20 civarındadır. DMFC teknolojisinin karşılaştığı önemli sorunlardan biri metanol geçişidir; bu durum, metanolün elektrolit membranından geçip katotta direkt olarak oksijen ile

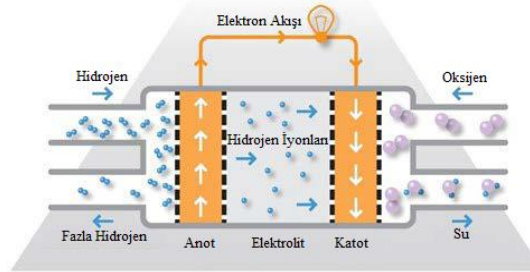
tepkimeye girmesini ifade eder ve bu da hücre verimliliğinin düşmesine neden olur (Tronstad ve diğ., 2017).

### 2.3.4. Fosforik Asit Yakıt Hücreleri

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), hidrojen iyonlarını iletmek için asidik bir elektrolit olan fosforik asidi kullanır. Anot ve katot reaksiyonları, PEMFC ile benzerlik gösterir. PAFC, silisyum karbür yapısında fosforik asit içeren bir elektrolit ve karbon üzerine dağıtılmış platinden yapılmış elektrotlara sahiptir. PAFC'nin şematik bir sunumu Şekil 2.6'da verilmiştir ve yarı-tepkimler Denklem (2.10), (2.11) ve (2.12);



şeklindedir.



Şekil 2.6. Bir fosforik asit yakıt hücresinin şematigi (Tronstad ve diğ., 2017)

Fosforik asit bazlı elektrolit sıcaklığının donma noktası olan 42°C'nin üzerinde tutulması gerekmektedir. Elektrolitin dondurulup daha sonra çözülmesi, hücre mekanizmasına aşırı zorluklar getirebilir. Bu sıcaklık seviyesini korumak için gerekli olan ek donanım, maliyet, karmaşıklık, ağırlık ve hacimde artışa neden olur. Bu tür zorluklar, genellikle sabit kullanımlarda sorun teşkil etmezken, taşıt uygulamaları için uygun olmayabilir. Ayrıca, 150°C üzerindeki yüksek çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak, bataryanın ısıtılmasıyla ortaya çıkan enerji tüketimi de başka bir sorundur. Yakıt hücresi her etkinleştirildiğinde, en uygun çalışma sıcaklığına ulaşmak için enerji sarfiyatı gerekir ve her kapatıldığında harcanan enerji kayıp olur (Ehsani ve diğ., 2021).

PAFC için ana endişe CO<sub>2</sub> zehirlenmesidir. Yakıttaki CO<sub>2</sub>, alkali elektrolit ile tepkimeye girerek verimliliği düşürecek ve sonuçta potasyum karbonatın çökmesine ve hücrenin tıkanmasına yol açacaktır (Tronstad ve diğ., 2017).

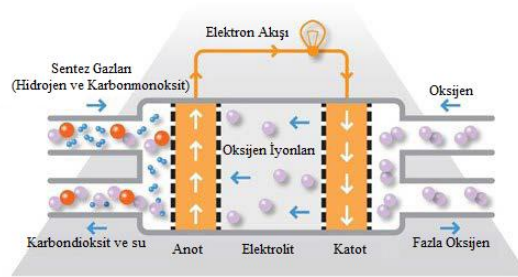
### 2.3.5. Katı Oksit Yakıt Hücreleri

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), seramik bazlı bir elektrolit kullanarak 1000-1200°C arası sıcaklıklarda işlev görür. Bu elektrolitler, genellikle oksijen iyonlarını (O<sup>2-</sup>) taşımak üzere zirkonyanın itriyum ile dengelenmiş formundan yapılmıştır. Bunun yanı sıra, bazı seramik çeşitleri hidrojen iyonlarının taşınmasını sağlar. İyonların taşınma süreci, yarı iletkenlerdeki katı hal dinamiklerine benzer şekillerde meydana gelir ve yakıt hücresinin adı bu benzerliğe dayanarak verilmiştir. SOFC'de gerçekleşen yarı-tepkimler Denklem (2.13), (2.14) ve (2.15);



şeklindedir.

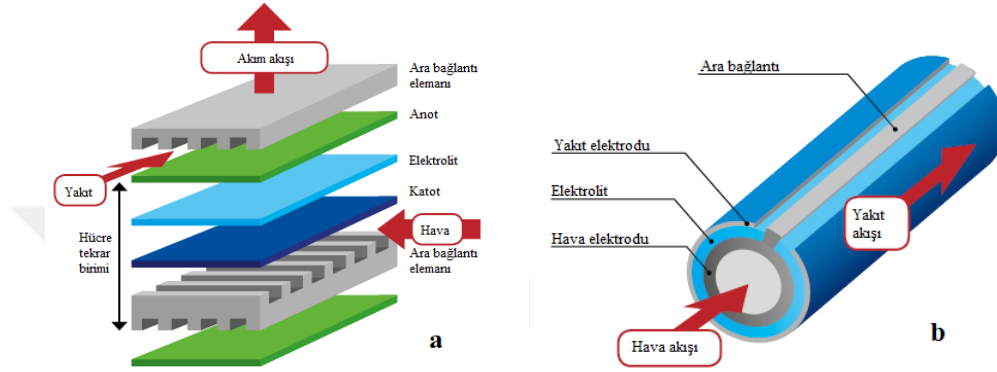
Bir SOFC için bir akış şeması Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Bir katı oksit yakıt hücresinin şematığı (Tronstad ve diğ., 2017)

SOFC'nin elektriksel verimliliği yüksektir ve yaklaşık %60'tır, ancak bir ısı geri kazanım sistemi uygulanırsa %85 veya daha yükseğe çıkartılabilir. SOFC'ler için iki olası geometri bulunmaktadır. Şekil 2.8’de gösterilen düzlemsel bir SOFC’de her hücre düz bir plaktır, hücrenin her bileşeni birbirinin üzerine yerleştirilir. Şekil 2.9’da yer alan tübüler SOFC,

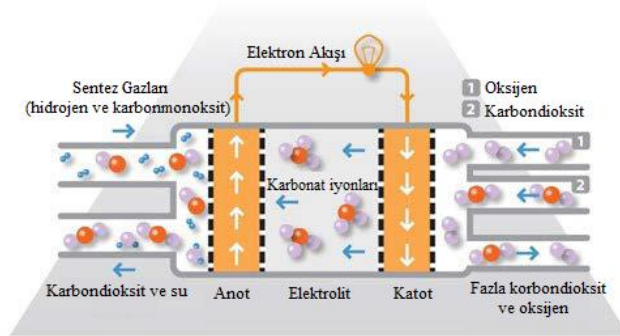
bir tüp olarak şekillendirilmiştir. Bir elektrot iç tüpken, diğer elektrot dış tüptür ve aralarında elektrolit bulunur. Tübüler SOFC termal döngülere karşı daha stabil olmasına rağmen, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve üretiminin daha kolay olması nedeniyle düzlemsel SOFC daha avantajlı bir tasarım olarak kabul edilir. SOFC'leri bir batarya ile birleştirmek termal gerilimi azaltacak ve daha esnek bir işletim sağlayacaktır (Tronstad ve diğ., 2017).



Şekil 2.8.a. Düz SOFC hücre yapısı b. Tübüler SOFC hücre yapısı

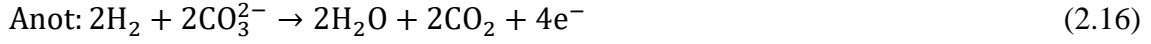
### 2.3.6. Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri

MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), 600-700°C arasında yüksek sıcaklıkta çalışan bir yakıt hücresidir. Elektrolit, erimiş bir karbonat tuzudur ve soylu metal katalizöre ihtiyaç duyulmaz. Anot genellikle bir nikel alaşımı ve katot genellikle yapısında lityum bulunan nikel oksitten oluşur. MCFC'ye ait bir şematik Şekil 2.9'da verilmiştir (Tronstad ve diğ., 2017).



Şekil 2.9. Bir erimiş karbonat yakıt hücresinin şematiki (Tronstad ve diğ., 2017)

Elektrot tepkimeleri diğer yakıt hücrelerinden farklıdır ve Denklem (2.16), (2.17) ve (2.18)'deki



gibidir.

MCFC'nin diğer yakıt hücre tiplerinden en belirgin ayrımı, katot tarafında karbondioksitin varlığının zorunlu olmasıdır. Anot bölgesinden geri kazanılabildiğinden, karbondioksit için dışarıdan bir kaynağa ihtiyaç duyulmaz. MCFC teknolojisi, saf hidrojen yerine, hidrokarbon bazlı yakıtlarla çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Ehsani ve diğ., 2021).

MCFC'ler, hidrokarbon yakıtları kullanabilme yetenekleri, düşük maliyetli katalizör gereksinimleri, yüksek işlem hızları sayesinde elde edilen artırılmış verimlilik ve zehirlenme etkilerine karşı gösterdikleri direnç gibi özelliklerle ön plana çıkarlar. Tablo 2.1'de genel yakıt hücresi türleri ve çalışma özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Yakıt hücresi teknolojilerinin özeti

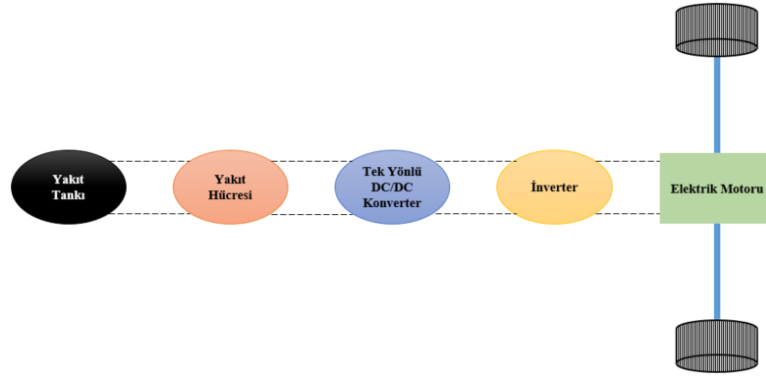
	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	SOFC	MCFC
<b>Yakıt</b>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub> /CO	H <sub>2</sub> /CO
<b>Çalışma Sıcaklığı (°C)</b>	<100	50-100	50-130	150-200	1000-1200	600-700
<b>Elektriksel Verimlilik</b>	50-60%	60%	20-40%	40%	60%	50%
<b>Güç Performans Aralığı</b>	5 W-250 kW	<550 kW	>1,5 kW	45 kW-1,5 MW	4 kW-3,5MW	1 kW - 1,5 MW
<b>Artı Yönleri</b>	1. Platin yerine kullanılabilir. 2. Ucuz 3. Kolayca tepkimeye girer. 4. Hızlı başlangıç	1. Geniş işletim sınırı. 2. Kolay ölçeklendirme. 3. Hızlı başlangıç. 4. Güç yoğunluğu yüksek.	1. Zararlı gaz salınımı yok. 2. Daha yüksek enerji yoğunluğu. 3. Metanolün kolay depolanması. 4. Metanol pahalı değil.	1. Daha az kirletici madde üretilir. 2. Diğer hücelere göre daha ucuz maliyetli. 3. Kojenerasyon ile kullanılabilir.	1. Geniş uygulama yelpazesi 2. Daha az masraflı. 3. Farklı yakıtlar kullanılabilir.	1. Daha yüksek hücre performansı 2. Farklı reaktanlar kullanılabilir. 3. Gaz türbinlerine uygulanabilir.
<b>Eksi Yönleri</b>	1. Karbondioksit varlığında hücre verimliliğinde azalma. 2. Katot bölgesindeki oksidanın saflığı da çok yüksek olmalıdır.	1. İndirgeme tepkimesi yavaş. 2. Termal yönetim sorunları. 3. Hücrede su baskını. 4. Karbon monoksit zehirlenmesi. 5. Yakıt saflığı yüksek olmalı.	1. Reaktanların karışma olasılığı. 2. Yakıtın konsantrasyonunun hücre performansı üzerinde doğrudan etkisi vardır. 3. Kullanılan katalizör pahalıdır. 4. Katodik elektrot kolayca zehirlenebilir.	1. Daha uzun başlama süresi. 2. Hücrelerin üretiminde kullanılan malzemeler sınırlıdır. 3. Güç yoğunluğu, diğer hücrelerde elde edilene göre daha düşüktür.	1. Çalışmaya başlaması zaman alır. 2. Hücre gelişimi için uygun malzemeler azdır. 3. Elektrolitler yüksek dirence karşı hassastır.	1. Hücrenin yapımında kullanılan bazı malzemeler korozyona karşı hassastır. 2. Güç yoğunluğu daha düşüktür. 3. Başlangıç süresi uzun.

## 2.4. Yakıt Hücreli Araç Topolojileri

Ek enerji birimleri olarak bataryalar, süperkapasitörler, süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri, fotovoltaik paneller ve volanlar, yakıt hücreli hibrit araçlarda kullanılır ve bu araçlar yedi farklı topolojiye ayrılır: tam yakıt hücreli araçlar; yakıt hücresi ve batarya ile güçlendirilmiş hibrit elektrikli araçlar; yakıt hücresi ve süperkapasitörler ile donatılmış hibrit elektrikli araçlar; yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörleri birleştiren hibrit elektrikli araçlar; yakıt hücresi, batarya ve fotovoltaik panelleri içeren hibrit elektrikli araçlar; yakıt hücresi ve volanlı hibrit elektrikli araçlar ve son olarak yakıt hücresi ile süperiletken manyetik enerji depolama sistemlerini entegre eden hibrit elektrikli araçlar. Bu çeşitlilik, araçların enerji ihtiyaçlarını karşılayarak performanslarını artırmak için tasarlanmıştır. Tam yakıt hücreli araçlar, yalnızca yakıt hücrelerinden güç alırken, diğer hibrit modeller enerji geri kazanımı ve yüksek güç taleplerini desteklemek için ek sistemler kullanır. Süperkapasitörler, özellikle enerjiyi hızlı bir şekilde depolayıp serbest bırakma yetenekleri sayesinde, bataryaların ve yakıt hücrelerinin ömrünü uzatma konusunda önemli bir role sahiptir. Volanlar ise, enerjiyi açısall momentum olarak depolayarak, hızlı tepki sürelerinde araca ek güç sağlar (Pramuanjaroenkij ve Kakaç, 2022).

### 2.4.1. Tip I: Tam Yakıt Hücreli Araç

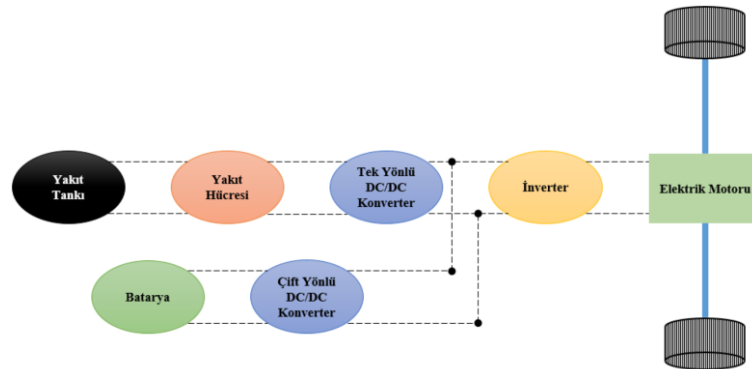
Tam bir yakıt hücresi elektrikli araç, enerji üretimi için yalnızca bir yakıt hücresi yığını kullanır. Şekil 2.10, bu tip bir elektrikli aracın bir taslağını sergiler. Bu tür araçların tasarımı, sadece bir yakıt hücresi yığını, bir DC-DC dönüştürücü, bir yakıt deposu, bir elektrik motoru ve bir inverter içermesiyle oldukça basittir. Bu minimalist yapı, mekanik parçaların azlığı sayesinde sessiz çalışma, uzun sürüş mesafesi, azaltılmış emisyonlar ve kesintisiz enerji sağlama gibi çeşitli avantajlar sunar. Bu özellikler, özellikle forklift, otobüs, tramvay gibi geniş uygulama alanları olan endüstriyel ve şehir içi ulaşım araçlarında bu araçları son derece çekici kılar. Bu tip yakıt hücresi elektrikli araçlar, sıfır emisyonlu çalışma özellikleriyle çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir katkı sağlar. Yakıt hücresi teknolojisi, elektrikli araçların şarj edilebilmesi zorunluluğu olmadan uzun süreli kullanımını destekler, bu da işletme ve bakım maliyetlerini düşürür. Ayrıca, bu teknolojinin gelişimiyle birlikte yakıt hücresi elektrikli araçların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.



Şekil 2.10. Tip I topolojisinin blok diyagramı

### 2.4.2. Tip II: Yakıt Hücresi ve Batarya Hibridizasyonu

Şekil 2.11’de verilen yakıt hücresi ve batarya kombinasyonu, yakıt hücreli hibrit elektrikli araç sistemlerinde sıkça rastlanan bir yapıdır. Bu yapıda araç, yakıt hücresi ve batarya tarafından eş zamanlı olarak enerji sağlanarak çalıştırılır. Sistemde, iki ana dönüştürücü tipi bulunur: birincisi yakıt hücresine bağlı olan ve sadece tek yönlü enerji akışına izin veren dönüştürücü, diğeri ise bataryaya bağlı ve enerjiyi her iki yönde de aktarabilen çift yönlü dönüştürücüdür. Araç ilk çalıştırıldığında, yakıt hücresi henüz aktif duruma geçmeden önce, batarya başlangıç enerjisi sağlayarak aracı harekete geçirir. Yakıt hücresi faaliyete geçtikten sonra ise, batarya üzerinden gelen enerji akışı kesilir ve güç tamamen yakıt hücresinden temin edilir.

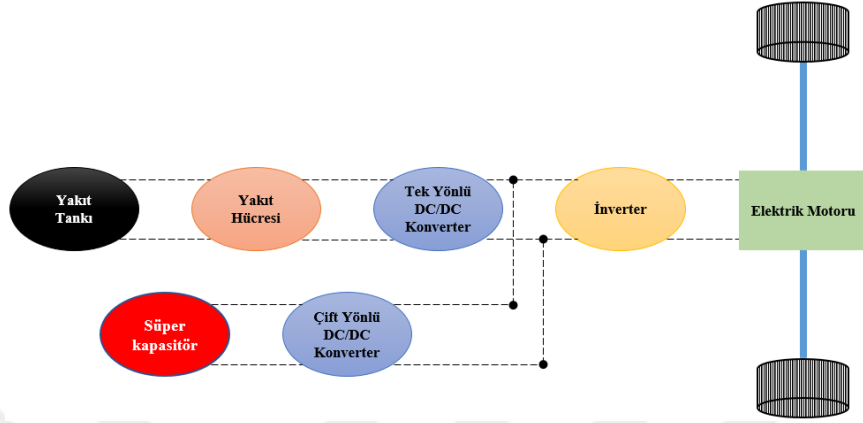


Şekil 2.11. Tip II topolojisinin blok diyagramı

### 2.4.3. Tip III: Yakıt Hücresi ve Süperkapasitör Hibridizasyonu

Tip III hibrit topolojide, Şekil 2.12’de belirtildiği üzere, araçtaki batarya, bir süperkapasitör ile yer değiştirmiştir. Süperkapasitör, ani güç ihtiyaçlarını karşılamak üzere çift yönlü bir dönüştürücüye bağlanmıştır. Bu yapıda, süperkapasitör, yakıt hücresi

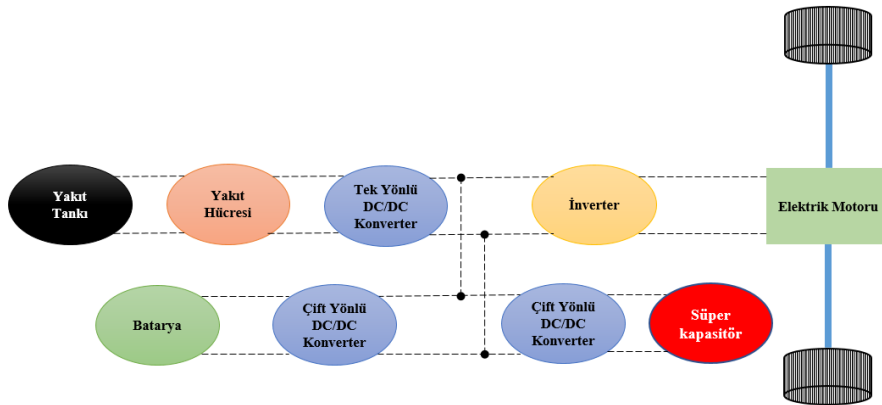
tarafından karşılanamayan anlık güç taleplerini geçici olarak destekler. Süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu düşük olduğundan, sürekli bir enerji kaynağı olarak değil, sadece kısa süreli güç ihtiyaçları için idealdir (Mitra ve diğ., 2022).



Şekil 2.12. Tip III topolojisinin blok diyagramı

#### 2.4.4. Tip IV: Yakıt Hücresi, Batarya ve Süperkapasitör Hibridizasyonu

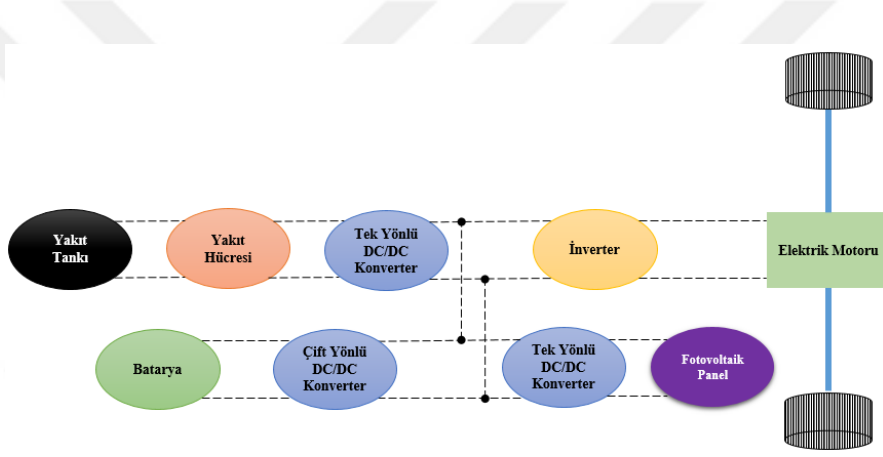
Şekil 2.13'te tanımlanan hibrit sistem, yakıt hücreleri ile birlikte hem batarya hem de süperkapasitörden oluşmaktadır. Bu sistemde, yakıt hücresi ana enerji kaynağı olarak işlev görürken, süperkapasitör ve batarya ek destek sağlayarak enerji akışını optimize eder. Yakıt hücresi, DC bara ile tek yönlü bir dönüştürücü aracılığıyla bağlanırken, batarya ve süperkapasitör çift yönlü dönüştürücüler kullanılarak ayrı ayrı DC bara ile bağlantı kurar. Bu hibrit topoloji, yakıt hücresi ve süperkapasitör kombinasyonunun yanı sıra yakıt hücresi ve batarya birleşiminin sağladığı avantajları bir araya getirir, böylece enerji sağlamada süreklilik sunar ve ani yük değişimlerinde yakıt hücresinin tepki verme kabiliyetini artırır.



