



**KLASİK ARAÇ VE YAKIT PİLLİ ARACIN SÜRÜŞ
ÇEVİRİMLERİNE BAĞLI OLARAK YAKIT TÜKETİM
DEĞERLERİNİN HESABI VE KARŞILAŞTIRILMASI**

Merve TEKİN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KLASİK ARAÇ VE YAKIT PİLLİ ARACIN SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNE BAĞLI
OLARAK YAKIT TÜKETİM DEĞERLERİNİN HESABI VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

Merve TEKİN
ORCID: 0000-0003-2831-3175

Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL
ORCID: 0000-0001-5965-0313
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Merve TEKİN tarafından hazırlanan “KLASİK ARAÇ VE YAKIT PİLLİ ARACIN SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNE BAĞLI OLARAK YAKIT TÜKETİM DEĞERLERİNİN HESABI VE KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Başkan : Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL


ORCID: 0000-0001-5965-0313

Üye : Prof. Dr. Atakan AVCI

ORCID: -

Üye : Doç. Dr. Hakan GÖKDAĞ

ORCID:0000-0003-3070-6365