Şekil 2.13. Tip IV topolojisinin blok diyagramı

#### 2.4.5. Tip V: Yakıt Hücresi, Batarya ve Fotovoltaik Panel Hibridizasyonu

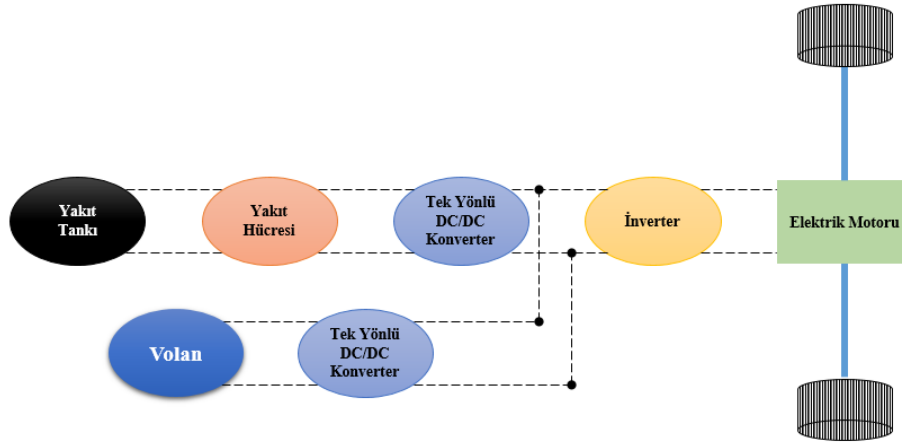
Topoloji V, fotovoltaik panelleri, yakıt hücreli elektrikli araçlarla bütünleşik bir hibrit yapıda sunar. Bu paneller, DC gerilim üretir ve çift yönlü bir dönüştürücü kullanılarak, Şekil 2.14'te gösterildiği üzere, bir batarya ve yakıt hücresi ile DC baraya entegre edilir. Batarya bu sistemde enerji depolama birimi olarak görev alır. Sistemdeki asıl enerji kaynağı yakıt hücreleriyken, fotovoltaik paneller ek bir enerji üretim mekanizması olarak ön plana çıkar. Fotovoltaik panellerden elde edilen güç, sıcaklıkla birlikte güneş ışığının şiddeti ve yönüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Fotovoltaik paneller tarafından üretilen güç, hem elektrik motorunu doğrudan çalıştırmak için kullanılır hem de bataryanın şarj edilmesini sağlar (Mitra ve diğ., 2022).



Şekil 2.14. Tip V topolojisinin blok diyagramı

#### 2.4.6. Tip VI: Yakıt Hücresi ve Volan Hibridizasyonu

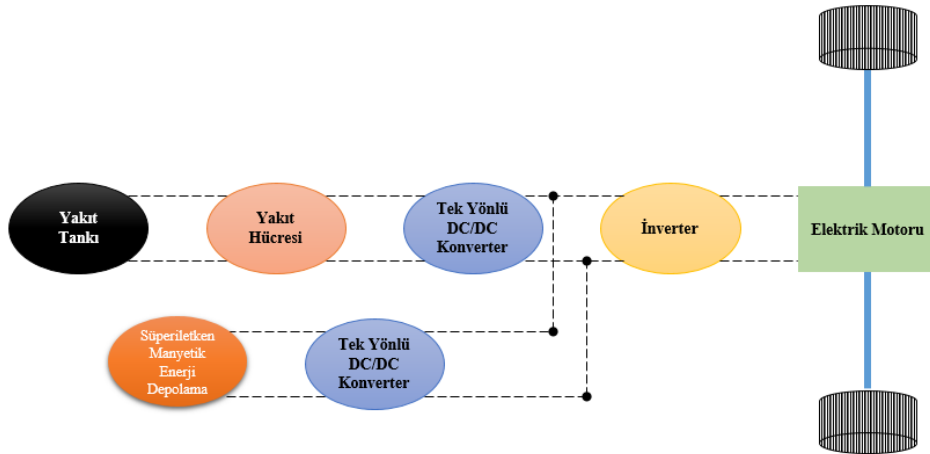
Tip-VI topolojisi, Şekil 2.15'ta gösterildiği üzere, yakıt hücresi ile volanın hibridleştirilmesini içeren bir yapıyı tanımlar. Bu sistemde, ana enerji kaynağı olarak yakıt hücresi görev alırken, enerji depolama amacıyla volan kullanılır. Mekanik enerji volan tarafından depolanır ve gerektiğinde bu mekanik enerji, bir jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilir. Elektrik motorunun yoğun enerjiye ihtiyaç duyduğu anlarda, volan önemli bir destek sağlar. Volanın öne çıkan özellikleri arasında yüksek güç yoğunluğu, verimlilik, enerji depolama kapasitesi, geniş işletme sıcaklık aralığı, uzun servis ömrü, hızlı şarj edilebilirlik ve çevreci bir yapı bulunmaktadır (Mitra ve diğ., 2022). Bu teknoloji, özellikle taşımacılık ve endüstriyel uygulamalar gibi dinamik enerji gereksinimlerine sahip alanlarda önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 2.15. Tip VI topolojisinin blok diyagramı

#### 2.4.7. Tip VII: Yakıt Hücresi ve Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Hibridizasyonu

Tip VII topolojisi, Şekil 2.16'da betimlenen, Yakıt Hücresi ve SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) sistemlerinin kombinasyonundan oluşur. Bu kombinasyon, yakıt hücreli elektrikli araçlar bağlamında şimdiye kadar tam olarak incelenmemiştir ancak gelecek yıllarda potansiyel bir kullanım alanı bulması beklenmektedir. Doğru akım, bir süperiletken bobin üzerinden geçirildiğinde bir manyetik alan oluşturur ve bu özellik, SMES sisteminin enerji depolamasında kullanılır. SMES sistemleri, diğer enerji depolama yöntemlerine kıyasla, hem şarj hem de deşarj süreçlerinde daha kısa süre gerektirmesi ve %95 gibi yüksek bir güç dönüşüm oranına sahip olması gibi belirgin avantajlara sahiptir. Ancak, yakıt hücreli hibrit araçlarda SMES teknolojisinin kullanımını engelleyen en büyük faktör, yüksek maliyetleridir.



Şekil 2.16. Tip VII topolojisinin blok diyagramı

### **3. YAKIT HÜCRELİ HİBRİT ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA ÇEŞİTLERİ**

Üç ana batarya türü; Kurşun Asit, Lityum İyon ve Nikel Metal Hidrür, hibrit elektrikli araçlarda sıklıkla tercih edilir. Bu bataryaların avantajları ve dezavantajları ele alınacak, ancak kimyasal özellikleri bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılacaktır.

#### **3.1. Kurşun Asit Batarya**

Kurşun-asit batarya, yüz yılı aşkın bir süredir başarıyla ticarileşmiş bir üründür ve otomotiv sektörü başta olmak üzere çeşitli alanlarda elektrik enerjisi depolama amaçlı geniş çapta kullanılmaya devam edilmektedir (Ehsani ve diğ., 2021). Kurşun-asit bataryalar, düşük maliyetli olmaları, yüksek güç kapasitesine sahip olmaları ve gelişmiş teknolojileri sayesinde beklenmedik hatalara karşı daha dirençli oldukları için elektrikli araçlar için tercih edilirler. Ancak, bu bataryaların düşük enerji yoğunluğu ve soğuk hava koşullarında performans kaybı gibi olumsuz yönleri vardır. Özellikle, 10°C altındaki sıcaklıklarda özgül enerji ve güçlerinde büyük düşüşler yaşanır. Bu durum, daha ağır batarya paketlerine ihtiyaç duyulmasına ve düşük sıcaklıklarda verimliliğin azalmasına sebep olur, bu da elektrikli araç kullanımında zorluklara yol açabilir (Arıkan, 2019). Her bir hücre, seyreltilmiş sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) çözeltisi içerisine yerleştirilmiştir. Her hücre içinde, pozitif ve negatif elektrotlar olarak kurşun dioksit ( $PbO_2$ ) ve sünger kurşun (Pb) materyallerden oluşan iki elektrot mevcuttur. Bu bataryaların özgül enerji değeri 35-40 Wh/kg, güç yoğunluğu ise 250 W/kg civarındadır ve döngü ömrü yaklaşık olarak 1500 ile 5000 döngü arasında değişmektedir (Verma ve diğ., 2021).

#### **3.2. Nikel Metal Hidrür Batarya**

Nikel metal hidrür bataryalar, yüksek deşarj oranları ve üstün güvenlik özellikleri sayesinde hibrit otomobiller arasında daha çok tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir. Bu bataryaların en büyük problemi, sığ şarj döngüleriyle zamanla performans kaybı yaşamasıdır. Nikel-metal hidrür bataryalarında, alkali elektrolit olarak %30 oranında potasyum hidroksit (KOH) sulu çözeltisi kullanılır. Bu bataryaların pozitif elektrotu  $Ni(OH)_2/NiOOH$ 'den, negatif elektrotu ise nikel, vanadyum ve titanyum gibi metal hidritlerden oluşmaktadır (Verma ve diğ., 2021). NiMH batarya teknolojisi, günümüzde

65 Wh/kg'a varan özgül enerji ve 200 W/kg özgül güç değerlerine erişebilmektedir. Bu bataryalar çevre dostudur (kadmiyum içermezler), düzgün deşarj profiline sahiptir (düşük gerilim düşüşü ile) ve hızlı şarj edilebilirler. Ancak, NiMH bataryaların yüksek ilk yatırım maliyetleri bulunmaktadır. Şarj sürecinde yaşanan hafıza etkisi ve ekzotermik reaksiyonlar da bu bataryaların dezavantajları arasında yer alır (Ehsani ve diğ., 2021).

### 3.3. Lityum-İyon Batarya

Lityum-iyon batarya, diğer tüm batarya türleri arasında en yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olup, uzun ömür, düşük kendi kendine deşarj hızı ve yüksek güvenlik standartları sunar. Li-Ion batarya beş ana katmandan meydana gelir: pozitif akım toplayıcı, katot olarak bilinen pozitif elektrot, ayırıcı, negatif akım toplayıcı ve anot olarak bilinen negatif elektrot. Katotlar sıklıkla  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  gibi metal oksitlerden oluşan katmanlı yapıdadır; anotlar ise grafit veya metal oksitten yapılmaktadır (Verma ve diğ., 2021). Yüksek enerji ve güç yoğunluğu, düşük kendi kendine deşarj oranı ve hafıza etkisi olmaması Li-Ion bataryaların temel avantajlarıdır. Ancak, bu bataryaların yeniden şarj edilirken aşırı ısınma, yüksek iç direnç ve sıcaklık artışıyla kapasitenin düşmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Li-Ion bataryalar tipik olarak 1000 ile 10000 arasında şarj-deşarj döngüsüne sahiptir ve %90 üzerinde bir verimlilikle, en yüksek maksimum verimliliğe ulaşan batarya türüdür. Bu özellikleriyle Li-Ion bataryalar, elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan batarya türü olmaya devam etmektedir (Arıkan, 2019).

Tablo 3.1'de hibrit elektrikli araçlarda yaygın kullanılan batarya türleri ve çalışma özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 3.1. Hibrit elektrikli araçlarda yaygın kullanılan batarya türleri ve özellikleri

	<b>Spesifik Güç (W/kg)</b>	<b>Spesifik Enerji (Wh/kg)</b>	<b>Enerji Yoğunluğu (Wh/L)</b>	<b>Verimlilik (%)</b>	<b>Döngü</b>
<b>Pb-Asit</b>	180	35-40	80-90	>80	1500-500
<b>NiMH</b>	250-1000	60-120	140-400	70	<3000
<b>Li-Ion</b>	250-430	100-265	250-693	>90	2000

#### 4. ADVISOR PROGRAMI TANITIMI VE KABİLİYETLERİNİN AÇIKLANMASI

NREL'in Gelişmiş Araç Simülatörü, ADVISOR, ilk olarak Kasım 1994'te geliştirilmiştir. Bu program, ABD Enerji Bakanlığı'nın, Ford, GM (General Motors) ve Chrysler ile Hibrit Araç Tahrik Sistem sözleşmeleri aracılığıyla hibrit elektrikli araçların geliştirilmesine ve anlaşılmasına yardımcı olmak için bir analiz aracı olarak tasarlanmıştır (Wipke ve diğ., 1999).

ADVISOR, bir dizi kullanıcı dostu grafik kullanıcı ara yüzü ekranı aracılığıyla farklı araç parametrelerini ve sürüş çevrimi ihtiyaçlarını tanımlayarak aracın performansını, yakıt verimliliğini ve emisyon değerlerini gözlemlemek için etkileşimde bulunur. Bu ekranlar, kullanıcının aracın çeşitli özelliklerini girmesine ve sonuç olarak aracın performansına, yakıt tüketimine ve emisyon seviyelerine olan etkilerini değerlendirmesine olanak tanır. Bir sürüş senaryosu, mesela Federal Şehir İçi Sürüş Çevrimi kullanıldığında, temel sonuçları arasında yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları yer alır. Aynı zamanda, aracın en yüksek güçle ivmelenmesini senaryo etmek amacıyla da kullanılabilir; bu durumda sonuçlar 0'dan 100 km/saate hızlanma zamanı şeklinde olabilir, ya da aracın sabit bir devamlı hızda çıkabileceği en yüksek yol eğimini hesaplamak için kullanılabilir.

ADVISOR, MATLAB/Simulink üzerinde çeşitli kapsamlı analiz işlevlerine kolay erişim sunar. Bu araç, kullanıcıların çeşitli taşıt modelleri ve simülasyon senaryoları üzerinde çalışmasına olanak tanıyan kapsamlı bir platform sağlar. Araç konfigürasyonundan simülasyon gerçekleştirmeye ve sonuçların değerlendirilmesine kadar geniş bir özellik setini kapsayan üç temel GUI (Graphical User Interface) sayfası şöyle tanımlanabilir:

- Araç Giriş Sayfası: Bu sayfa, aracın yapılandırılmasına olanak tanır, kullanıcılara farklı araç bileşenlerini seçme ve ayarlama imkânı sunar. Kullanıcılar, taşıt tipi, motor, batarya, şanzıman ve diğer bileşenlerin seçim ve ayarlarını bu arayüz üzerinden yapabilirler.
- Simülasyon Kurulum Sayfası: Simülasyonun başlatıldığı ve yürütüldüğü sayfadır, kullanıcılara çeşitli senaryolar altında araç performansını test etme olanağı verir.
- Sonuçlar Sayfası: Bu sayfa, simülasyon sonuçlarının incelendiği ve analiz edildiği yerdir, kullanıcılara detaylı performans metrikleri ve grafikler sunar.

## 4.1. Araç Giriş Sayfası

ADVISOR programının Şekil 4.1’de gösterilen araç giriş ekranında, kullanıcı bir dizi açılır menü aracılığıyla çeşitli seçeneklerden istediği aracı tasarlar. Her menü, araç için önceden belirlenmiş parçalar sunar. Kullanıcı, bu parçaların özelliklerini değiştirerek özelleştirilmiş bileşenler oluşturabilir. Bu yetenek, yenilikçi araç tasarımlarının oluşturulması ve simülasyonu için ADVISOR’ı değerli bir araç yapar.

Ekranın sol tarafı, seçilen araç konfigürasyonunun grafiksel bir temsilini içerir. Örneğin, geleneksel, seri, paralel, yakıt hücresel veya elektrikli araç gibi farklı konfigürasyonlar sol üst köşede görsel olarak gösterilir. Sol alt bölümde, kullanıcı seçtiği bileşenlerin performans bilgilerini, motor ve elektrik motoru için verimlilik konturları, emisyon konturları ve bataryalar için performans grafikleri gibi, kullanıcı tarafından seçilebilen grafikler aracılığıyla anında görüntülenebilir.



Şekil 4.1. ADVISOR Araç Giriş Ekranı

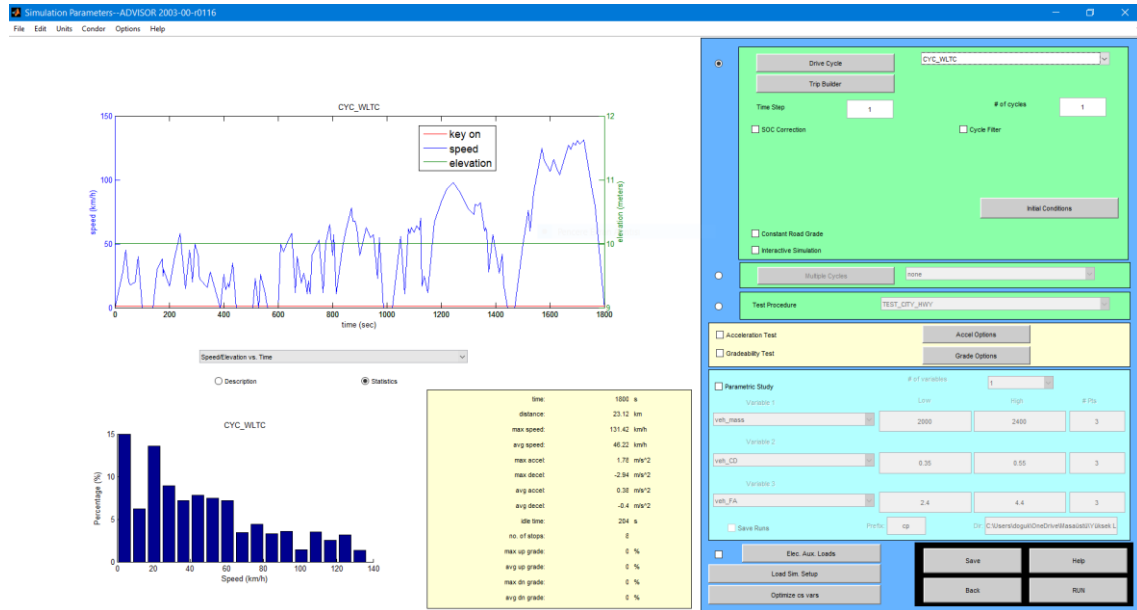
Araç giriş ekranının sağ tarafında, kullanıcı, simüle edilecek araç tipini ve tahrik sisteminin bileşenlerini yönetir. Her bir bileşen için, ADVISOR’ın kütüphanesinden seçim yapmayı mümkün kılan açılır menüler bulunur. Maksimum güç ve maksimum verimlilik gibi başlıkların bulunduğu sütunlar, ilk etapta bu değerleri veri dosyalarından alır, fakat yeni bir değer girilirse, GUI, haritanın asıl formunu muhafaza ederek, o verimlilik oranına göre haritayı lineer bir şekilde yeniden boyutlandırır. Mesela, motorun

maksimum verimliliği için 0,75 olan varsayılan yerine 0,78 değeri girildiğinde, bu kullanıcının %75 yerine %78 maksimum verimliliğe sahip teorik bir motorun performansını değerlendirmesine imkân tanır.

Son olarak kullanıcı, MATLAB çalışma ortamında ADVISOR tarafından tanımlanmış olan skaler parametreleri değişken listesi üzerinden güncelleyebilir. Özellikle, total araç test ağırlığı gibi sıkça değiştirilmesi gereken parametreler, kolay erişim için optimize edilmiş olup, yeni ağırlık değerinin girilmesi ile değiştirilebilir. Ayrıca, araç giriş dosyaları kaydedilebilir ve ihtiyaç halinde tekrar geri getirilebilir.

## 4.2. Simülasyon Kurulum Sayfası

ADVISOR 2.0'un simülasyon kurulum ekranı, programın üç GUI ekranından ikincisidir ve Şekil 4.2'de verilen bu ekranda, kullanıcı, tek bir sürüş çevrimi mi yoksa daha kapsamlı bir test prosedürü mü çalıştıracaklarını seçer. Bu test prosedürü, özel başlangıç koşulları, çoklu döngüler ve son işlemleri içerebilir, örneğin birleşik şehir/karayolu yakıt ekonomisinin hesaplanması gibi. Tek bir döngü seçildiğinde, kullanıcı başlangıç koşullarını belirleyebilir ve hibrit araçlar için bataryanın şarj durumunu, düzeltme rutinini seçebilir. ADVISOR 2.0'un simülasyon kurulum ekranı, kullanıcılara esneklik ve detaylı kontrol sağlayarak, çeşitli simülasyon senaryolarının etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.



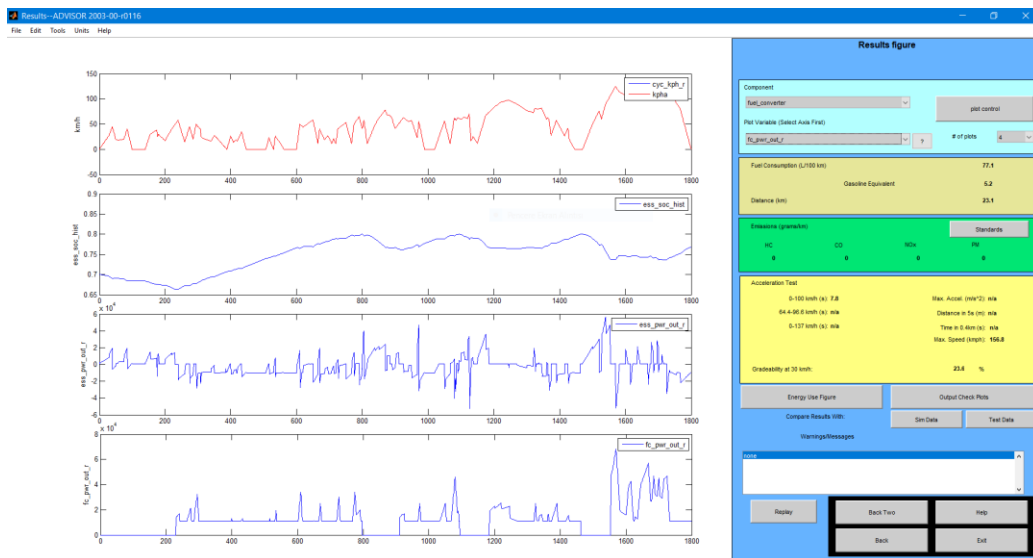
Şekil 4.2. Simülasyon kurulum ekranı

Ek olarak, bu sayfada kullanıcı eğitim kabiliyeti ve hızlanma testleri gibi simülasyon seçeneklerini de belirleyebilir. Simülasyon kurulum penceresinde, kullanıcı sol taraftaki bilgilerle seçimlerini gözden geçirirken, sağ tarafta sürüş döngülerini seçer ve simülasyon parametrelerini tanımlar. Tek bir sürüş çevrimi seçimi yapıldığında, sol üstte hız izi ve sol altta döngünün istatistiksel analizi gösterilir. Simülasyon parametreleri belirlendiğinde, “run” butonuna tıklayarak simülasyon başlatılır ve tamamlandığında sonuçlar ekranı sağlanır.

Ayrıca, kullanıcı yeni bir sürüş çevrimi tanımlamak istediğinde, “CYC\_SKELETON” dosyası içinde yer alan MATLAB kodlarını kullanabilir. Bu süreçte, kullanıcı, oluşturulacak çevrime özgü hız-zaman ve eğim verilerini koda işleyerek yeni bir sürüş çevrimi oluşturabilir. Sonrasında, bu tanımlanan çevrim üzerinde simülasyon çalışmaları yürütülebilir. Bu özellik, kullanıcılara esneklik sağlayarak, özelleştirilmiş sürüş profilleri üzerinden detaylı analiz ve simülasyon imkanı sunar.

### 4.3. Sonuçlar Sayfası

ADVISOR 2.0 programının sonuçlar ekranı, üç ana GUI ekranının en sonuncusudur ve kullanıcıya simülasyon sonuçlarını geniş bir yelpazede analiz etme olanağı sunar. Şekil 4.3’te sağ tarafta, kullanıcı yakıt ekonomisi, emisyonlar, hızlanma ve eğim kabiliyeti gibi özet sonuçları görebilir, sol tarafta ise simülasyon sürecinde oluşturulan zamana bağımlı değişkenlerin grafiklerine erişebilir.



Şekil 4.3. Simülasyon sonuç sayfası

Detaylı analiz için, MATLAB'in yerleşik çizim özelliklerinden faydalanarak, kullanıcı grafikler üzerinde yakınlaştırma yapabilir, çoklu eğrileri üst üste koyabilir ve ızgara çizgileri ekleyebilir. ADVISOR, enerji kullanımını ve sistemin diğer kritik bileşenlerini izlemek için enerji dengesi grafikleri ve tanısal grafikler sunar, bu da sistemin enerji akışını ve verimliliğini detaylı bir şekilde gözlemleme imkânı verir. Sonuçlar sayfası, araç performansının bütünleştirilmiş ve anlık değerlendirmelerini içerir, bu da kullanıcıya dinamik bir analiz ortamı sağlar. Her bir sonucun dinamik olarak değiştirilebilir özellikleri sayesinde, kullanıcı spesifik bileşen verileri (motor hızı, tork, batarya gerilimi gibi) üzerinde detaylı incelemeler yapabilir. Ayrıca, ADVISOR'ın kullanıcı dostu ara yüzü, dokümantasyona kolay erişim için yardım butonu gibi özelliklerle desteklenir, böylece kullanıcılar ihtiyaç duyduklarında ek bilgilere hızlıca ulaşabilirler.

Ek olarak kullanıcı, “sim data” butonundan yaptığı simülasyon sonuçlarını kaydedebilir ve bunları diğer sonuçlarla karşılaştırabilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus; kullanıcı tarafından 2014a ve öncesi sürüme sahip MATLAB programı kullanılması gerekmektedir.

## 5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

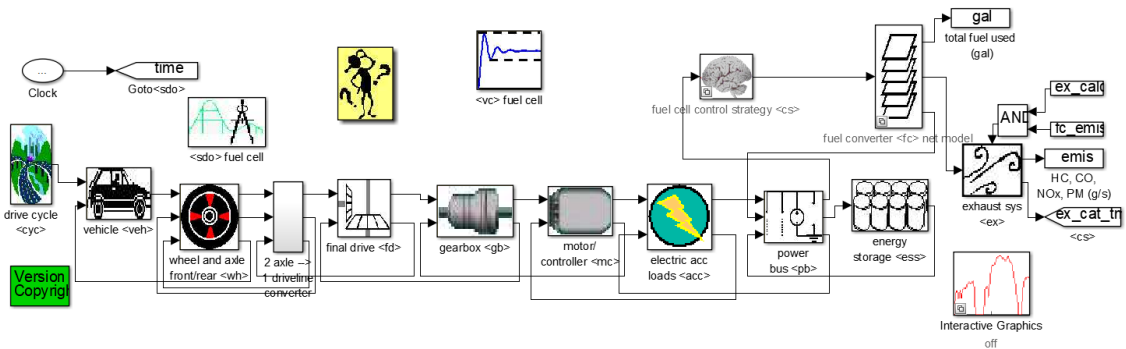
Bu bölüm, elektrikli taşıtlarda yakıt hücresi ve batarya hibrit sistemlerinin performansını değerlendirmek üzere kapsamlı simülasyon çalışmalarını detaylandırır. Araştırmanın bu kısmı, bu sistemlerin gerçek dünya koşullarında nasıl işlediğini anlamak için kritik öneme sahiptir. ADVISOR programı, bu çalışmanın temel taşıdır ve simülasyon sürecinin her aşamasında kullanılan ana araçtır.

Simülasyon çalışmalarının temel amacı, farklı yakıt hücresi ve batarya hibrit sistem konfigürasyonlarının farklı sürüş çevrimlerindeki performanslarını karşılaştırmaktır. Bu kapsamda, üç farklı batarya çeşidi kullanılarak hazırlanan yakıt hücreli araç modelleri, WLTC, HWFET ve İstanbul sürüş çevrimleri altında test edilir. Bu testler, araçların enerji tüketimi, güç çıkışı, verimlilik ve çevresel etkileri gibi kritik parametreler üzerinde yoğunlaşır. Simülasyon sonuçları, bu sistemlerin pratikte nasıl performans gösterdiğini anlamak için analiz edilir ve karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılır.

### 5.1. Araç Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölüm, seçilen yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli aracın özelliklerinin ayrıntılı bir incelemesini sunmaktadır. İncelenen araç, enerji verimliliği, performans ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilerek, hibrit enerji sistemlerinin elektrikli taşıtlar üzerindeki etkisinin kapsamlı bir analizini sağlar. Bu bölüm, aracın teknik parametreleri, enerji yönetim sistemi ve güç aktarım mekanizması ile ilgili bilgiler içerecektir.

Seçilen yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli araca ait blok diyagramı Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli araca ait blok diyagramı

Blok diyagramı, enerji dönüşüm süreçlerinin ve araç dinamiklerinin modellenmesine odaklanmaktadır. Sürüş çevrimi (<cyc>), aracın tipik bir kullanım senaryosu altında maruz kaldığı çeşitli hız ve ivme profillerini temsil eder. Bu, şehir içi düşük hızlı trafikten otoyol hızlarına kadar değişebilen senaryoları kapsar. Blok diyagramı, yakıt hücreli araç (<veh>) ile başlar ve aracın tekerlek ve aks sistemine (<wh>) enerji aktarımını gösterir. Bu, araçtaki kinetik enerjinin ilk kaynağı olarak görülür. Yakıt hücreleri (<fc>), aracın ana güç üniteleridir ve elektrik enerjisi üretirler. Yakıt hücresinden gelen güç, dişli kutusu (<gb>) ve motor/kontrol ünitesi (<mc>) aracılığıyla tekerleklere iletilir. Yakıt hücresi kontrol stratejisi (<cs>), sistemin verimliliğini ve yanıtını optimize ederken enerji akışını düzenler. Elektrik yükleri (<acc>), araç içindeki elektrikle çalışan diğer sistemlerin enerji tüketimidir. Güç barası (<pb>), elektrik enerjisini araçtaki tüm elektrikli bileşenlere dağıtan bir sistemdir. Enerji depolama birimi (<ess>), enerjiyi depolayarak gerektiğinde kullanıma sunar. Yakıt dönüştürücü (<fc>), yakıt hücresinden gelen enerjiyi kullanılabilir biçime dönüştürürken, emisyon modülü (<emis>), aracın çevresel etkisini değerlendirmek için zararlı gaz emisyonlarını izler. Sistemin interaktif grafikleri (off), kullanıcının aracın performansını ve çevresel etkilerini gerçek zamanlı olarak görselleştirmesine olanak tanır. Bu, yakıt tüketimi ve emisyon verilerini içerir.

Blok diyagramı, yakıt hücreli araçların sistem entegrasyonu ve performans değerlendirme süreçlerinde önemli bir araçtır ve bu teknolojinin etkin bir şekilde geliştirilmesinde ve optimize edilmesinde kullanılır.

Çalışmada ele alınan araç, günümüzde yaygın olarak kullanılan ve gerçek hayatta B sınıfı SUV (Sport Utility Vehicle) olarak tanımlanan, ADVISOR programında “VEH\_smallSUV” olarak adlandırılan, dört kapılı, beş yolcu kapasiteli ve önden çekiş özelliğine sahip bir modeldir. Araca ait teknik parametreler Tablo 5.1.’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Araç parametreleri

	<b>Parametre</b>	<b>Birim</b>	<b>Değer</b>
<b>Taşıt Değerleri</b>	Tam Kütle (m)	kg	2000
	Ön Yüzey Alanı ( $A$ )	$m^2$	2,4
	Aerodinamik Katsayısı ( $C_d$ )	-	0,35
	Şanzıman Verimliliği ( $\eta_T$ )	-	0,95
	Yuvarlanma Direnci Katsayısı ( $f_r$ )	-	0,01
	Dönen Kütle Düzeltme Katsayısı ( $\delta$ )	-	1,02

Yakıt hücresi ve batarya teknolojisiyle donatılmış tasarım otomobil, esas olarak düz şehir içi yollarında günlük ulaşım amaçları için tercih edilmektedir. Bu kullanım senaryosuna uygun olarak, aracın ana performans göstergeleri Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Performans indikatörleri

Performans İndikatörleri	Dizayn Değerleri (Tam Yük)
Maksimum Hız ( $V_m$ )	>130 km/sa
Hızlanma Süresi (0-100 km/sa) ( $t$ )	<15 sn
Maksimum Tırmanma Kabiliyeti ( $i$ )	>%20 (Tam Yük $v = 30 \text{ km/s}$ sabit)

Maksimum hız performans kriterlerinin belirlenmesinde, Türkiye otoyollarında uygulanan maksimum hız sınırı olan 130 km/sa temel alınmıştır. Ayrıca, belirlenen araç eğim değeri, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye'deki köy yolları için belirlenen maksimum boyuna eğim oranı olan %15'in üzerinde olmalıdır. Bu kapsamda, öngörülen diğer yollar için daha yüksek eğim değerlerine ulaşılabilir olması gerekmektedir. Bu veriler doğrultusunda, tasarlanacak aracın yokuş kabiliyetinin %20 eğimden daha az olmaması öngörülmektedir (Karaoğlan ve diğ., 2014).

### 5.1.1. Elektrik Motoru Gücünün Belirlenmesi

Elektrik motoru, aracın dinamik yükünü etkin bir şekilde yönetmek amacıyla kullanılmaktadır. Motorun sağladığı güç, aracın hedeflenen hızlanma performansına erişebilmesi için zorunludur. Pratikte, hızlanma, yolcu taşıtı tasarımında öncelikli olarak ele alınan bir faktördür. Zhou ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada motorun tepe gücü, genellikle elektrikli aracın maksimum hızını, karşılaşılabileceği en yüksek eğimi ve hızlanma süresini destekleyecek şekilde belirlenmiştir.

İlk olarak, maksimum hız kriterine göre güç hesabı için Denklem (5.1) kullanılmalıdır.

$$P_{max1} = \frac{V_m}{3600 \cdot \eta_T} \times \left( m \cdot g \cdot f_r + \frac{C_d \cdot A \cdot V_m^2}{21,15} \right) \quad (5.1)$$

burada,  $V_m$  m/sn cinsinden aracın maksimum hızı,  $\eta_T$  şanzıman verimliliği,  $m$  kg cinsinden aracın kütlesi,  $g$  yerçekim kuvveti ve değeri 9,81 m/s<sup>2</sup>,  $f_r$  yuvarlanma direnci katsayısı,  $C_d$  aerodinamik katsayısı ve  $A$  m<sup>2</sup> cinsinden aracın ön yüzey alanıdır.

İlgili değerler Denklem (5.1)'de yerine konulduğunda  $P_{max1} = 32,97 \text{ kW}$  olarak hesaplanmıştır.

İkincil olarak, maksimum eğime göre güç hesabı için Denklem (5.2) kullanılmalıdır.

$$P_{max2} = \frac{v}{3600 \cdot \eta_T} x (m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha_{max} + m \cdot g \cdot \sin \alpha_{max} + \frac{C_d \cdot A \cdot v^2}{21,15}) \quad (5.2)$$

burada,  $v$  maksimum eğimi çıkabilmesini istediğimiz hız olan 30 km/sa ve  $\alpha_{max}$  ise maksimum eğim açısıdır.

İlgili değerler Denklem (5.2)'de yerine konulduğunda  $P_{max2} = 34,84 \text{ kW}$  olarak hesaplanmıştır.

Üçüncü ve son olarak; hızlanma süresine göre güç hesabı için Denklem (5.3) kullanılmalıdır.

$$P_{max3} = \frac{1}{3600 \cdot t \cdot \eta_T} x \left( \delta \cdot m \cdot \frac{V_m^2}{2\sqrt{t}} + m \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{V_m}{1,5} + \frac{C_d \cdot A \cdot V_m^3 \cdot t}{21,15 \times 2,5} \right) \quad (5.3)$$

burada,  $t$  sn cinsinden aracın 0-100 km/sa hızlanması için gereken süre ve  $\delta$  ise dönen kütle düzeltme katsayısıdır.

İlgili değerler Denklem (5.3)'te yerine konulduğunda  $P_{max3} = 97,29 \text{ kW}$  olarak hesaplanmıştır.

Özetlemek gerekirse, elektrik motorunun tepe gücü, maksimum hız, maksimum tırmanma kabiliyeti ve hızlanma süresi gibi gereksinimleri eş zamanlı olarak karşılayacak şekilde ayarlanmalıdır ( $P_{max} \geq \{P_{max1}, P_{max2}, P_{max3}\}$ ). Bu parametreler doğrultusunda, elektrik motorunun tepe gücü 97,29 kW olarak hesaplanmış ve pratik uygulamaları kolaylaştırmak adına 100 kW'a yuvarlanmıştır.

Motor nominal gücünün hesaplanması;

$$A = \frac{P_{max}}{P_n} \quad (5.4)$$

burada,  $A$  aşırı yük katsayısı, Tong ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada genellikle 2~4 olarak alındığı belirtilmiştir.  $P_{max}$  tepe gücü,  $P_n$  nominal güçtür. Yapılan hesaplama göre ( $A = 2$  olarak alındığında), motor nominal gücü; 50 kW olarak bulunur.

Çalışmamızda elektrik motoru olarak kullanılacak olan “MC\_AC124\_EV1\_draft” motoru, ADVISOR simülasyon programında yer alan ve General Motors'un EV1 aracında kullanılan Westinghouse tarafından üretilen bir AC indüksiyon motorudur. Seçilen motor, 100 kW tepe gücünde olup, AC indüksiyon motor teknolojisini kullanarak yüksek verimlilik ve güvenilirlik sunar; ayrıca, düşük bakım gereksinimleri ve mükemmel kontrol yetenekleri ile bilinir.

Motorun indüksiyon (asenكرون) yapısı, elektrikli ve hibrit araçlar için idealdir çünkü asenkron motorlar, değişken yük ve hız koşullarına dayanıklılığı ve uzun ömürlü kullanımı destekleyen sağlam yapıları sayesinde yüksek güvenilirlik sunar.

### 5.1.2. Yakıt Hücresi Gücünün Belirlenmesi

Bu çalışmada yakıt hücresi olarak, ADVISOR programında bulunan; Argonne National Laboratory tarafından geliştirilmiş ve modelleme için kullanılan tipik bir PEM yakıt hücresi olan “ANL50” kullanılmıştır. ANL50 özellikle hafif ve orta sınıf araçlarda kullanım için tasarlanmıştır. Kullanılan yakıt hücrelerinin yakıtı, ya benzinden elde edilen hidrojenden ya da doğrudan hidrojen kullanmak üzere tasarlanmıştır.

Yakıt hücresi ile donatılmış hibrit bir sistemde, yakıt hücresinin, özellikle şehirlerarası otoyol sürüşlerinde uzun mesafe yolculuklar sırasında yüksek sabit hızlarda seyir için gerekli olan gücü sağlaması esastır. Ayrıca, belirli bir hızda hafif eğimlerin üstesinden gelebilmek için, ek güç kaynağı olmadan da aracı destekleyebilme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. (Ehsani ve diğ., 2021)

Yakıt hücresinin nominal gücü ile tahrik motorunun nominal gücü arasındaki ilişki Denklem (5.5)'te belirtilmiştir (Tong ve diğ., 2022):

$$P_{fc}\eta_{DC} = \frac{P_n}{\eta_T} + P_0 \quad (5.5)$$

Burada,  $P_{fc}$  yakıt hücresinin nominal gücü,  $\eta_{DC}$  DC/DC dönüştürücünün verimliliğidir ve 0,95'tir.  $P_n$  elektrik motorunun nominal gücüdür;  $\eta_T$  şanzıman verimliliğidir;  $P_0$  yakıt hücresi aksesuarlarının gücüdür ve bu tasarımda 700 W olarak alınmıştır.

Yapılan hesaplama sonucu  $P_{fc} = 60$  kW hesaplanır ve yakıt hücresinin tepe gücü, nominal gücün %120'si olan 72 kW olarak ayarlanmıştır.

### 5.1.3. Yardımcı Batarya Gücünün Belirlenmesi

Yardımcı batarya sistemi, aracın soğuk başlatma ve yokuş tırmanma gibi anlık yüksek güç taleplerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Yakıt hücresi güç sistemi tek başına ana güç santrali olarak hizmet etmek için hızlı güç talebi değişiklikleriyle başa çıkacak kapasitede değildir (Zhou, 2007). Yakıt hücresi gücüne ilaveten, ani güç gereksinimlerine cevap vermek ve taşıtın frenleme enerjisini depo etmek amacıyla yakıt hücreli araçlarda batarya kullanılmaktadır. Hibrit elektrikli ve yakıt hücreli araçlarda bataryadan, motorun ihtiyaç duyması halinde anlık olarak yüksek güç vermesi beklenir (Karaoğlan ve diğ., 2014).

Seçilen batarya grubu, gerekli yol ve kullanım koşullarına göre elektrik motoru ve yakıt hücresi güç farkını (28 kW) 5-15 dakika boyunca sağlayabilmelidir. Bunun için batarya kapasitesinin 2-7 kWh olması beklenmektedir (Karaoğlan ve diğ., 2014).

Hibrit elektrikli araçlarda kullanılmak üzere Kurşun Asit, Lityum İyon ve Nikel Metal Hidrür gibi batarya çeşitlerinin tercih edilmesi, bu teknolojilerin sunduğu enerji yoğunluğu ve maliyet etkinlik avantajlarından kaynaklanmaktadır. Araç tasarımı sürecinde, bu bataryaların özelliklerine uygun modül sayısının belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla, ADVISOR yazılım platformu üzerinde, belirlenen güç ihtiyacına bağlı olarak her bir batarya türü için gerekli modül sayısının hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama, aracın performansını ve verimliliğini optimize etmek için hayati öneme sahiptir. Ayrıca, doğru batarya seçimi, aracın genel maliyetini ve çevresel etkisini de önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, tasarım sürecinde dikkatli bir analiz ve değerlendirme yapılması gerekmektedir.

Yardımcı batarya grubu olarak Tablo 5.3'te özellikleri verilen Lityum İyon batarya grubu tercih edilirse;

Tablo 5.3. ADVISOR programı üzerinde yer alan 1 modül Li-Ion batarya grubu özellikleri

Pil Sayısı	3
Kapasite	6 Ah
Min. Gerilim	6 V
Max. Gerilim	11,7 V
Nominal Gerilim	10,67 V
Ağırlık	1,13 Kg
Kapasite	64,8 Wh

Bu bilgiler eşliğinde analizi yapılacak taşıtın gerekli güç ihtiyacını sağlayabilmek amacıyla 110 adet Li-Ion modülün seri bağlanması öngörülmüştür. Batarya grubunun nominal gerilimi 1174 V olarak elde edilmiştir.

Yardımcı batarya grubu olarak Tablo 5.4'te özellikleri verilen Kurşun Asit batarya grubu tercih edilirse;

Tablo 5.4. ADVISOR programı üzerinde yer alan 1 modül Pb-Asit batarya grubu özellikleri

Pil Sayısı	1
Kapasite	12 Ah
Min. Gerilim	9,5 V
Max. Gerilim	16,5 V
Nominal Gerilim	12,3 V
Ağırlık	4,785 Kg
Kapasite	147,6 Wh

Bu bilgiler eşliğinde analizi yapılacak taşıtın gerekli güç ihtiyacını sağlayabilmek amacıyla 50 adet Pb-Asit modülün seri bağlanması öngörülmüştür. Elde edilen batarya grubunun nominal gerilimi 615 V'tur.

Yardımcı batarya grubu olarak Tablo 5.5'te özellikleri verilen Nikel-Metal Hidrür batarya grubu tercih edilirse;

Tablo 5.5. ADVISOR programı üzerinde yer alan 1 modül Ni-Mh batarya grubu özellikleri

Pil Sayısı	5
Kapasite	28 Ah
Min. Gerilim	4,5 V
Max. Gerilim	7,8 V
Nominal Gerilim	6,7 V
Ağırlık	6,3 Kg
Kapasite	187,6 Wh

Bu bilgiler eşliğinde analizi yapılacak taşıtın gerekli güç ihtiyacını sağlayabilmek maksadıyla 40 adet Nikel-Metal Hidrür modülün seri bağlanması öngörülmüştür. Elde edilen batarya grubunun nominal gerilimi 268 V'tur.

## 5.2. Sürüş Çevrimlerinin Belirlenmesi ve Oluşturulması

Seyir rotalarının çeşitliliği ve bu rotalar üzerindeki seyir şartlarının dinamikliği dikkate alındığında araçların seyir parametrelerinin (güç ihtiyacı, yakıt tüketimi, emisyonlar vb.) analizi için sürüş çevrimleri kullanılır. Üretilen araçlara tip onayı alınabilmesi için bu parametrelerin standart ve dolayısıyla karşılaştırılabilir ölçütlerle belirlenmesi amacıyla kullanılan standart (yasal) çevrimlere örnek olarak WLTC ve HWFET sürüş çevrimleri verilebilir (Karaoğlan ve diğ., 2014).

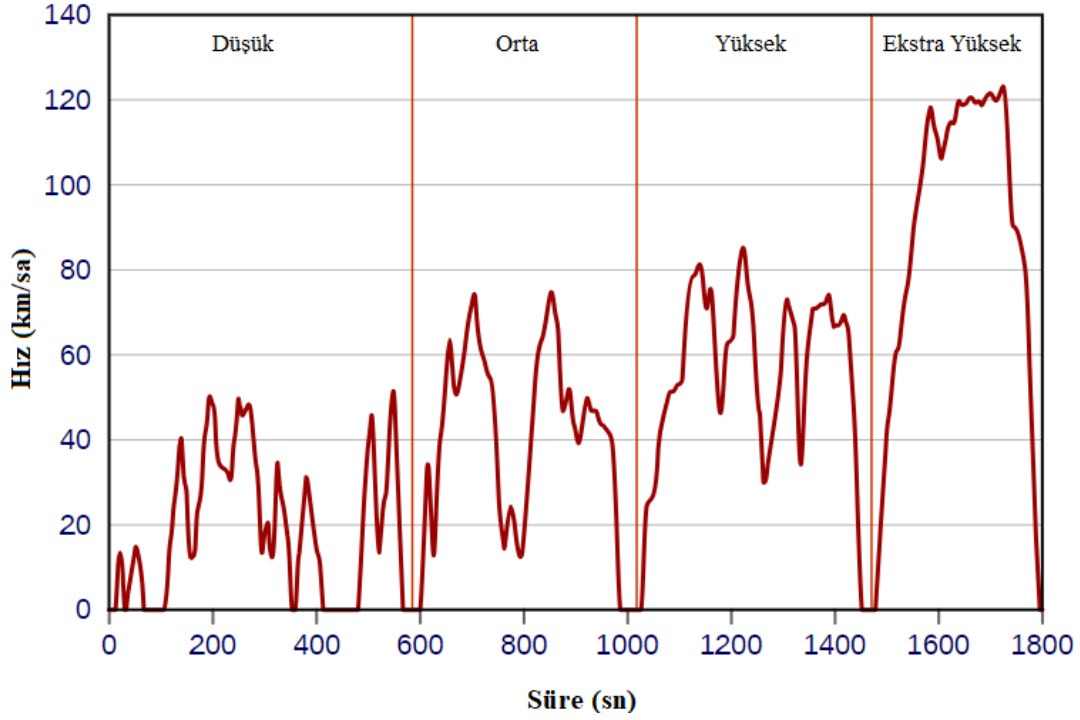
WLTC, geleneksel ve hibrit otomobillerin yanı sıra tamamen elektrikli araç yelpazesinin kirletici seviyelerini, CO<sub>2</sub> emisyonlarını ve yakıt tüketimini belirleyen küresel bir standarttır. Standart, diğerlerinin yanı sıra Çin, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği tarafından kabul edilmektedir. 1 Eylül 2019'dan itibaren AB ülkelerinde (ve ayrıca İsviçre, Norveç, İzlanda ve Türkiye'de) tescil edilecek tüm hafif ticari araçların WLTC standartlarına uyması gerekmektedir. WLTC, 1980'lerde binek otomobiller için şehir içi sürüş koşullarını simüle etmek amacıyla oluşturulan Avrupa homologasyon prosedürü olarak eski NEDC (New European Drive Cycle)'nin yerini almaktadır (URL-2).

WLTC, Tablo 5.6'da belirtilen farklı PMR (Power to Mass Ratio) oranlarına sahip araç kategorileri için tasarlanmış birden fazla test çevrimini kapsar. PMR parametresi, nominal gücün (Watt olarak) ve bordür ağırlığının (kilogram olarak) oranı olarak tanımlanır. Burada bordür ağırlığı, sürücü hariç aracın yüksüz ağırlığını ifade eder. WLTC çevrim tanımları, aynı zamanda aracın üretici tarafından beyan edilen maksimum hızına da bağlıdır. Bu hız, test prosedürleri sırasında ulaşılabilecek en yüksek hızı temsil eder ve çevrimlerin uygulanabilirliği açısından kritik bir parametredir (URL-1).

Tablo 5.6. WLTC Test Kategorileri (Koteswara ve diğ., 2023)

Kategori	PMR (W/kg)	Maksimum Hız (V_max), km/sa
Sınıf 3b	PMR > 34	V_max ≥ 120
Sınıf 3a		V_max ≤ 120
Sınıf 2	34 ≥ PMR ≥ 22	
Sınıf 1	PMR ≤ 22	

Önerilen güç aktarım sistemi için nominal motor gücü 50 kW ve aracın bordür ağırlığı 2000 kg'dır. Mevcut analiz için  $PMR = (50000 \text{ W} / 2000 \text{ kg}) = 25$  ( $34 \geq PMR \geq 22$ ) olarak bulunur ve bu değer 34 ile 22 değerleri arasındadır. Bu nedenle, önerilen hibrit güç aktarım sistemi için Şekil 5.2'de verilen WLTC Sınıf 2 çevrimi dikkate alınmıştır (Koteswara ve diğ., 2023).



Şekil 5.2. Sınıf 2 araçlar için WLTC sürüş çevrimi (URL-1)

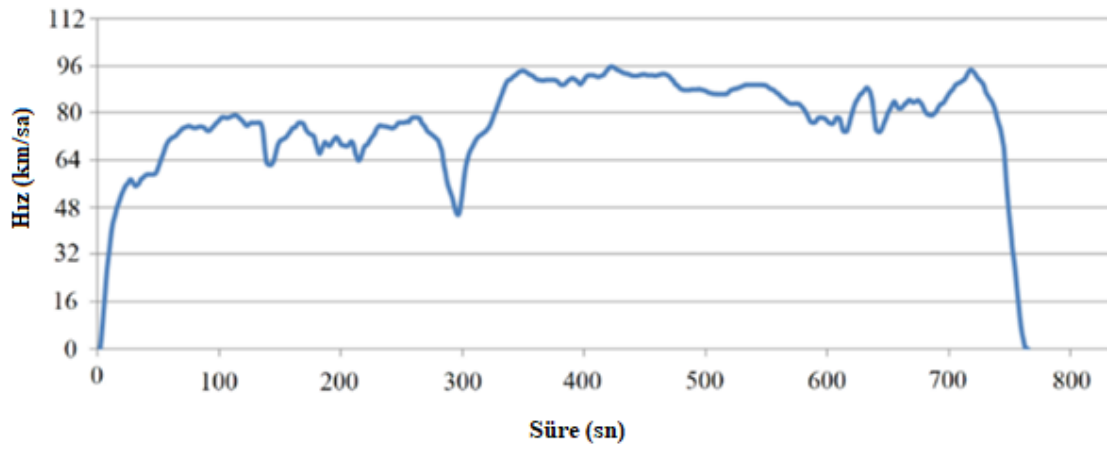
WLTC Sınıf 2 sürüş çevrimine ait teknik veriler Tablo 5.7'de paylaşılmıştır.

Tablo 5.7. Sınıf 2 araçlar için WLTC sürüş çevrimi özellikleri (URL-1)

Faz Veriler	Düşük	Orta	Yüksek	Ekstra Yüksek
Süre (sn)	589	433	455	323
Mesafe (m)	3101	4737	6792	8019
Maksimum Hız (km/sa)	51,4	74,7	85,2	123,1
Ortalama Hız (km/sa)	25,7	44,3	57,5	91,4
Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	0,90	0,96	0,85	0,65
Maksimum Yavaşlama İvmesi (m/s <sup>2</sup> )	-0,94	-0,93	-1,11	-1,06

WLTC sürüş çevrimi verileri, yeni sürüş çevrimi performansını tahmin etmek için ADVISOR yazılımındaki CYC\_SKELETON.m dosyasına aktarılır.

Diğer bir sürüş çevrimi olan HWFET, hafif hizmet araçlarının yakıt ekonomisini belirlemek için ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından geliştirilen bir sürüş programıdır. HWFET, 2008'den beri, EPA (United States Environmental Protection Agency)'nın otoyol/karayolu yakıt ekonomisi değerlerini belirlemek için kullanılmaktadır ve sürüş çevrimine ait grafik Şekil 5.3'te verilmiştir. (URL-3)



Şekil 5.3. HWFET sürüş çevrimi (Buzunov ve diğ., 2023)

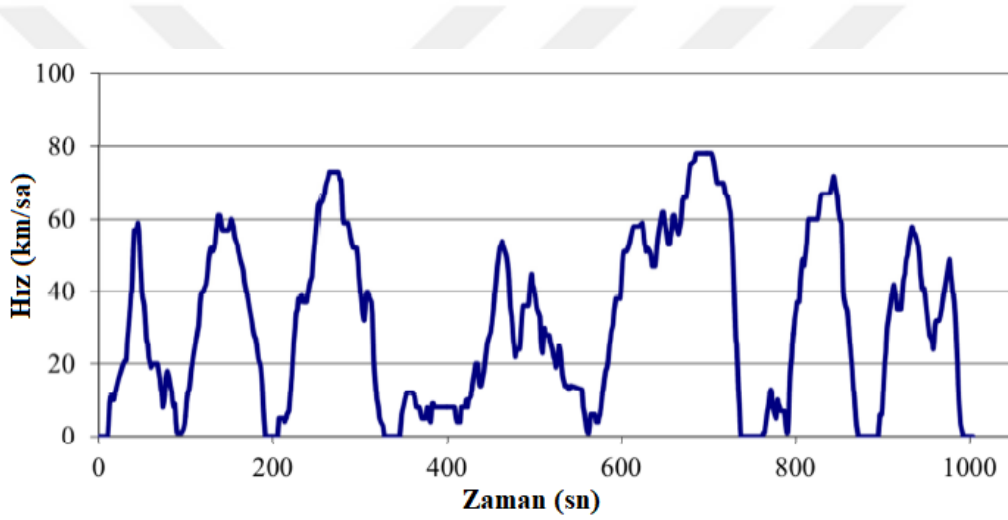
HWFET sürüş çevrimine ait teknik veriler Tablo 5.8'de yer almaktadır. Ayrıca HWFET sürüş döngüsü ADVISOR yazılımı içerisinde mevcut olduğundan dolayı yazılıma eklenmesine ihtiyaç duyulmamıştır.

Tablo 5.8. HWFET sürüş çevrimi özellikleri

<b>HWFET Veriler</b>	<b>Değerler</b>
<b>Süre (sn)</b>	765
<b>Mesafe (m)</b>	16501
<b>Maksimum Hız (km/sa)</b>	96,4
<b>Ortalama Hız (km/sa)</b>	77,58
<b>Maksimum İvme (m/s<sup>2</sup>)</b>	1,43
<b>Maksimum Yavaşlama İvmesi (m/s<sup>2</sup>)</b>	-1,48

Çalışmaya yeni bir perspektif kazandırmak amacıyla, yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli aracın İstanbul sürüş çevrimi üzerinde de test edilmesinin faydalarının altı çizilmelidir. Bu yaklaşım, aracın farklı trafik koşulları ve şehir içi dinamikler altında performansını değerlendirmek için ideal bir ortam sunar. İstanbul, yoğun trafik akışı ve değişken yol koşullarıyla bilindiğinden, bu çevrim testi, aracın gerçek dünya koşullarında nasıl bir performans sergilediğini gözlemlemek açısından değerli bilgiler sağlayabilir.

İstanbul sürüş çevrimi, İstanbul Teknik Üniversitesinde yapılan çalışma kapsamında ortaya çıkarılmıştır. Sahada ölçüm metodu ile elde edilmiş olup İstanbul trafiğinden alınmış verileri içermektedir. İstanbul sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği Şekil 5.4' te gösterilmiştir (Kartal ve diğ., 2018).



Şekil 5.4. İstanbul sürüş çevrimi (Dinç, 2013)

İstanbul sürüş çevrimine ait teknik veriler Tablo 5.9'de yer almaktadır.

Tablo 5.9. İstanbul sürüş çevrimi özellikleri (Dinç, 2013)

İstanbul Veriler	Değerler
Süre (sn)	1003
Mesafe (m)	8601
Maksimum Hız (km/sa)	78
Ortalama Hız (km/sa)	30,4
Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	4,471
Maksimum Yavaşlama İvmesi (m/s <sup>2</sup> )	-4,646

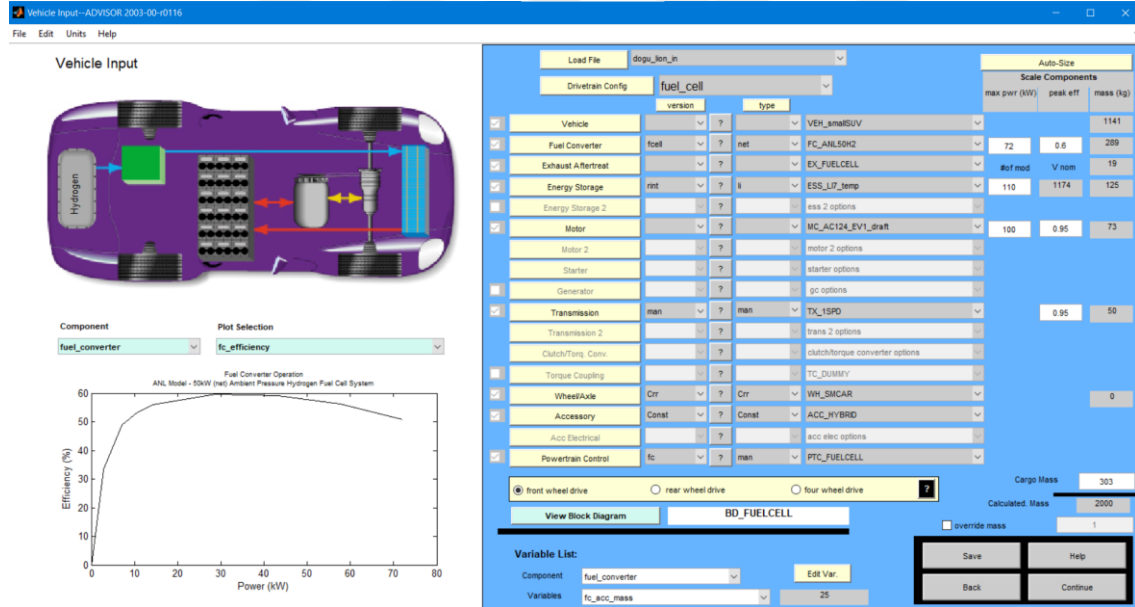
İstanbul sürüş çevrimi verileri, WLTC sürüş çevriminde olduğu gibi ADVISOR yazılımındaki CYC\_SKELETON.m dosyasına aktarılır.

### 5.3. Simülasyon Sonuçları

Yukarıda belirtilen, yakıt hücreli ve bataryalı hibrit elektrikli araçlara ait teknik veriler ile sürüş çevrimleri bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Araştırma kapsamında, farklı batarya özelliklerine sahip üç farklı batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli taşıt tipi için üç ayrı sürüş çevrimi üzerinden detaylı analizler gerçekleştirilecektir.

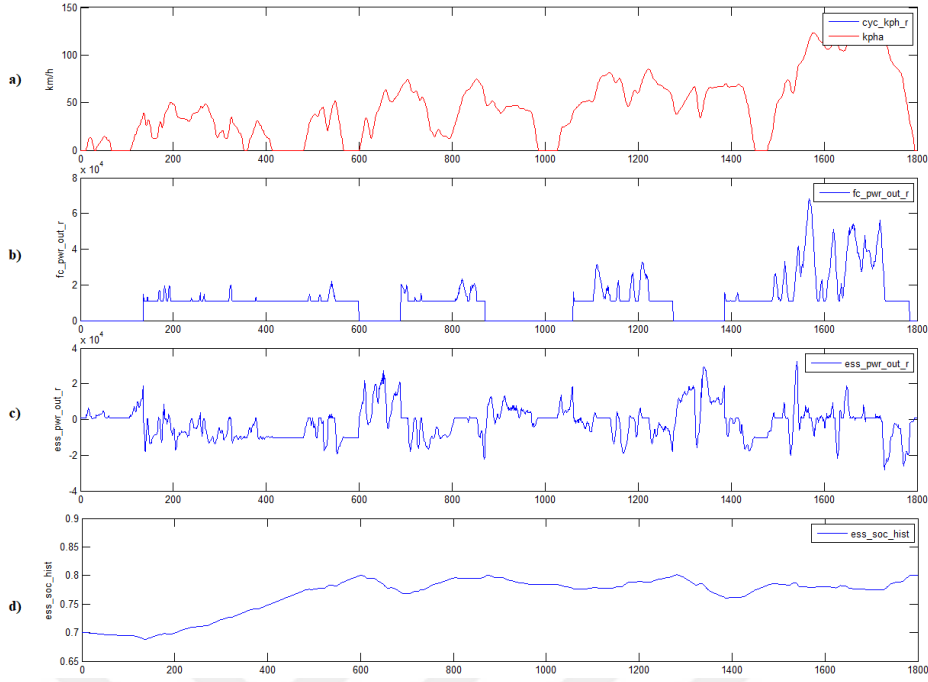
#### 5.3.1. Li-Ion Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araca Ait Simülasyon Sonuçları

Başlangıç olarak, lityum iyon batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın teknik özellikleri, ADVISOR Programı'nın giriş sayfasına işlenmiş olup, bu özellikler Şekil 5.5'te sunulmuştur.



Şekil 5.5. Li-Ion batarya grubuna sahip aracın ADVISOR programında giriş sayfası arayüzü

Li-ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli araç, WLTC sürüş çevriminde çalıştırıldığında ortaya çıkan sonuçlar, Şekil 5.6'da verilmiştir. Bu şekilde, WLTC sürüş çevrimi grafiği, PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, Li-Ion batarya güç çıkış grafiği ve Li-Ion batarya şarj durum grafiği yer almaktadır.



Şekil 5.6. a) WLTC sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Li-Ion batarya güç çıkış grafiği, d) Li-Ion batarya şarj durum grafiği

Şekil 5.6'daki grafikler incelendiğinde; yakıt hücresinden gelen güç çıkışı (b), aracın hızlanma anlarına karşılık gelen piklerle öne çıkıyor; hızın arttığı her noktada güç çıkışında da bir yükselme görülüyor. Bu, aracın daha yüksek hızlara ulaşmak için daha fazla enerji tüketmesi gerektiğini gösteriyor. Tersine, hız azaldığında güç çıkışının düştüğü, aracın daha az enerjiye ihtiyaç duyduğunu ortaya koyuyor. Üçüncü grafik (c), aracın bataryasından sağladığı güç çıkışını izliyor ve burada, hız artışlarında bataryanın güç sağlama, yavaşlamalarda ise rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımı yapma kabiliyeti belirginleşiyor. Grafikteki iniş ve çıkışlar, aracın batarya yönetiminin ne kadar etkin olduğunu ve gücünü nasıl optimize ettiğini sergiliyor. Son grafik (d) ise, bataryanın şarj durumunu, yani enerji seviyesini gösteriyor. Burada, SoC'nin genel olarak oldukça istikrarlı bir seviyede kaldığını, ancak hızlanma ve frenleme gibi enerji tüketimi ve geri kazanımının olduğu durumlarda küçük değişikliklerle karşımıza çıkıyor. Hızlanırken SoC'deki azalma, aracın hareket enerjisi için bataryadan güç çektiğini; yavaşlamalarda görülen artış ise rejeneratif frenlemenin bataryaya enerji geri kazandırdığını işaret ediyor. Bu dört grafik bir arada değerlendirildiğinde, hibrit bir aracın WLTC gibi karmaşık bir sürüş çevrimine nasıl adapte olduğunu ve enerji yönetim stratejilerinin etkinliğini aydınlatıyor. Bu veriler, aracın performansını, yakıt tüketimini ve genel enerji verimliliğini değerlendirmek için hayati öneme sahiptir.

Acceleration Test	
0-100 km/h (s): 7.8	Max. Accel. (m/s <sup>2</sup> ): n/a
64.4-96.6 km/h (s): n/a	Distance in 5s (m): n/a
0-137 km/h (s): n/a	Time in 0.4km (s): n/a
	Max. Speed (kmph): 156.8
Gradeability at 30 km/h:	23.6 %

Şekil 5.7. Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın dinamik performans sonuçları

Dinamik performansın standartlara uygun olup olmadığını daha sezgisel bir şekilde karşılaştırmak için, Şekil 5.7'de verilen dinamik performansın simülasyon sonuçları Tablo 5.10'da özetlenmiştir.

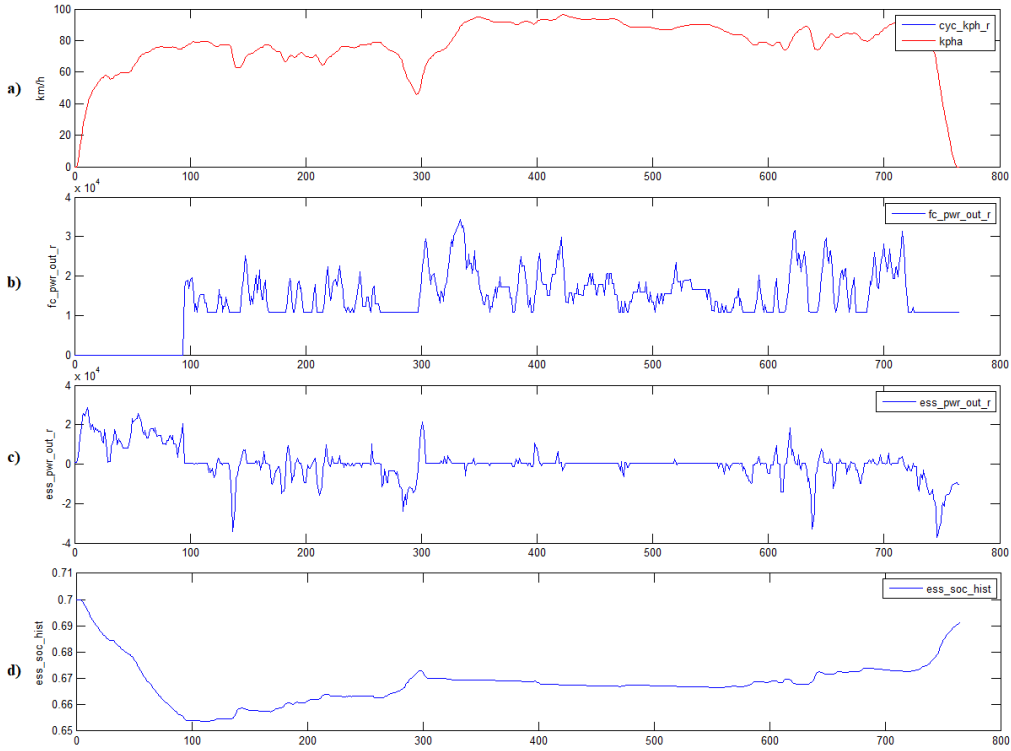
Tablo 5.10. Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın simülasyon sonuçları

	Performans İndikatörleri	Simülasyon Sonuçları
<b>Maksimum Hız (<math>V_m</math>)</b>	>130 km/sa	156,8 km/sa
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/sa) (<math>t</math>)</b>	<15 sn	7,8 sn
<b>Maksimum Tırmanma Kabiliyeti (<math>i</math>)</b>	>%20 (Tam Yük $v = 30$ km/s sabit)	%23,6

Tablo 5.10'daki sonuçlar, 0-100 km/sa hızlanma süresinin 7,8 saniye olduğunu ve bu sürenin 15 saniye içinde olduğunu gösteriyor; Maksimum hız 156,8 km/sa, 130 km/sa'den yüksek; maksimum eğim kabiliyeti %23,6, %20'den fazladır. Dinamik performans endeksleri belirlenen endeksleri karşılıyor, yani güç sisteminin parametreleri makul bir şekilde eşleştirilmiştir.

Lityum iyon batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın diğer sürüş çevrimi koşullarında da aynı performans sonuçlarını vereceği için maksimum hız, hızlanma süresi ve maksimum tırmanma kabiliyeti testi diğer çevrimlerde uygulanmayacaktır. Bu nedenle, yalnızca WLTC sürüş çevrimi üzerinde detaylı testler yapılmıştır. Bu doğrultuda, diğer çevrimlerde ek testlere gerek duyulmamıştır.

Aracımız; Otoyol/Karayolu Yakıt Ekonomisi Test döngüsü olan HWFET sürüş döngüsünde çalıştırıldığında ortaya çıkan simülasyon sonuçları Şekil 5.8'te verilmiştir.



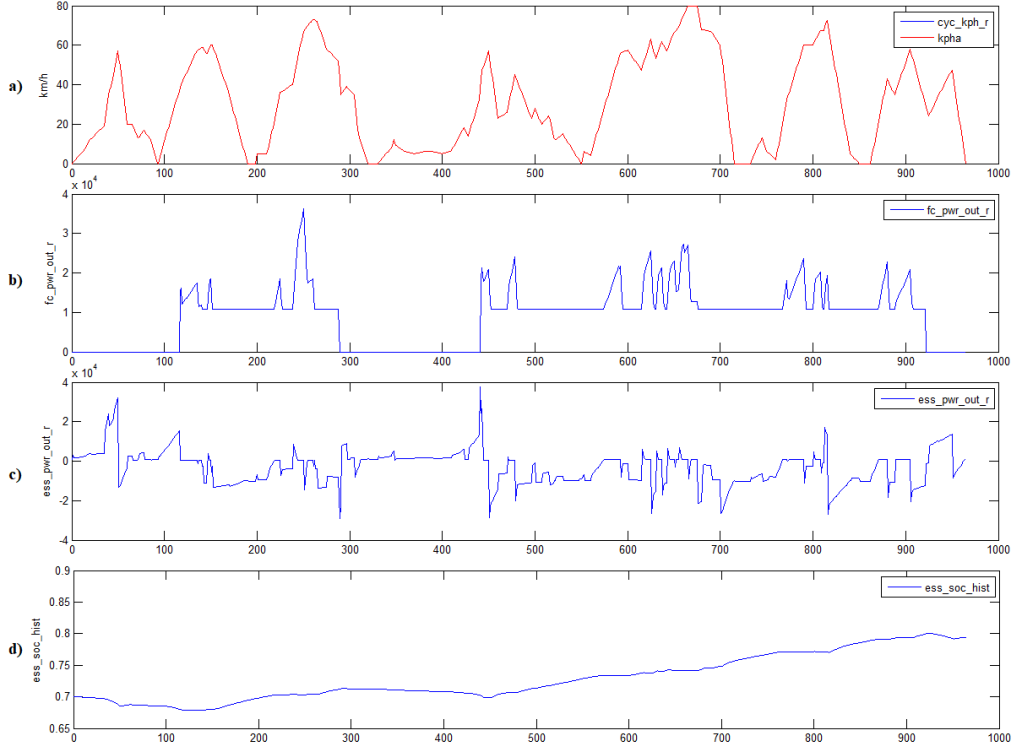
Şekil 5.8. a) HWFET sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Li-Ion batarya güç çıkış grafiği, d) Li-Ion batarya şarj durum grafiği

Yakıt hücresinin güç çıkışı (b), hız artışlarına eş zamanlı olarak artış gösterirken, hız azaldığında ise daha az güç üretiyor. Bu davranış, yakıt hücresinin dinamik enerji taleplerine hızlı bir yanıt verebilme kabiliyetini yansıtıyor. Özellikle, hızın artırılması gereken anlarda yakıt hücresi, aracın enerji ihtiyacını karşılayacak yüksek güç seviyelerine ulaşabilmek için ani tepkiler gösteriyor.

Batarya güç çıkışı grafiği (c), aracın hız değişimleri karşısında bataryanın ne şekilde devreye girdiğini ve enerji yönetimi stratejisini daha açık bir şekilde ortaya koyuyor. Batarya, hızlanma anlarında ek enerji sağlayarak yakıt hücresine destek olurken, hız azaldığında rejeneratif frenleme yoluyla enerjiyi geri kazanıyor ve SoC'nin (d) stabilize edilmesine katkı sağlıyor.

Sonuçta, HWFET sürüş döngüsü esnasındaki bu enerji akışı ve yönetimi, aracın genel enerji verimliliği ve performansını artırıcı stratejilerin uygulanmasına olanak tanıyor. Hız profili ve enerji yönetimi arasındaki bu etkileşim, uzun menzilli sürüşlerde ve değişken hız koşullarında aracın enerji kullanımını nasıl optimize ettiğini ve batarya ömrünü nasıl en üst düzeye çıkardığını gösteriyor.

Son olarak lityum iyon batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımız İstanbul çevriminde çalıştırıldığında oluşan sonuçlar Şekil 5.9’da yer almaktadır.



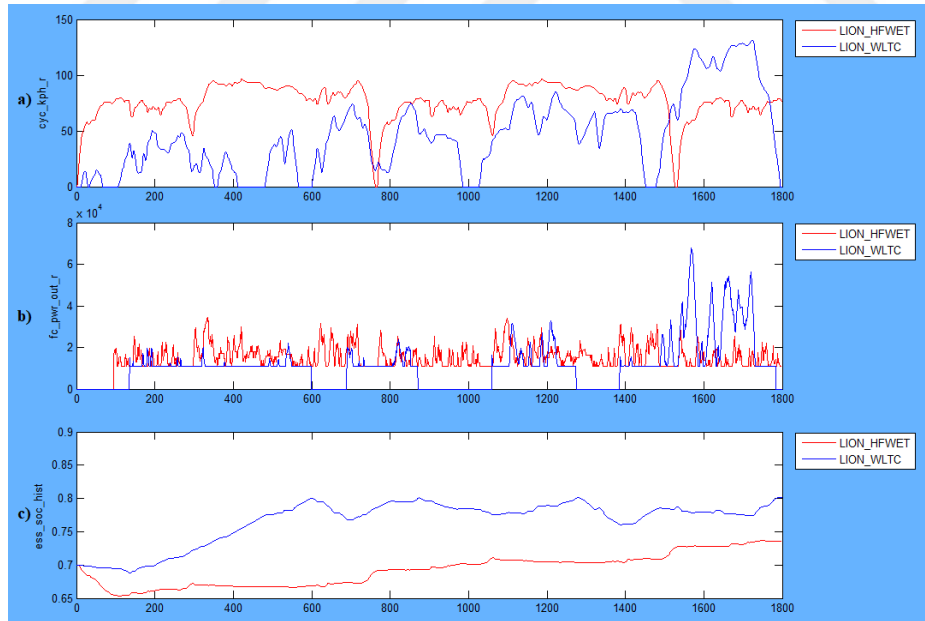
Şekil 5.9. a) İstanbul sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkışı grafiği, c) Li-Ion batarya güç çıkışı grafiği, d) Li-Ion batarya şarj durum grafiği

Yakıt hücresi güç çıkışı grafiği (b), İstanbul sürüş çevrimi sırasında, özellikle hızın arttığı anlarda yakıt hücresinin güç üretiminde görülen artışlarla hız profilinin taleplerine yanıt verdiğini gösteriyor. Düşük hızlarda veya duraklama anlarında, yakıt hücresinin güç çıkışı azalırken, hızlı hızlanmalar gibi enerji yoğun durumlarda güç çıkışında belirgin artışlar görülmektedir. Bu, yakıt hücresi sisteminin yüksek güç taleplerini karşılamak üzere hızlı bir şekilde tepki verebildiğini ve şehir içi trafikte değişen hızlara uyum sağlayabildiğini gösterir.

Batarya güç çıkışı grafiği (c) ise, aracın hız değişimlerine bataryanın nasıl tepki verdiğini detaylı bir şekilde ortaya koyar. Batarya, özellikle hızın düştüğü ve rejeneratif frenlemenin muhtemel olduğu anlarda negatif güç çıkışı göstererek, kullanılmış kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek depolar. Ayrıca, hız artışı gerektiren durumlarda bataryadan ani enerji sağlama ihtiyacı gözlenmektedir, bu da bataryanın hızlı yük değişimlerine esnek bir şekilde yanıt verebildiğini ifade eder.

Batarya şarj durumu grafiği (d), yüksek enerji talebinde bulunulan hızlanma dönemlerinde SoC'nin azaldığı, ancak duraklama ve hafif hızlarda seyir halindeyken SOC'nin daha sabit olduğu veya artış gösterdiği anlar gözlemlenir. Bu, enerji geri kazanımının etkili olduğu ve sürüş çevrimi boyunca bataryanın düzenli olarak şarj edildiği ve deşarj olduğu anlamına gelir. İstanbul gibi karmaşık trafik koşullarında aracın enerji yönetimi sistemlerinin adaptasyon ve performans kapasitesinin kritik olduğu sonucuna varılabilir.

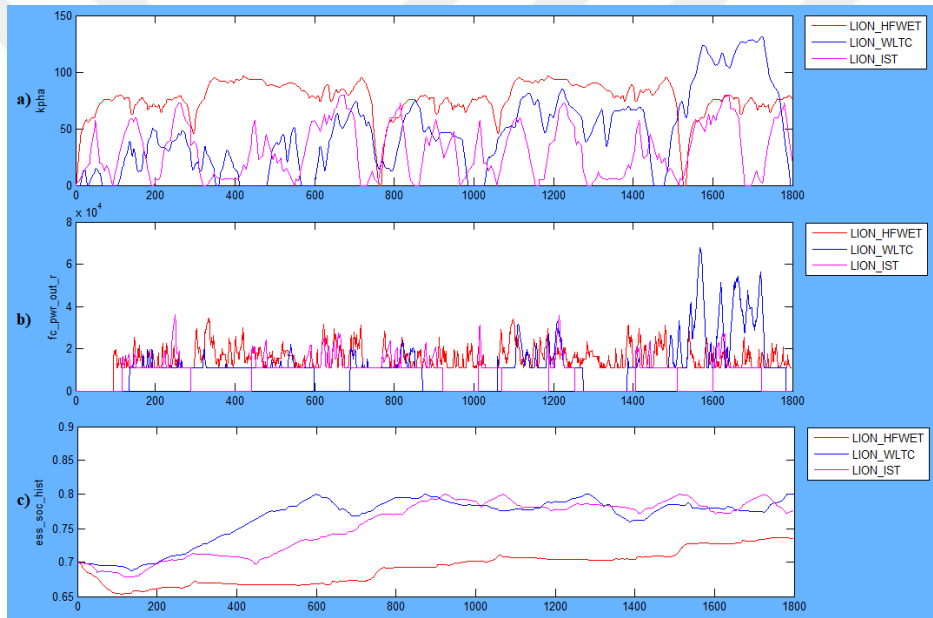
Lityum-İyon batarya grubunu kullanarak donatılmış bir yakıt hücreli hibrit aracın farklı sürüş çevrimlerindeki performansının karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilirken, WLTC sürüş çevriminin süresi referans alınmalıdır. WLTC sürüş çevrimi, uygulanan sürüş çevrimleri arasında en uzun süreye sahip olanıdır. Öte yandan, HWFET ve İstanbul sürüş çevrimleri, WLTC'nin süresine eş değerklenmek üzere toplam 1800 saniye sürecek şekilde ayarlanmalıdır. Bu standardizasyon, çeşitli sürüş çevrimleri arasında tutarlı bir karşılaştırma yapılabilmesi için gereklidir. Bu ayarlama, simülasyon kurulum ara yüzündeki “#of cycles” parametresinin düzenlenmesi suretiyle gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.10. a) HWFET ve WLTC sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre Li-Ion batarya şarj grafiği

Şekil 5.10’da verilen bu grafiklere göre, HWFET çevrimi, genellikle daha yüksek ve sabit hızları içerir, bu da batarya üzerindeki enerji talebinin düşük değişkenlik gösterdiği anlamına gelir. Bu durum, bataryanın daha az şarj değişimi göstermesine ve SoC'nin

yalnızca %70'den %74'e yükselmesine neden olur. Bu çevrimdeki yüksek hızlar nedeniyle araç, yakıt hücresinden düşük ama sabit bir güç çıkışı gerektirir, böylece bataryanın enerji verimliliği korunur. Diğer yandan, WLTC çevrimi, şehir içi ve dışı koşulları simüle eden daha değişken hız profillerine sahiptir. Bu çevrim, aracın hem düşük hem de yüksek hızlarda sürülmesini gerektirir ve dur-kalk hareketleri daha sık olduğundan yakıt hücresinden daha fazla güç çekilir. Bu, güç çıkışındaki dalgalanmaları ve özellikle testin sonlarına doğru güç çıkışındaki zirveleri açıklar. Aynı zamanda, bu değişken koşullar rejeneratif frenleme fırsatlarını artırarak, SoC'nin %70'den %80'e yükselmesine yol açar. Bu artış, bataryanın enerji geri kazanımının etkinliğini ve WLTC çevriminin araç üzerindeki enerji talebinin daha yoğun olduğunu gösterir.



Şekil 5.11. a) HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Sürüş çevrimlerine göre Li-Ion batarya şarj grafiği

Şekil 5.11'de verilen grafikler, lityum iyon bataryalı bir yakıt hücreli aracın HWFET, WLTC ve eklenen İstanbul sürüş çevrimindeki performansını göstermektedir. HWFET ve WLTC çevrimleri için gözlemlenen eğilimler yukarıda açıklanmıştır. İstanbul çevrimi ise daha düşük ve dalgalı hızlar içerir, bu da yoğun şehir içi trafik koşullarında rejeneratif frenlemenin daha fazla devreye girdiğini ve SoC'nin daha belirgin şekilde yükseldiğini işaret eder. Her üç çevrimde de SoC'nin zamanla artış göstermesi, aracın enerji yönetim sistemlerinin etkin çalıştığını ve çeşitli sürüş koşullarında enerjiyi verimli kullanabildiğini gösterir.

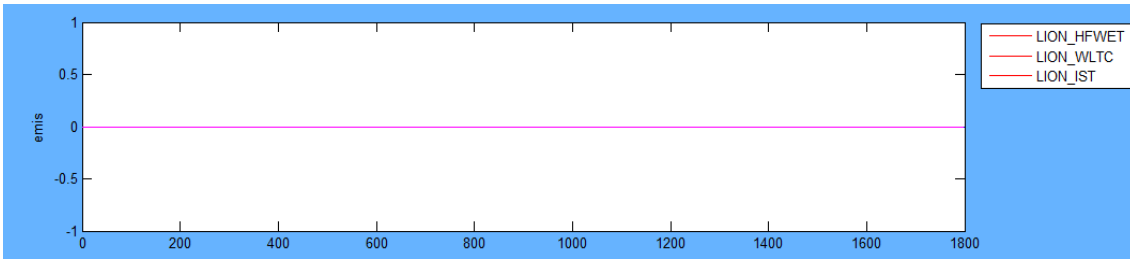
Tablo 5.11. Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın yakıt tüketimi değerleri

Yakıt Tüketimi	L/100km	Benzin Eşdeğeri
Sürüş Çevrimi		
HWFET	58,4	4
WLTC	75,6	5,1
İSTANBUL	76,7	5,2

Tablo 5.11’de sunulan verilere göre, HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrimlerinde lityum-iyon batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın yakıt tüketimi ve benzin eşdeğeri karşılaştırması yapılmıştır.

Hidrojenin depolama basıncı bilinmediğinden, benzin eşdeğeri değerleri enerji tüketimini tanıdık bir ölçek üzerinden değerlendirmek için kullanışlı bir karşılaştırma sunar.

HWFET çevriminde aracın 100 kilometre başına 58,4 litre hidrojen tüketimi ve 4 birim benzin eşdeğeri ile en verimli performansı sergilediği görülmektedir, bu durum düzgün hız profili ve karayolu koşullarındaki enerji verimliliğinden kaynaklanıyor olabilir. WLTC’de tüketim 75,6 litre ve benzin eşdeğeri 5,1 birime yükselmiş, şehir içi ve dışı koşulların getirdiği zorluklar nedeniyle enerji tüketimi artmıştır. İstanbul çevrimi ise 76,7 litre/100km tüketim ve 5,2 birim benzin eşdeğeri ile en yüksek enerji tüketimini göstermiş, şehir içi yoğun trafik ve sık dur-kalklar batarya üzerindeki yükü artırmış ve enerji verimliliğini düşürmüş olabilir.



Şekil 5.12. Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın emisyon grafiği

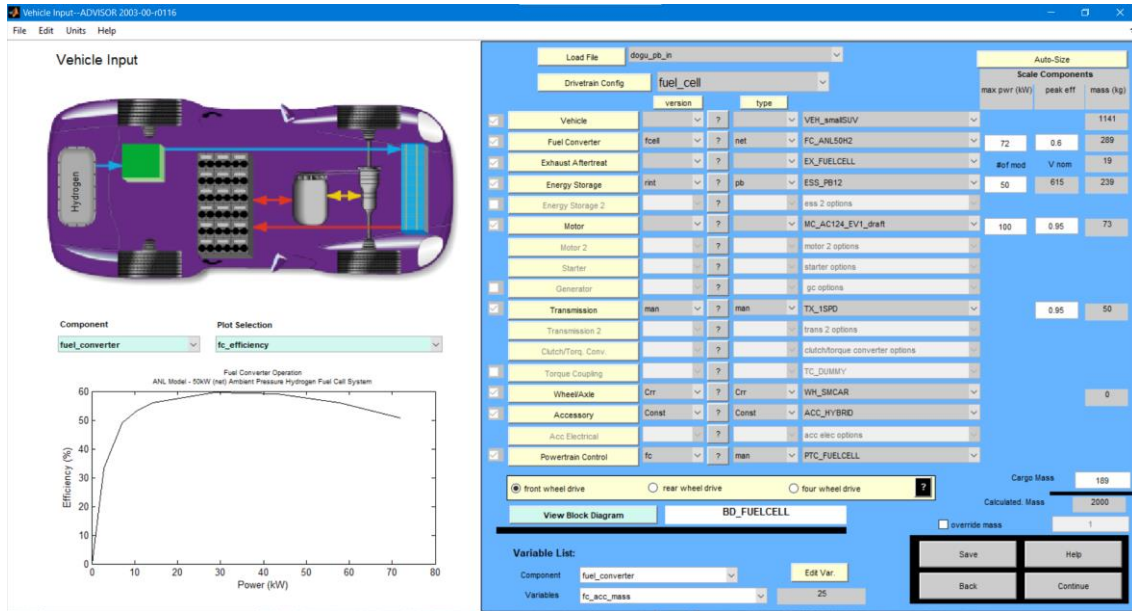
Şekil 5.12’de HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrimleri sırasında ölçülen egzoz emisyon değerlerini gösteriliyor. Üç çevrim boyunca emisyon seviyeleri sıfır olarak gözlemlenmiş, ki bu, yakıt hücresi-batarya ve elektrikli motor kombinasyonunun, yanma işlemi sırasında egzoz gazı üretmediği gerçeğine işaret ediyor. Hidrojen yakıt hücreleri, yakıt olarak hidrojen kullanır ve yalnızca elektrik enerjisi, ısı ve saf su üretirler.

Dolayısıyla, bu araçların işletimi sırasında, geleneksel içten yanmalı motorlara göre önemli oranda daha düşük veya hiç egzoz emisyonu üretmedikleri doğru olarak ölçülür. Bu, özellikle şehir içi alanlarda hava kalitesinin iyileştirilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından büyük bir avantaj sunar ve yakıt hücreli araçların çevre dostu bir seçenek olarak görülmesinin sebeplerinden biridir. Ayrıca, bu araçlar sessiz çalıştıkları için gürültü kirliliğini de azaltırlar, bu da şehir yaşam kalitesini artıran bir diğer önemli faktördür. Yakıt hücreli araçların geniş ölçekli benimsenmesi, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltabilir ve enerji güvenliğini artırabilir.

Diğer batarya gruplarına sahip araçlarda da benzer grafik elde edileceği için tezin bundan sonraki kısmındaki analizlerde emisyon grafiği paylaşılmasına ihtiyaç duyulmamıştır.

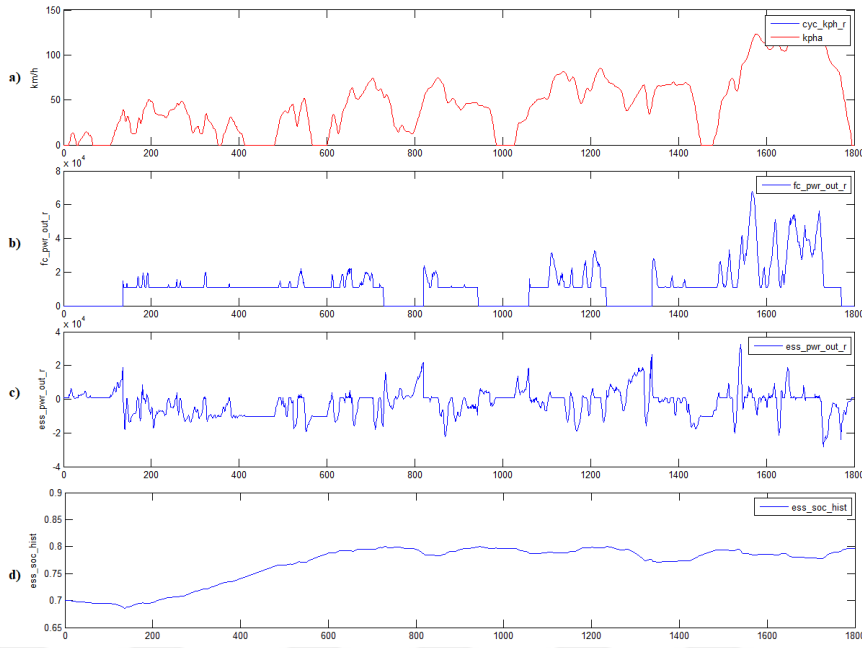
### 5.3.2. Pb-Asit Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araca Ait Simülasyon Sonuçları

Kurşun-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın teknik özellikleri, ADVISOR Programı'nın giriş sayfasına işlenmiştir ve bu özellikler Şekil 5.13'te gösterildiği şekilde sunulmuştur.



Şekil 5.13. Pb-Asit batarya grubuna sahip aracın ADVISOR programında giriş sayfası arayüzü

WLTC sürüş çevrimi esnasında aracın performansına ait sonuçlar Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



Şekil 5.14. a) WLTC sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Pb-Asit batarya güç çıkış grafiği, d) Pb-Asit batarya şarj durum grafiği

Yakıt hücresi güç çıkışı (b), hız artışları sırasında güç çıkışında artış ve hız azalmalarında güç çıkışında düşüş ile doğrudan ilişkilidir. Bu, yakıt hücresinin bu talebe nasıl cevap verdiğini gösterir. Batarya güç çıkışı (c) grafiğindeki değişimler, bataryanın aracın hızlanmasına tepki olarak güç sağladığını ve yavaşlamalar sırasında rejeneratif frenleme yoluyla güç geri kazandığını gösterir. Buradaki dalgalanmalar, aracın hız değişikliklerine tepkisini ve batarya yönetim sisteminin etkinliğini gösterir. Bu tepkiler, (d) grafikteki SoC'de görülen hafif değişimlere yol açar. SoC'deki genel eğilim, aracın enerji depolama kapasitesinin, hızlanma ve yavaşlama sırasında bataryanın sürekli olarak güç sağlama ve geri kazanma kabiliyetini koruduğunu gösterir. Yani, aracın enerji yönetim sistemi, hız profilindeki değişimlere uyum sağlayacak şekilde dinamik olarak çalışır ve bu, hem güç tüketiminde hem de enerji depolamasında verimliliği optimize etmeye yardımcı olur.

Acceleration Test	
0-100 km/h (s): 14.7	Max. Accel. (m/s <sup>2</sup> ): n/a
64.4-96.6 km/h (s): n/a	Distance in 5s (m): n/a
0-137 km/h (s): n/a	Time in 0.4km (s): n/a
	Max. Speed (kmph): 157.5
Gradeability at 30 km/h:	23.6 %

Şekil 5.15. Pb-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın dinamik performans sonuçları

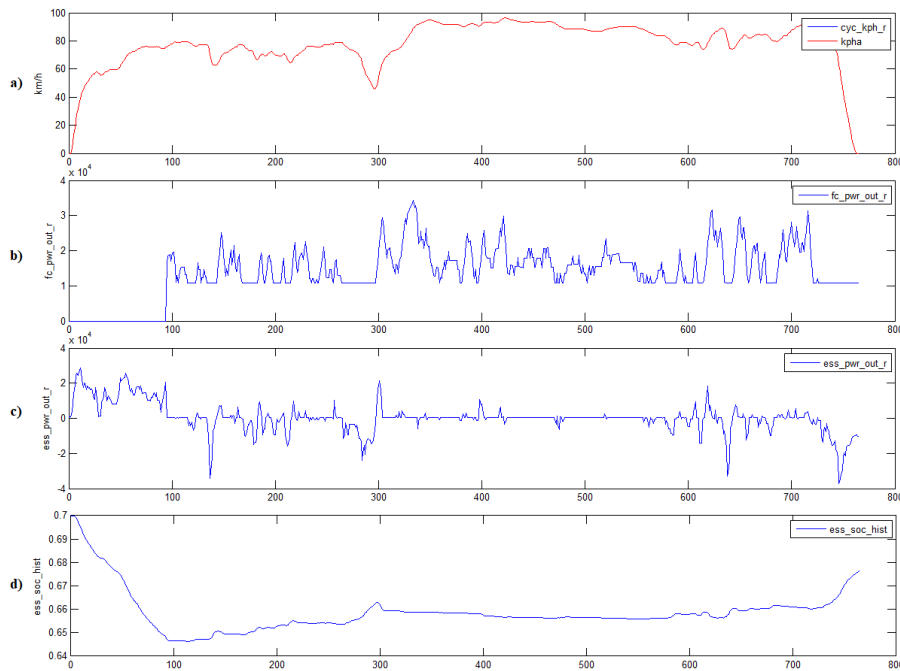
Şekil 5.15'te sunulan dinamik performans simülasyonları, standart uygunluklarının sezgisel bir analizi için Tablo 5.12' de özetlenmiştir.

Tablo 5.12. Pb-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın simülasyon sonuçları

	Performans İndikatörleri	Simülasyon Sonuçları
<b>Maksimum Hız (<math>V_m</math>)</b>	>130 km/sa	157,5 km/sa
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/sa) (<math>t</math>)</b>	<15 sn	14,7 sn
<b>Maksimum Tırmanma Kabiliyeti (i)</b>	>%20 (Tam Yük $v = 30$ km/s sabit)	%23,6

Tablo 5.12' ye göre, araç 100 kilometreye 14,7 saniyede ulaşmakta ve bu, belirlenen 15 saniye sınırı içindedir. Araç, saatte maksimum 157,5 kilometre hıza çıkabilmekte ki bu da 130 km/sa'lik belirlenmiş değerin üzerindedir; eğimli yollarda ise %23,6'lık bir eğime tırmanma kapasitesi sunmakta ve bu da minimum %20'lik gerekliliği sağlamaktadır. Bu nedenle, dinamik performans endeksleri belirlenen standartları karşılamakta ve güç sistemi parametrelerinin uygun bir biçimde ayarlandığını göstermektedir.

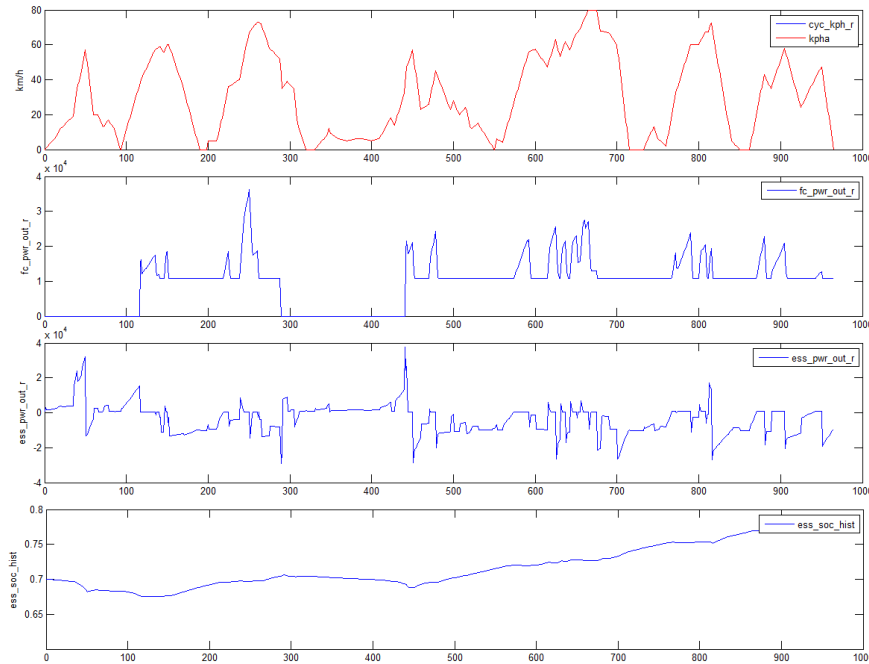
HWFET sürüş döngüsü altında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları kapsamında aracımızın performansı Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. a) HWFET sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Pb-Asit batarya güç çıkış grafiği, d) Pb-Asit batarya şarj durum grafiği

HWFET sürüş döngüsünde elde edilen verilere göre, (b) grafiğindeki yakıt hücresi güç çıkışı, düzgün ve sabit otoyol hızlarına paralel olarak görece dengeli bir şekilde artış ve azalış gösteriyor; bu da aracın sabit yüksek hızlarda bile enerji ihtiyacını kararlı bir şekilde karşılayabildiğini gösteriyor. Batarya güç çıkışı (c) grafiğinde, hızlanma anlarında bataryadan güç çekişi ve yavaşlamalarda güç iadesi, yakıt hücresi tarafından üretilen enerjiyle uyum içinde dalgalanıyor. Bu enerji alışverişi, (d) grafiğindeki batarya SoC seviyesinin zaman içinde yavaş ve kademeli bir düşüş sergilemesiyle sonuçlanıyor ki bu da HWFET sürüş döngüsünün düşük hız değişimleri ve uzun mesafe sabit hız gereksinimleri göz önüne alındığında beklentilere uygun bir performans olduğunu gösteriyor. Bu üç grafik bütünüyle ele alındığında, aracın enerji yönetim sisteminin HWFET sürüş döngüsüne uyum sağlayarak verimli bir şekilde çalıştığı sonucuna varılıyor.

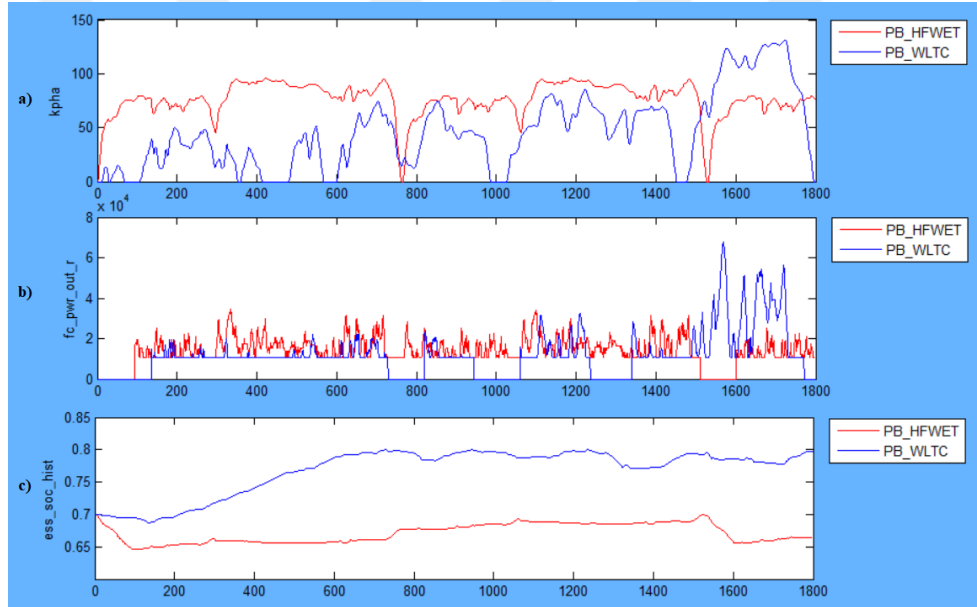
Pb-Asit bataryaya sahip hibrit yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımızın İstanbul sürüş çevrimi sırasında elde ettiği veriler Şekil 5.17’de görselleştirilmiştir.



Şekil 5.17. a) İstanbul sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Pb-Asit batarya güç çıkış grafiği, d) Pb-Asit batarya şarj durum grafiği

İstanbul sürüş çevrimi, kentsel koşullar altında sıklıkla değişken hızlar ve dur-kalk hareketleri ile karakterizedir, bu da daha kompleks bir enerji yönetimi gerektirir.

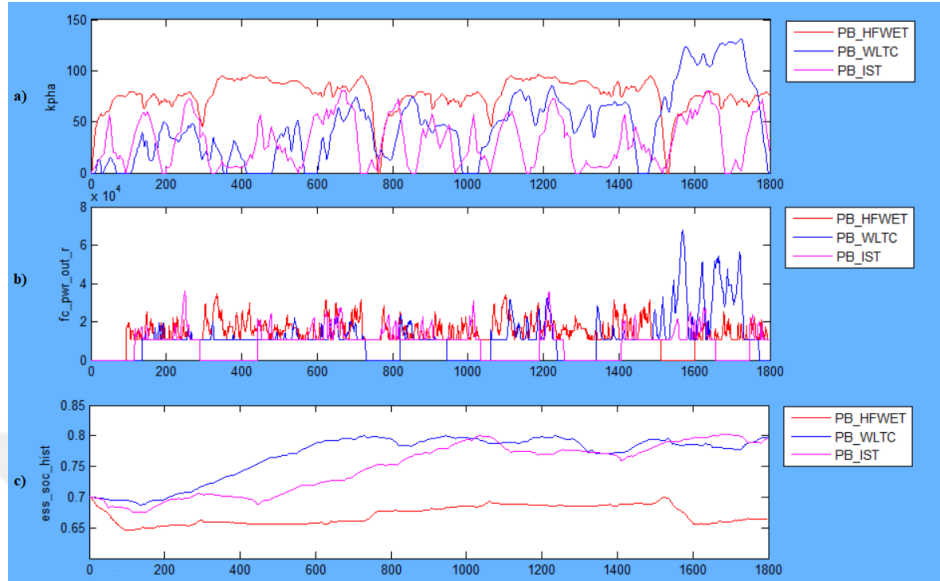
Grafiklerdeki veriler bu bağlamda ele alındığında, (b) grafiğindeki yakıt hücresi güç çıkışı, aracın hızdaki artışlara hızlı bir şekilde tepki vermesi gerektiğinde pikler gösterirken, trafikte yavaşlamalar ve durmalar sırasında azalma eğilimi gösteriyor. (c) grafiğindeki batarya güç çıkışındaki dalgalanmalar, aracın dur-kalk hareketlerinde bataryadan güç çekme ve yavaşlamalarla birlikte rejeneratif frenleme yoluyla enerji geri kazanımını yansıtıyor. Bu sürüş tarzı, (d) grafiğinde gözlemlenen SoC'deki yavaş yükselişler ile uyumlu; araç trafikte ilerledikçe enerji seviyesindeki artış, etkin bir enerji geri kazanımını ve bataryanın daha sık yavaşlamalar sırasında şarj olmasını işaret ediyor. İstanbul sürüş çevriminin karmaşıklığına rağmen, bu veriler aracın güç yönetim sisteminin şehir içi trafik koşullarında iyi bir performans sergileyebildiğini ve enerjiyi etkili bir şekilde yönetebildiğini gösteriyor.



Şekil 5.18. a) HWFET ve WLTC sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) Sürüş çevrimlerine göre Pb-Asit batarya şarj grafiği

Şekil 5.18'deki verilen grafiklere göre, HWFET sürüş çevrimi analizinde, Pb-Asit bataryanın düşük enerji yoğunluğu ve sınırlı şarj kabul hızı özellikleri ön plana çıkar. HWFET çevriminde, sabit hız gerektiren koşullarda SoC oranı %70'den %66'ya düşmüş, bu düşüş bataryanın rejeneratif frenlemeden yararlanma kapasitesinin yetersiz olmasından kaynaklanmıştır. WLTC çevriminde ise, sık dur-kalklar rejeneratif frenleme fırsatını arttırması nedeniyle SoC artışı gözlemlenmiştir. Yakıt hücresi güç çıkışına gelince, her iki çevrimde de dalgalanmalar gözlemlenmiş ancak WLTC'de daha yüksek

ve sık pikler oluşmuştur. Bu, WLTC'nin değişken hız ve sık dur-kalk koşullarında aracın daha fazla güç talep ettiğini gösterir.



Şekil 5.19. a) HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkışı grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre Pb-Asit batarya şarj grafiği

Şekil 5.19'daki grafikler incelendiğinde İstanbul çevriminde hız ve güç çıkışı WLTC'ye benzer dalgalanmalar gösterir ancak maksimum değerler daha düşük olup, bu şehir içi daha düşük hız limitleri nedeniyle. İstanbul çevrimindeki SoC artışı, WLTC ile benzerdir.

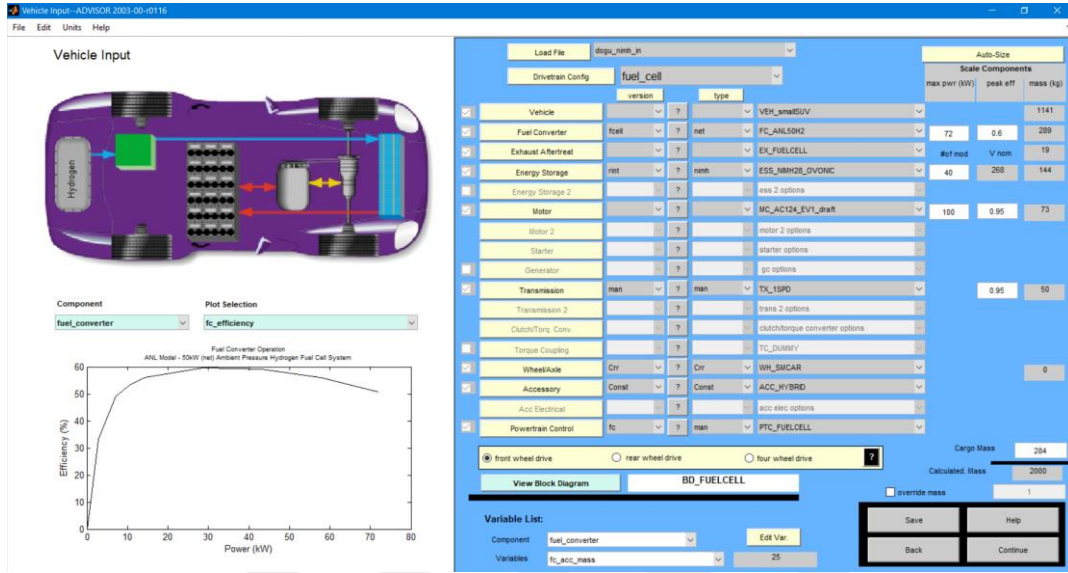
Tablo 5.13. Pb-Asit batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın yakıt tüketimi değerleri

Sürüş Çevrimi	Yakıt Tüketimi	
	L/100km	Benzin Eşdeğeri
HWFET	55,7	3,8
WLTC	79,4	5,4
İSTANBUL	87,2	5,9

Tablo 5.13'deki tabloya göre; HWFET sürüş çevriminde en düşük benzin eşdeğeri tüketimi 3,8 olarak kaydedilmiştir. WLTC sürüş çevrimi, aracın şehir içi ve dışı koşullardaki karmaşık sürüş profilinde 5,4 benzin eşdeğeri tüketimi ile orta seviye bir tüketim gösterirken; İstanbul sürüş çevriminde 5,9 değeri ile en yüksek benzin eşdeğeri tüketimi gerçekleşmiştir. Özellikle, şehir içi trafiğinin yoğun olduğu İstanbul gibi büyük metropollerde yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir.

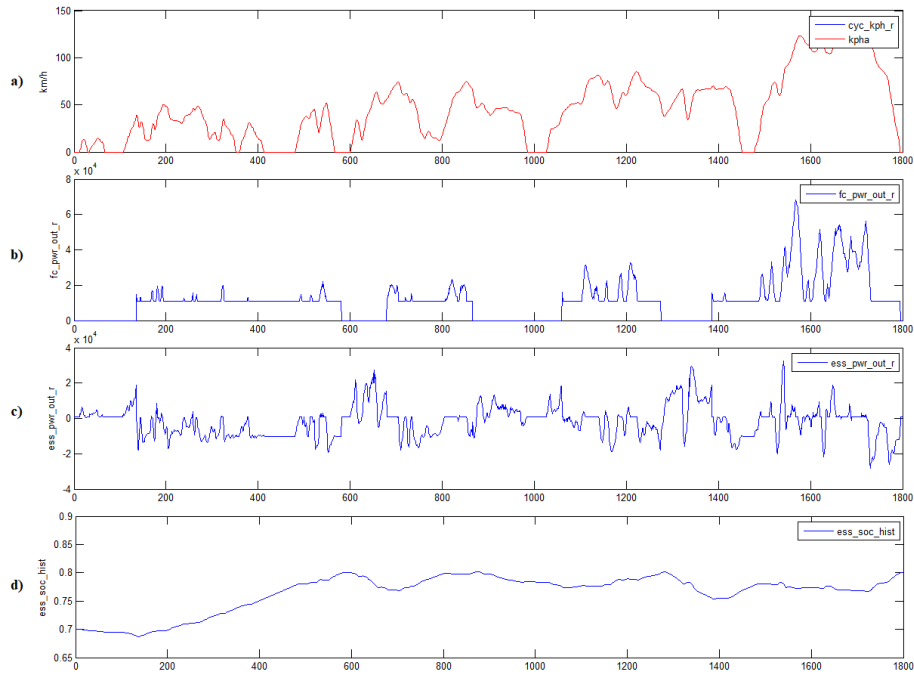
### 5.3.3. Nikel Metal Hidrür Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araca Ait Simülasyon Sonuçları

NiMG bataryaya sahip yakıt hücreli aracın teknik özellikleri Şekil 5.20'te verilmiştir.



Şekil 5.20. Ni-MH bataryaya grubuna sahip aracın ADVISOR programında giriş sayfası arayüzü

WLTC esasında aracın performansına ait sonuçlar Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21. a) WLTC sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) NiMH bataryaya güç çıkış grafiği, d) NiMH bataryaya şarj durum grafiği

Yakıt hücresinin güç çıkışı grafiği (b) ve WLTC'nin düşük hızlı bölümlerinde daha az güç çıkışı gösterirken, yüksek hızlı bölümlerde daha yüksek güç gereksinimini karşılayacak şekilde arttığını görebiliyoruz. Bu durum, aracın farklı sürüş koşullarında güç ihtiyacının nasıl değiştiğini ve yakıt hücresi sisteminin bu ihtiyaca nasıl yanıt verdiğini gösterir. (c) grafiği, batarya güç çıkışını sergiliyor ve rejeneratif frenlemenin yanı sıra, aracın hızlanma ve yavaşlama esnasında bataryadan ne kadar güç çektiği veya ne kadar enerji depoladığı konusunda bilgi veriyor. WLTC'nin hız değişikliklerine bağlı olarak batarya güç çıkışındaki iniş ve çıkışlar, batarya yönetim sisteminin etkinliğini gösteriyor. (d) grafiğinde ise bataryanın SoC seviyesinin yavaş yavaş arttığı ve WLTC sürüş çevrimi süresince istikrarlı bir şekilde yükseldiği görülüyor, bu da sürüş çevrimi boyunca bataryanın enerji depolama kapasitesini koruyup arttırabildiğini işaret ediyor.

Acceleration Test	
0-100 km/h (s): 13.7	Max. Accel. (m/s <sup>2</sup> ): n/a
64.4-96.6 km/h (s): n/a	Distance in 5s (m): n/a
0-137 km/h (s): n/a	Time in 0.4km (s): n/a
	Max. Speed (kmph): 157.6
Gradeability at 30 km/h:	23.6 %

Şekil 5.22. NiMH batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın dinamik performans sonuçları

Şekil 5.22'de sunulan dinamik performans sonuçları, standart uygunluklarını sezgisel bir analiz için Tablo 5.14'de özetlenmiştir.

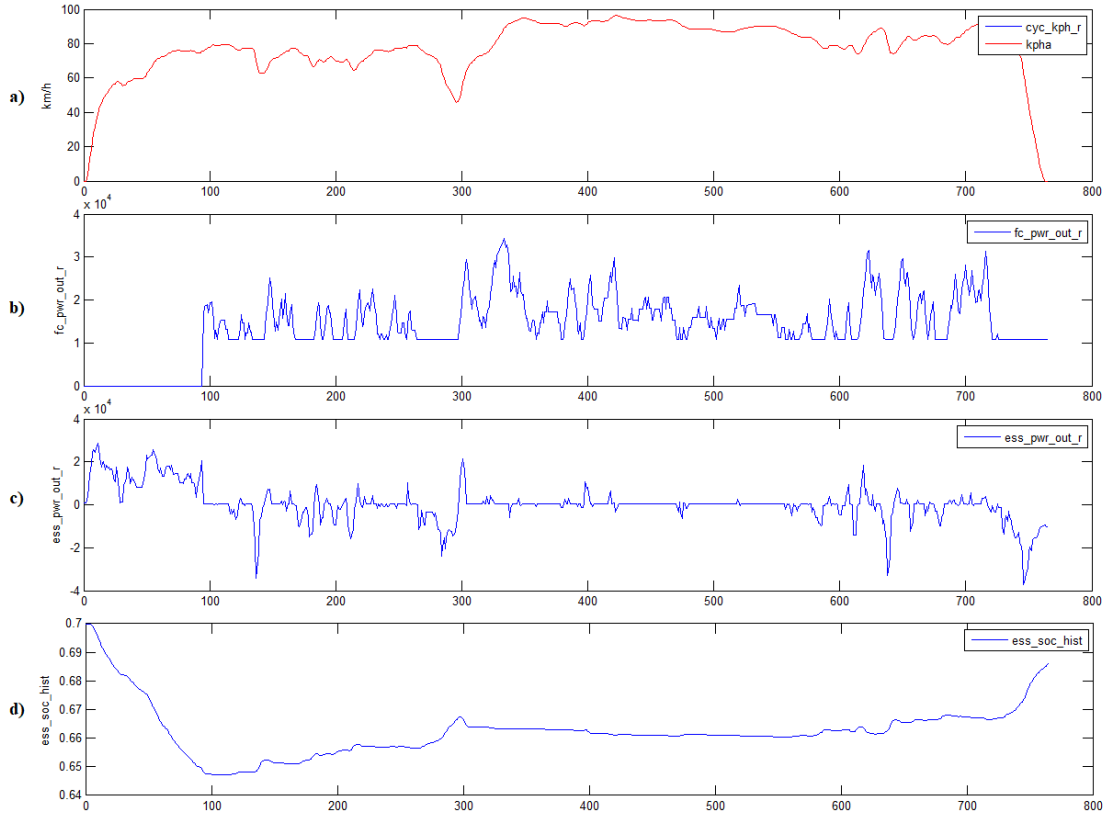
Tablo 5.14. NiMH batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın simülasyon sonuçları

	Performans İndikatörleri	Simülasyon Sonuçları
<b>Maksimum Hız (<math>V_m</math>)</b>	130 km/sa	157,6 km/sa
<b>Hızlanma Süresi (0-100 km/sa) (<math>t</math>)</b>	<15 sn	13,7 sn
<b>Maksimum Tırmanma Kabiliyeti (<math>i</math>)</b>	>%20 (Tam Yük $v = 30$ km/s sabit)	%23,6

Tablo 5.14 incelendiğinde, aracın 100 km'lik hızlanma süresinin 13,7 saniye olduğu görülüyor ki bu süre, önceden belirlenmiş olan 15 saniyelik eşiği aşmıyor. Maksimum hız performansı saatte 157,6 km ile hedeflenen 130 km/sa hız sınırını geçiyor. Ayrıca, %23,6'lık maksimum eğim tırmanma yeteneği ile %20 olarak belirlenen minimum şartı da

başarıyla karşılıyor. Dolayısıyla, dinamik performans endekslerinin belirtilen kriterleri karşıladığı ve aracın güç sistemi parametrelerinin etkili bir şekilde düzenlendiği sonucuna varılıyor.

HWFET sürüş döngüsü altında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları kapsamında aracımızın performansı Şekil 5.23'de verilmiştir.

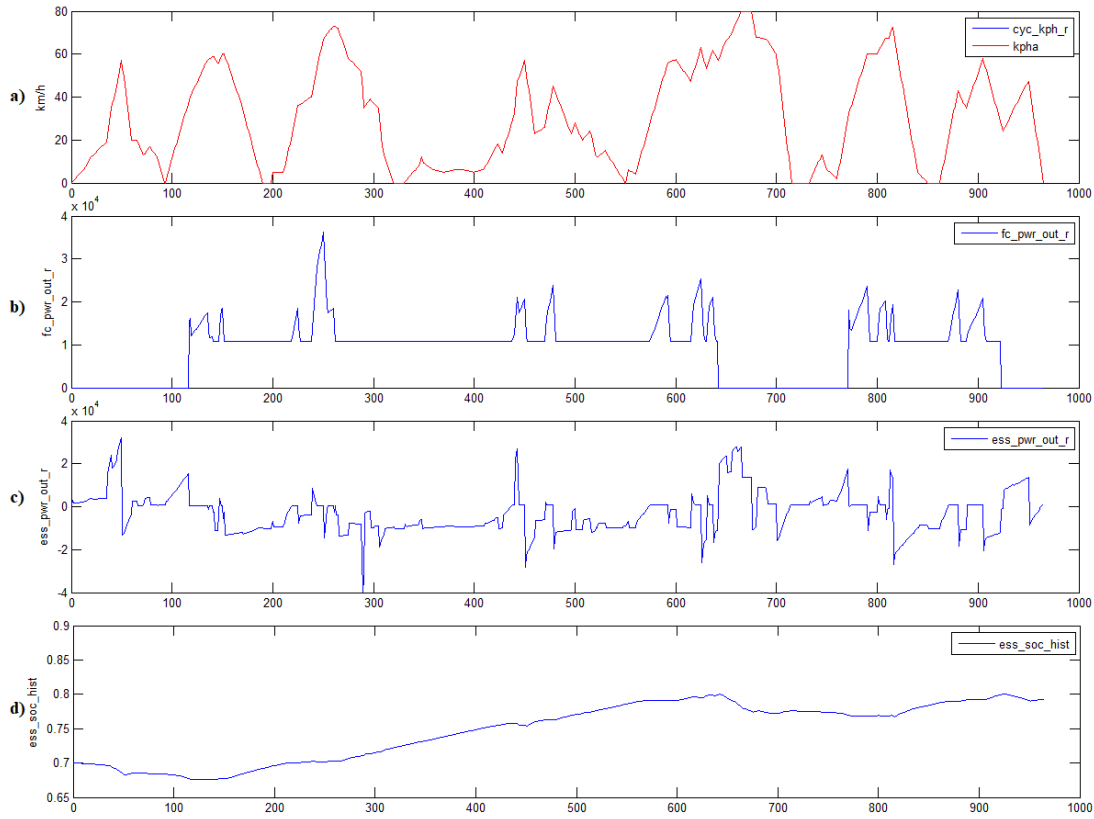


Şekil 5.23. a) HWFET sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkışı grafiği, c) NiMH güç çıkışı grafiği, d) NiMH batarya şarj durumu grafiği

HWFET sürüş çevrimi boyunca elde edilen veriler kapsamında, (b) grafiğindeki yakıt hücresinden gelen güç çıkışı, hızın yavaşladığı noktalarda belirgin bir şekilde düşüş gösteriyor ki bu, yüksek hızda seyir halindeyken yakıt hücresinin ihtiyaç duyulan gücü sağlamak için daha az çalıştığı anlamına geliyor. Aynı zamanda, (c) grafiğinde batarya güç çıkışı, aracın hız kesici durumlarında negatif değerler alarak enerji tasarrufu yaptığını ve bu enerjinin bataryaya geri yüklendiğini gösteriyor. İşte bu enerji geri yükleme, (d) grafiğindeki SoC'nin artmasına neden oluyor; yani araç hız düşürdüğünde, rejeneratif frenleme sistemi devreye girerek bataryayı şarj ediyor. Bu dinamik süreç, sürüş çevriminde enerji verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik bir yönetim

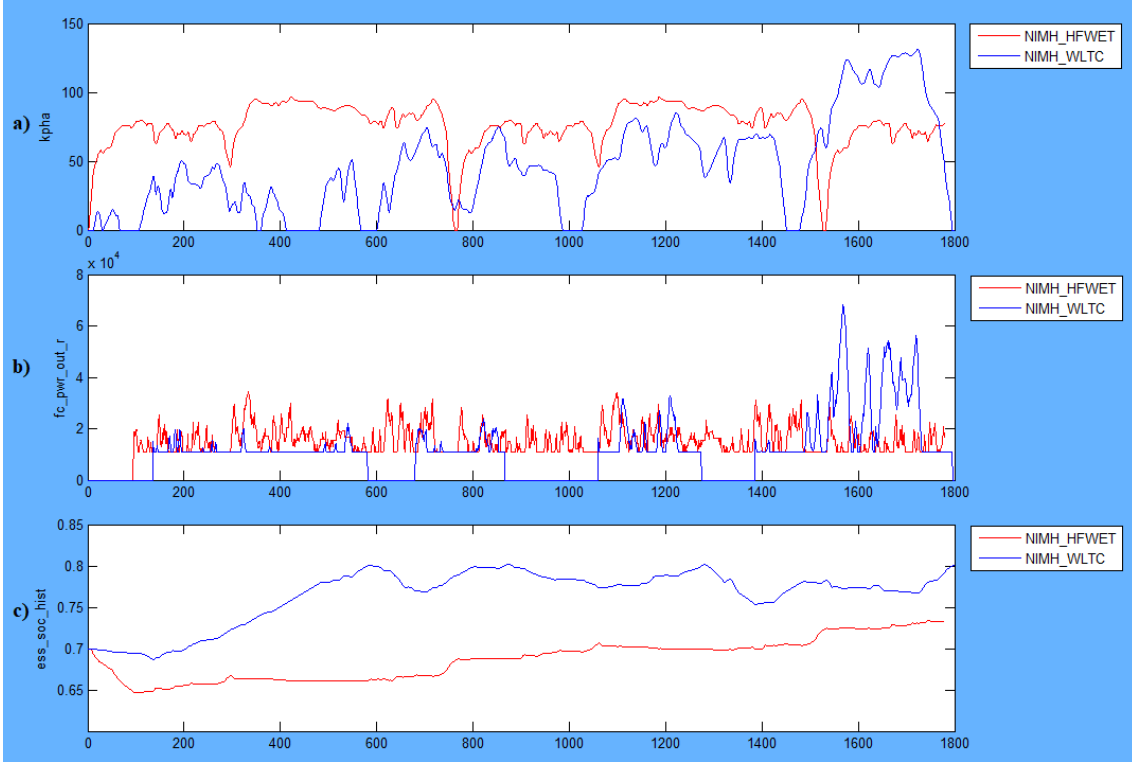
mekanizmasını gözler önüne seriyor ve batarya ile yakıt hücresi arasındaki entegre enerji alışverişinin verimli bir şekilde nasıl gerçekleştiğini ortaya koyuyor.

Ni-MH bataryaya sahip hibrit yakıt hücreli hibrit elektrikli aracımızın İstanbul sürüş çevrimi sırasında elde ettiği veriler Şekil 5.24'de görselleştirilmiştir.



Şekil 5.24. a) İstanbul sürüş çevrimi grafiği, b) PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği, c) NiMH batarya güç çıkış grafiği, d) NiMH batarya şarj durum grafiği

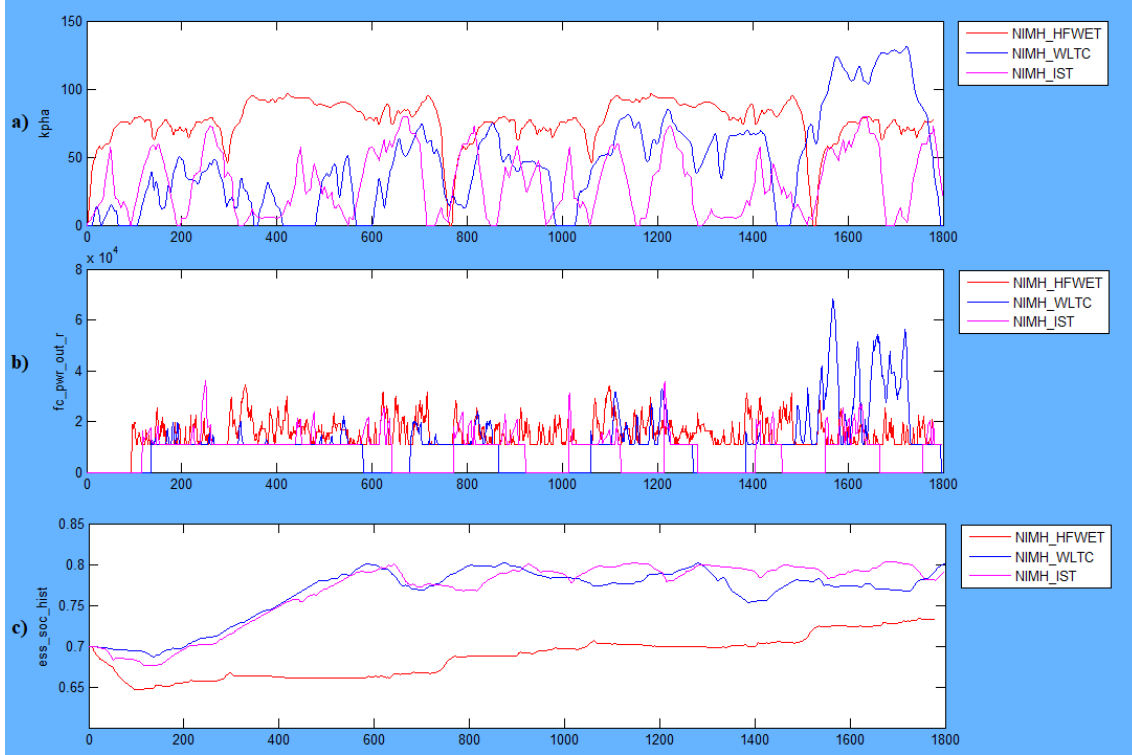
İstanbul sürüş çevriminde elde edilen verilere bakıldığında, yakıt hücresinin güç çıkışı (b), aracın hızlanma anlarında güç artışıyla yakıt hücresinin hızla yanıt verdiğini, trafikte duraklamalar sırasında ise güç çıkışının düştüğünü gösteriyor. Batarya güç çıkışı (c), özellikle hız düşüşleri sırasında negatif değerlere sahip, bu da aracın enerjisini bataryaya geri yüklediği rejeneratif frenlemenin aktif olduğunu işaret ediyor. Bu durumlar, bataryanın şarj durumu (d) grafiğinde, hız düşüşlerine bağlı olarak SoC'nin yükseldiğini ve dolayısıyla enerjinin geri kazanıldığını doğruluyor. Genel olarak bu veriler, İstanbul sürüş çevrimindeki tipik dur-kalk dinamiklerine uyum sağlayan bir enerji yönetim sistemine işaret ediyor ve aracın hem yakıt hücresinden hem de bataryadan gelen gücü etkili bir şekilde kullanarak enerji verimliliğini optimize ettiğini gösteriyor.



Şekil 5.25. a) HFWET ve WLTC sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkış grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre NiMH batarya şarj grafiği

Şekil 5.25'deki verilere göre; HFWET çevriminde aracın hız profili daha yüksek ve stabil olduğu için, yakıt hücresinden çekilen güç genellikle düşük ve az dalgalıdır; buna karşılık WLTC çevriminde, hızın daha değişken olması güç talebinin artmasına ve daha fazla dalgalanmaya neden olmuştur. Bu durum, WLTC'de güç çıkışının zaman zaman HFWET'e göre daha yüksek zirvelere ulaştığını gösterir. Özellikle ani hızlanma ve yavaşlamalar, WLTC çevriminde güç tüketimini artıran ana faktörlerden biridir. Buna ek olarak, WLTC çevrimindeki bu dalgalanmalar, bataryanın ve enerji yönetim sisteminin daha aktif bir şekilde çalışmasına neden olur.

SoC seviyeleri açısından, HFWET çevrimi sırasında daha stabil bir artış görülürken, WLTC çevriminde daha dalgalı bir artış grafiği mevcuttur. Bu, WLTC'nin değişken hız koşullarında rejeneratif frenleme sayesinde daha fazla enerji geri kazanımı sağlandığını ve SoC'nin artış hızının bu çevrimde daha belirgin olduğunu ortaya koyar. Ayrıca, WLTC çevriminde rejeneratif frenlemenin daha etkin kullanılması, enerji verimliliğini artırarak batarya ömrünü olumlu yönde etkileyebilir. Bu farklılıklar, iki çevrim arasındaki hız ve güç profillerinin enerji yönetim stratejileri üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir.



Şekil 5.26. a) HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrim grafiği, b) Sürüş çevrimlerine göre PEM yakıt hücresi güç çıkışı grafiği c) Sürüş çevrimlerine göre NiMH batarya şarj grafiği

Şekil 5.26'daki grafikler, NiMH bataryalı bir yakıt hücreli aracın HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrimlerindeki performansını gösterir. WLTC ve İstanbul çevrimleri, şehir içi ve dışı trafik koşullarını simüle ederek sık dur-kalklar içerir, bu nedenle her iki çevrimde de SoC profilleri birbirine benzer seyir gösterir. İstanbul çevriminde, WLTC'ye benzer şekilde sık dur-kalklar rejeneratif frenlemenin daha etkin kullanımını sağlar, fakat İstanbul çevrimi daha düşük hızlarla sınırlı olduğu için WLTC'deki gibi yüksek güç çıkışlarına ulaşamaz. HWFET çevrimi ise, daha sabit ve yüksek hızlara sahip olduğundan, güç çıkışı daha düşük ve stabil kalır. SoC artışı bu çevrimde daha yavaş gerçekleşir, çünkü rejeneratif frenleme fırsatları azdır.

Tablo 5.15. NiMH batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın yakıt tüketimi değerleri

Sürüş Çevrimi	Yakıt Tüketimi	
	L/100km	Benzin Eşdeğeri
HWFET	58,5	4
WLTC	75,8	5,1
İSTANBUL	80,3	5,4

Tablo 5.15, farklı sürüş çevrimlerine bağlı benzin eşdeğer tüketim değerlerini sunmaktadır. HWFET çevriminde, araç en düşük benzin eşdeğeri tüketimi olan 4 L/100km'yi kaydetmiş, bu durum genellikle düz ve sabit hızlı karayolu sürüş koşullarında gözlenen yüksek verimliliği işaret ediyor. WLTC çevriminde benzin eşdeğeri tüketimi biraz artarak 4,6 L/100km'ye çıkıyor; bu, aracın daha çeşitli ve değişken hız profillerini içeren şehir içi ve dışı koşullarında test edildiğini yansıtıyor. İstanbul çevrimi ise en yüksek benzin eşdeğeri tüketimi olan 5,4L/100km ile sık dur-kalk ve düşük hızlarla karakterize edilen şehir içi trafiğin aracın verimliliği üzerindeki etkisini ortaya koyuyor. Bu değerler, daha yoğun trafik ve değişken sürüş koşullarının aracın enerji tüketimini artırdığını gösteriyor.

#### 5.3.4. Aynı Sürüş Çevrimlerinde Farklı Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Hibrit Elektrikli Araçların Karşılaştırmalı Analizi

Önceki bölümlerde, belirli bir batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın performansı, çeşitli sürüş çevrimlerine göre analiz edilmiş ve bir değerlendirme sunulmuştur. Bu bölümde ise, farklı bir batarya grubuna sahip yakıt hücreli bir aracın tek bir sürüş çevrimi üzerinden performans analizleri gerçekleştirilecektir.

Öncelikle, farklı batarya gruplarına sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli araçların performans özellikleri, özellikle hızlanma, eğim üstesinden gelme kapasitesi ve maksimum hız gibi kritik parametreler üzerinden değerlendirme yapılacaktır.

Tablo 5.16. Farklı batarya gruplarına sahip yakıt hücreli araçların performans özellikleri

Araç Türü Performans İndikatörleri	Li-Ion Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Araç	Pb-Asit Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Araç	NiMH Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Araç
Maksimum Hız ( $V_m$ )	156,8 km/sa	157,5 km/sa	157,6 km/sa
Hızlanma Süresi (0-100 km/sa) ( $t$ )	7,8 sn	14,7 sn	13,7 sn
Maksimum Tırmanma Kabiliyeti ( $i$ )	%23,6	%23,6	%23,6

Tablo 5.16'ya göre maksimum hızlar arasındaki farklar oldukça az olup, her üç batarya tipi de benzer üst hız değerlerine ulaşabilmektedir. Bu, batarya tipinin maksimum hıza göreceli olarak az etki ettiğini gösterir.

Hızlanma sürelerinde Li-Ion bataryalı araç açık bir üstünlük gösterirken, Pb-Asit ve NiMH bataryalı araçlar daha yavaş hızlanır. Bu, Li-Ion bataryaların daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha hızlı güç salınımına sahip olduğunu, bu da aracın daha çabuk ivmelendirilmesini sağladığını işaret eder.

Maksimum tırmanma kabiliyeti verilerinde görülen eşitlik (%23,6), farklı batarya gruplarının bu performans parametresi üzerinde bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bu durum, eğim testlerinin yalnızca yakıt hücresinin aktif olduğu bir durumda gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Eğim testleri sırasında bataryalar devre dışı bırakılır ve sadece yakıt hücresi sisteminden gelen güç kullanılır. Bu sebeple, eğim kabiliyeti ölçümleri batarya türünden bağımsız olup, aracın bu kapasitesi yakıt hücresinin verimliliği ve motor gücü gibi diğer faktörlere bağlıdır.

Ayrıca HWFET, WLTC ve İstanbul sürüş çevrimlerinde farklı batarya türlerine sahip yakıt hücreli hibrit elektrikli araçların yakıt tüketimi performansları incelenmiştir. Analiz sürecinde, her bir sürüş çevrimi ve batarya kombinasyonu için yakıt tüketimi, benzin eşdeğeri değerleri üzerinden değerlendirilmiştir ve bu veriler Tablo 5.17’de verilmiştir.

Tablo 5.17. Farklı batarya gruplarına sahip yakıt hücreli araçların sürüş çevrimine göre yakıt tüketimi karşılaştırması

<b>Araç Türü</b>	<b>Li-Ion Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Araç</b>	<b>Pb-Asit Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Araç</b>	<b>NiMH Batarya Grubuna Sahip Yakıt Hücreli Araç</b>
<b>Sürüş Çevrimi</b>			
<b>HWFET</b>	4 L/100km	3,8 L/100km	4 L/100km
<b>WLTC</b>	5,1 L/100km	5,4 L/100km	5,1 L/100km
<b>İSTANBUL</b>	5,2 L/100km	5,9 L/100km	5,4 L/100km

Lityum iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğuna ve iyi bir şarj tutma kapasitesine sahip olduğundan, tüm sürüş çevrimlerinde nispeten düşük yakıt tüketimi sunar. WLTC ve İstanbul çevrimlerinde, değişken sürüş koşulları ve sık dur-kalklar sebebiyle tüketim artışı gözlenirken, yine de diğer batarya türlerine göre daha düşük tüketim değerleri sergiler.

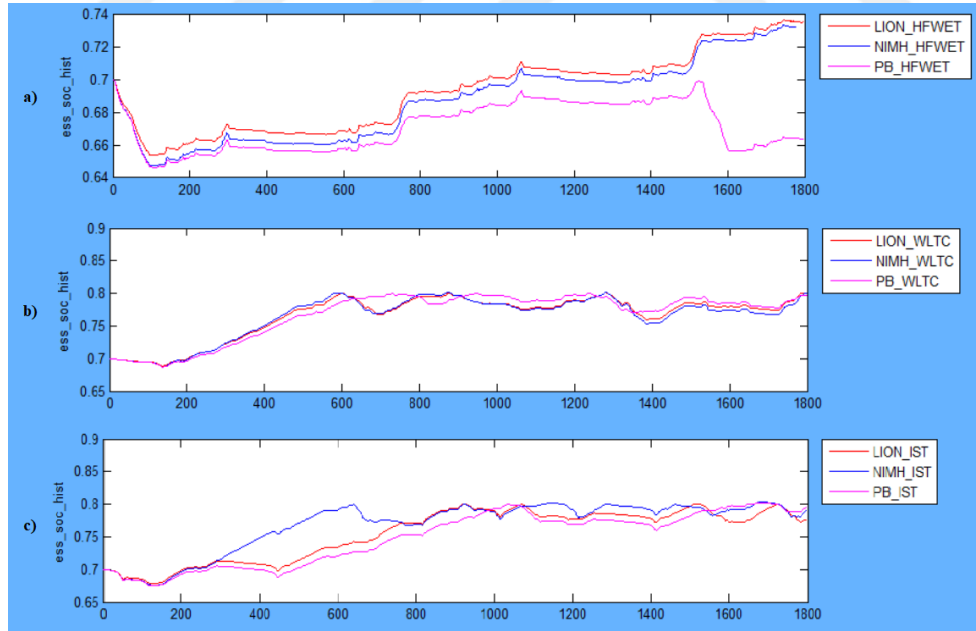
Kurşun asit bataryalar düşük maliyetli olmasına rağmen ağır ve düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. HWFET çevriminde en düşük tüketim değerini sergilese de, WLTC ve özellikle İstanbul çevrimlerinde tüketim değerleri önemli ölçüde yükselir. Bu, şehir içi trafiğin

yoğun olduğu durumların ve sık dur-kalkların batarya üzerindeki yükü artırarak tüketimi yükselttiğini gösterir.

NiMH bataryalar, iyi bir enerji yoğunluğu ve maliyet etkinliği sunarak, özellikle WLTC çevriminde Li-Ion bataryalara yakın performans sergiler. İstanbul çevrimindeki performansı ise kurşun asit bataryalı araca göre daha iyi ancak Li-Ion bataryalı araçtan daha kötüdür.

Sonuç olarak, sürüş çevrimlerinin bataryalar üzerindeki etkisi farklılık göstermektedir ve her batarya tipinin karakteristik özellikleri bu performans farklarını belirlemektedir. WLTC ve İstanbul çevrimleri, sürüş koşullarının daha zorlu olduğu ve bataryaların performansını daha fazla zorladığı durumlar sunarken, HWFET çevrimi daha düzgün ve sabit hızlı sürüş koşullarını temsil eder, bu da genellikle daha düşük yakıt tüketimi ile sonuçlanır.

Son olarak aynı sürüş çevrimlerindeki araçların, batarya SoC durumlarını karşılaştırmamız gerekirse Şekil 5.27 incelenmelidir.



Şekil 5.27. a) HWFET sürüş döngüsü SoC durumları, b) WLTC sürüş döngüsü SoC durumları c) İstanbul sürüş döngüsü SoC durumları

Bu kapsamda genel bir değerlendirme yapmak gerekirse; her üç batarya teknolojisi de farklı sürüş çevrimlerinde etkileyici bir şekilde performans sergilemiş, özellikle

rejeneratif frenleme potansiyeli açısından WLTC ve İstanbul çevrimlerinde benzer ve yüksek performanslar göstermiştir. Li-Ion bataryalar, genel olarak en yüksek SoC artışını sergileyerek enerji geri kazanımında biraz daha üstün olduklarını kanıtlamıştır. NiMH ve Pb-Asit bataryalar da yakın performanslar sergileyerek, modern yakıt hücreli araçlar için uygun alternatifler olduklarını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, sürüş koşullarının ve çevrim profillerinin, batarya teknolojilerinin seçimi ve araç tasarım stratejileri üzerindeki etkisini daha iyi anlamamıza yardımcı olur.

### **5.3.5. PEM Yakıt Hücresi Yakıt Türüne Göre Performans Karşılaştırması**

Tezin bu bölümünde, yakıt hücreli aracın farklı yakıt kaynakları kullanımının çeşitli performans metrikleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Araştırma, PEM yakıt hücresinin doğrudan hidrojen ile beslenmesi ve benzinden hidrojen üretimi ile beslenmesi durumlarını ele alacaktır. Bu bölümde, her iki senaryo için yakıt tüketimi değerlerinin yanı sıra atılan gazın sıcaklığı, yakıt hücresi çıkış verimi ve yakıt hücresi sıcaklığı gibi kritik performans göstergeleri detaylı bir şekilde karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırmalar, her yakıt tipinin enerji verimliliği, çevresel etkiler ve sistem performansı üzerindeki doğrudan etkilerini ortaya koyarak, yakıt hücreli araç sistemlerinin optimizasyonu için önemli bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

ADVISOR simülasyon programında, benzinden üretilen hidrojeni kullanan bir yakıt hücreli hibrit aracın analizini gerçekleştirmek amacıyla, araç konfigürasyon sayfasındaki “Fuel Converter” bölümünden “FC\_ANL50GAS” seçeneği tercih edilmelidir. Bu seçim, benzinden hidrojen üreten bir sistemle çalışacak aracın performansını ve yakıt tüketimini değerlendirmek için gerekli yapılandırmayı sağlar.

Bu analizin yalnızca WLTC sürüş çevriminde Li-Ion batarya grubuna sahip yakıt hücreli araç ile yapılması uygun bulunmuştur. Bu tercihin sebebi, farklı batarya gruplarına sahip yakıt hücreli araçların benzer sonuçlar göstermesi ve asıl odak noktasının yakıt tipi değişikliğinin yakıt hücresi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi olmasıdır. Ayrıca WLTC, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek hız bantlarını içeren dört farklı bölümden oluşur; bu da çeşitli sürüş koşullarında aracın karşılaştırılmak istenilen değerlerini daha gerçekçi bir şekilde ölçmeyi sağlamasıdır. Şehir içi ve şehir dışı koşulları simüle ederek, aracın farklı hız ve durma sürelerine yanıtını etkili bir şekilde değerlendirir. Bu çeşitlilik, araştırmada

ele alınan hidrojen ve benzinden elde edilen hidrojenle çalışan yakıt hücrelerinin performansını kapsamlı bir şekilde analiz etmek ve karşılaştırmak için zengin bir veri seti sunar.

Tablo 5.18. WLTC sürüş çevriminde farklı yakıt tipi kullanılarak yapılan analiz sonuçları

Araç Tipi	Yakıt H. ve Li-Ion	
	H <sub>2</sub>	Benzin
Atılan gazın termal gücü (W)	1800	3100
Atılan gazın sıcaklığı (°C)	110	570
Yakıt hücresi çıkış verimi (%)	55	38
Yakıt hücresi sıcaklığı (°C)	95	115

Tablo 5.18’de sunulan verilere göre, saf hidrojen kullanıldığında, atılan gazın termal gücü 1800 Watt iken benzinden elde edilen hidrojen kullanıldığında bu değer 3100 Watt'a çıkmaktadır. Bu, benzinden elde edilen hidrojenin daha fazla termal enerji ürettiğini ve bu durumun motorun daha sıcak çalışmasına neden olduğunu gösterir. Ayrıca, atılan gazın sıcaklığı hidrojen kullanımında 110°C iken, benzinden elde edilen hidrojen kullanımında 570°C'ye kadar yükselmektedir; bu da benzinden elde edilen hidrojenin yanma sırasında çok daha yüksek sıcaklıklara ulaştığını ve termal yönetim zorluklarını artırdığını işaret eder.

Yakıt hücresi çıkış verimi açısından, hidrojenle çalışan sistem %55 verimlilik gösterirken, benzinden elde edilen hidrojenle bu oran %38'e düşmektedir. Daha düşük verimlilik, benzinden elde edilen hidrojenin enerji dönüşümünde saf hidrojene göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yakıt hücresinin operasyonel sıcaklığı da hidrojen kullanımında 95°C iken benzinden hidrojenle 115°C olarak ölçülmüş, bu da benzinden elde edilen hidrojenin kullanımının soğutma ihtiyaçlarını artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, saf hidrojenin, benzinden elde edilen hidrojenle karşılaştırıldığında, yakıt hücresi sistemlerinin entegrasyonu için daha verimli ve daha

düşük termal yüklerle çalıştığını ortaya koymaktadır. Bu farklılıklar, tasarım, operasyonel verimlilik ve maliyet açısından önemli etkiler oluşturabilir.

Tablo 5.19. WLTC sürüş çevriminde farklı yakıt tipi kullanılarak yapılan analizin yakıt tüketimi karşılaştırması

Araç Tipi	Yakıt H. ve Li-Ion	
Yakıt Tipi	H <sub>2</sub>	Benzin
Yakıt Tüketimi (L/100)	75,6	7
Benzin Karşılığı	5,1	7

Tablo 5.19'da sunulan verilere göre, benzinden elde edilen hidrojen kullanımı, saf hidrojen kullanımına kıyasla belirgin bir şekilde daha fazla yakıt tüketimi göstermektedir. Benzinden hidrojen üretimi, saf hidrojen kullanımından daha fazla yakıt tüketilmesine yol açar çünkü reforming işlemi ek enerji gerektirir ve bu enerji hidrojen üretimi için kullanılan benzin miktarını artırır. Dolayısıyla, benzinden elde edilen hidrojen kullanımı, saf hidrojen kullanımına göre daha az verimli olabilir. Bu durum, özellikle yakıt maliyeti ve çevresel etki açısından değerlendirildiğinde, araç tasarımcıları ve mühendisler için önemli bir dikkat noktasıdır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

ADVISOR programı, araç simülasyonları için kullanılan ve elektrikli araçlar, hibrit araçlar ve yakıt hücreli araçlar gibi çeşitli araç türlerini modelleyebilen bir yazılımdır. Bu program, araç tasarım parametrelerinin modifikasyonunu kolaylaştırarak, farklı araç türlerinin performans, enerji tüketimi ve emisyon seviyeleri gibi kritik faktörlerin değerlendirilmesine olanak tanınması nedeniyle yakıt hücreli ve bataryalı araç analizi için tercih edilmiştir.

Analizler, yakıt hücreli aracın performans gereksinimlerinin detaylı bir şekilde belirlenmesiyle başlamıştır. Bu gereksinimlere uygun olarak yapılan hesaplamalar sonucunda, aracın yakıt hücresi gücü, batarya gücü ve motor gücü gibi kritik parametreler titizlikle hesaplanmıştır. Batarya seçimi için, hibrit taşıtlarda yaygın olarak kullanılan üç farklı batarya modeli; lityum iyon, kurşun asit ve nikel metal hidrür bataryalar seçilmiştir.

Araç performans analizi, çeşitlilik gösteren sürüş koşullarını temsil edebilmek adına üç farklı sürüş çevrimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. WLTC, HWFET ve özgün olarak oluşturulan İstanbul sürüş çevrimi olmuştur. Bu çeşitlendirilmiş çevrimler sayesinde, aracın performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Lityum iyon batarya grubuna sahip yakıt hücreli hibrit aracın performans analizi sonucu, 0-100 km/sa hızlanma süresinin 7,8 saniye, maksimum hızının 156,8 km/sa ve eğim çıkma kabiliyetinin %23,6 olduğunu ve bu sonuçların aracın performans kriterlerini başarıyla karşıladığını göstermiştir. Yakıt tüketimi verileri, HWFET çevriminde 4L/100km, WLTC'de 5,1L/100km ve İstanbul çevriminde 5,2L/100km olarak ölçülmüştür. Aracın otoyol sürüşünde daha az yakıt tükettiği, ancak şehir içi yoğun trafik ve dur-kalklar nedeniyle WLTC ve İstanbul çevrimlerinde yakıt tüketiminin arttığı gözlenmiştir. HWFET çevriminde düşük rejeneratif frenleme imkânı, şarj oranlarının diğer çevrimlere göre kısıtlı kalmasına neden olmuştur. Ayrıca, farklı batarya gruplarına sahip diğer araçlar da performans gereksinimlerini karşılamış ve sürüş çevrimlerine göre yakıt tüketimi değerlerinde benzer farklılıklar gözlemlenmiştir. Üç sürüş çevrimi boyunca yakıt hücresi-batarya ve elektrikli motor kombinasyonunun egzoz emisyonu sıfır olarak ölçülmüştür, bu da sistemlerin çalışması sırasında herhangi bir egzoz gazı üretmediğini kanıtlamıştır.

Maksimum tırmanma kabiliyeti verilerindeki eşitlik (%23.6), farklı batarya gruplarının bu performans parametresi üzerinde etkisinin olmadığını göstermiştir. Hızlanma süreleri açısından lityum iyon bataryalı araçların açık bir üstünlük sergilemesi, bu bataryaların daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha hızlı güç salım kapasitesine sahip olduğuna işaret etmiştir. Maksimum hızlar arasındaki farklar ise oldukça sınırlı kalmış; her üç batarya tipi de benzer maksimum hız değerlerine ulaşmıştır. Bu durum, batarya tipinin maksimum hız üzerinde az bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Yakıt tüketimi verilerine göre; lityum iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve iyi şarj tutma kapasitesi sayesinde, tüm sürüş çevrimlerinde düşük yakıt tüketimi sağlamıştır. WLTC ve İstanbul çevrimlerinde değişken sürüş koşulları ve sık dur-kalklar nedeniyle tüketim artsa da, diğer batarya türlerine kıyasla daha düşük kalmıştır. Kurşun asit bataryalar, düşük maliyet avantajına rağmen, ağırlığı ve düşük enerji yoğunluğu nedeniyle özellikle şehir içi çevrimlerde yüksek tüketim göstermiştir. NiMH bataryalar ise; WLTC'de lityum iyon bataryalara yakın, İstanbul çevriminde ise kurşun asit bataryalardan daha iyi performans sergilemiştir.

Yakıt hücreli araçların yakıt tipi karşılaştırması sonucu, saf hidrojen kullanımının benzinden elde edilen hidrojene göre daha düşük termal yükler ve daha yüksek verimlilik sağladığı görülmüştür. Saf hidrojen kullanıldığında termal güç 1800 Watt iken, benzinden elde edilen hidrojenle 3100 Watt'a yükselmekte ve çıkış gazının sıcaklığı 570°C'ye çıkmıştır. Ayrıca, hidrojenle çalışan sistemler %55 verimlilik sunarken, benzinden elde edilen hidrojen %38 verimlilik göstermiştir. Ayrıca benzinden hidrojen üretiminin, saf hidrojen kullanımına göre daha yüksek yakıt tüketimine yol açtığı görülmüştür.

Bu çalışma, yakıt hücreli araçların tasarımı ve enerji yönetimi stratejileri üzerine değerli bilgiler sunulmakta ve özellikle yakıt hücre teknolojisini kullanarak daha verimli ve çevre dostu araçlar tasarlamak için önemli referanslar sağlamaktadır. Araştırma sonuçları, otomotiv endüstrisinde yakıt hücreli araçların tasarımı ve geliştirilmesine doğrudan katkıda bulunabilir. Araştırmanın devamında, farklı iklim koşullarında ve uzun süreli test döngülerinde genişletilmiş bir veri seti ile benzer testler önerilmekte, ayrıca farklı yakıt hücresi ve batarya kombinasyonlarının ekonomik analizleri yapılabilir. Bu, maliyet-etkinlik açısından optimal sistem konfigürasyonlarının belirlenmesine olanak tanıyacaktır.

## KAYNAKLAR

- Alcazar-Garcia, D., Martines, J.L.R. (2022). Model-Based Design Validation and Optimization of Drive Systems in Electric, Hybrid, Plug-in Hybrid and Fuel Cell Vehicles. *Energy*, 254, 123719. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123719.
- Amaç, E.A., Şahin, Y.G., Aras, F. (2016). ADVISOR ile Otomotiv Elektrik Sistemlerinin Benzetişimi ve Analizi.
- Arıkan, F.R. (2019). Sizing of a Series Hybrid Electric Vehicle. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 603639.
- Buzunov, N.V., Emelyanov, M.A., Gazizullin, R.L., Kartashov, A.B., Murashov, M.V. (2023). Sampling of a Driving Cycle For E-trucks With a Mechatronic Transmission. *XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023)*, Moskova, 13 Ekim 2023.
- Chiver, O., Neamt, L., Barz, C. (2022). Analysis of The Performances of Battery Electric Vehicles Using ADVISOR. *International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959829.
- Diñç, C. (2013). Methodology Development for The Construction of A Driving Cycle in order to Determine The Exhaust Emissions of Road Vehicles. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 333028.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., Ebrahimi, K.M. (2021). *Modern Elektrikli, Hibrit Elektrikli ve Yakıt Hücreli Taşıtlar* (3), Vadi Matbaacılık, Ankara: Akademisyen Kitabevi.
- Gautam, P.K., Arya, A., Kumar, S., Mitra, U., Mehroliya, S., Gupta, S. (2021). Modelling And Simulating Performance Of Hybrid Electric Vehicle Using ADVISOR 2.0. *IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. DOI: 10.1109/GUCON50781.2021.9573552.
- Gupta, S., Perveen, R. (2023). Fuel Cell in Electric Vehicle. *Materials Today: Proceeding* 79(2), 434-437. DOI: 10.1016/j.maypr.2023.02.039.
- Kalaiarasi, A., Prasad, R., Prasath, R.S. (2022). Performance Analysis of Fuel cell Powered Electric Vehicle Using MATLAB. *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. DOI: 10.1109/ICCCI54379.2022.9741060.
- Karaoğlan, M.U., Kurulay, N.S., Topaç, M.M. (2014). Yakıt Hücreli (PEM) Araçların Tasarım Esasları ve Şehir içi Test Çevrimine Göre Simülasyonu. *7.Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, 26-27 Mayıs 2014.

- Kartal, M.R., Çetin, E., Daldaban, F. (2018). Sürüş Çevrimlerinin Batarya Tüketimi, Emisyon ve Batarya Durumu Faktörleri Bazında Karşılaştırılması. *9<sup>th</sup> International Automotive Technologies Congress*, Bursa, 7-8 Mayıs 2018.
- Koteswara, V., Srinivasulu, G., Rahul, J., Velisala, V. (2023). Optimal Component Sizing and Performance of Fuel Cell-Battery Powered Vehicle Over World Harmonized and New European Driving Cycles. *Energy Conversion and Management*, 300. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117992.
- Kunt, M.A. (2019). ADVISOR Based Modelling of the Effect of Rolling Resistance on Regenerative Braking in All-Electric Passenger Cars. *ECJSE*, 6 (3), 847-855. DOI: 10.31202/ecjse.603421.
- Kunt, M.A. (2022). Investigation of the Effect of Movement Resistances on Battery Performance of a Passenger-Type Fuel Cell Vehicle Using ADVISOR Software. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 9 (1), 189-202. DOI: 10.31202/ecjse.956474.
- Kuşdoğan, Ş., Özen, B. (2021). ADVISOR Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi. *Engineer and Machinery*, 62 (705), 637-653. DOI: 10.46399/muhendismakina.1034322.
- Liang, J., Wu, Z. (2015). A Study of the Performance of PEMFC Hybrid Vehicle Using ADVISOR. *International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling*.
- Markel, T., Brooker, A., Hendricks, T., Johnson, V., Kelly, K., Kramer, B., O'Keefe, M., Sprik, S., Wipke K. (2002). ADVISOR: A Systems Analysis Tool For Advanced Vehicle Modeling. *Journal of Power Sources*, 110, 255-266.
- Mitra, U., Arya, A., Gupta, S., Gupta, A.K. (2022). A Brief Overview on Fuel Cell Electric Vehicles. *2022 International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences (ICETEMS)*, Nagpur, Hindistan, 18-19 Kasım 2022.
- Mitra, U., Arya, A., Khan, A., Javara, N., Gawre, S.K., Arya, M. (2023). Simulation and Performance Analysis of a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle. *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. DOI: 10.1109/SCEECS57921.2023.10061819.
- Muthukumar, M., Rengarajan, N., Velliyangiri, B., Omprakas, M.A., Rohit, C.B., Raja, U.K. (2021). The Development of Fuel Cell Electric Vehicles. *Materials Today: Proceedings* 45, 1181-1187. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.679.
- Ogburn, M., Nelson, D., Wipke, K., and Markel, T. (2000). Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybrid Vehicle. *SAE Technical Paper*, 2000-01-1566. DOI: 10.4271/2000-01-1566.

- Olabi, A.G., Abdelkareem, M.A., Wilberforce, T., Alkhalidi, A., Salameh, T., Abokhalil, A.G., Hassan, M.M., Sayed, E.T. (2022). Battery Electric Vehicles: Progress, Power Electronic Converters, Strength (S), Weakness (W), Opportunity (O), and Threats (T). *International Journal of Thermofluids*, 16, 100212. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100212.
- Olabi, A.G., Abdelkareem, M.A., Wilberforce, T., Alami, A.H., Alkhalidi, A., Hassan, M.M., Sayed, E.T. (2023). Strength, Weakness, Opportunities, and Threats (SWOT) Analysis of Fuel Cells in Electric Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (60), 23185-23211. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.090.
- Oussama, A., Makram, K., Chokri, B.S. (2022). Modeling, Simulation and Analysis of BEV and FCEV Using Matlab/Simulink. *IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)*. DOI: 10.1109/SETIT54465.2022.9875536.
- Özen, B. (2021). ADVISOR Programıyla Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Batarya Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 701973.
- Pramuanjaroenkij, A., Kakaç, S. (2022). The Fuel Cell Electric Vehicles: The Highlight Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(25), 9401-9425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.103.
- Rashid, M.I.M., Danial, H. (2017). ADVISOR Simulation and Performance Test of Split Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conversion. *Energy Procedia*, 105, 1408-1413. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.524.
- Reddy, J.K., Natarajan, S. (2018). Energy Sources and Multi-Input DC-DC Converters Used in Hybrid Electric Vehicle Applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 17387-17408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.076>.
- Rusu, F.A., Baci, A.G., Livint, G. (2018). Applicability of Fuel Cell in Electric Vehicles. *10th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE2018)*, Iasi, Romania, 18-19 Ekim 2018.
- Same, A., Stipe, A., Grossman, D., Park, J.W. (2010). A Study on Optimization of Hybrid Drive Train Using Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR). *Journal of Power Sources*, 195 (19), 6954-6963. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.03.057.
- Tong, G., Qi, Y. (2022). Dynamic Performance Simulation Analysis of Fuel Cell Vehicle Based on ADVISOR, *2022 International Conference on Applied Physics and Computing (ICAPC)*, DOI: 10.1109/ICAPC57304.2022.00086.
- Tronstad, T., Astrand, H.H., Haugom, G.P., Langfeldt, L. (2017). Study on the Use of Fuel Cells in Shipping. *DNV GL*.

- Türkmen, A.C., Solmaz, S., Çelik, C., Saraç, H.İ. (2017). Analysis of Fuel Cell Vehicles with ADVISOR Software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1066-1071. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.011.
- URL-1: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php#intro>, (Ziyaret tarihi: 23 Nisan 2024).
- URL-2: [https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide\\_Harmonised\\_Light\\_Vehicles\\_Test\\_Procedure](https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure), (Ziyaret Tarihi: 23 Nisan 2024).
- URL-3: <https://dieselnet.com/standards/cycles/HWFET.php>, (Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2024).
- Verma, S., Mishra, S., Gaur, A., Chowdhury, S., Mohapatra, S., Dwivedi, G., Verma, P. (2021). A Comprehensive Review on Energy Storage in Hybrid Electric Vehicle. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 8(5), 621-637, DOI: 10.1016/j.jtte.2021.09.001.
- Wang, W., Qu, F., Li, W., Wang, G., Zeng, F. (2021). Modeling and Simulation Analysis of a Typical Fuel Cell Vehicle. *IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. DOI: 10.1109/ITNEC52019.2021.9587080.
- Wipke, K., Cuddy, M., Bharathan, D., Burch, S., Johnson, V., Markel, A., Sprik, S. (1999). ADVISOR 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for Systems Analysis. *National Renewable Energy Laboratory*, TP-540-25928.
- Wipke, K.B., Cuddy, M.R., Burch, S.D. (1999). ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48 (6).
- Wipke, K., Markel, T., Haraldsson, K., Kelly, K., Vlahinos, A. (2003). Fuel Cell Vehicle Systems Analysis. *Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies*.
- Yaich, M., Hachicha, M.R., Moez, G. (2015). Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles for Recreational Vehicle. *16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering - STA 2015*.
- Zhou, Y.L. (2007). Modeling and Simulation of Hybrid Electric Vehicles. Yüksek Lisans Tezi, Victoria Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Victoria.
- Zhou, M., Zhao, L., Zhang, Y., Gao, Z., Pei, R. (2015). Pure Electric Vehicle Power-Train Parameters Matching Based on Vehicle Performance. *International Journal of Control and Automation*, 8 (9), 53-62. DOI: 10.14257/ijca.2015.8.9.06

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Akça, D.**, Kuşdoğan, Ş. (2023). Batarya-Yakıt Hücresi Hibrit Sisteminin Gemilerde Kullanımı, *IMASCON 2023 Autumn Organizing Committee*, Kocaeli, 15-16 Aralık 2023.



## **ÖZGEÇMİŞ**

İlk, orta ve lise öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. 2013 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2021 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.

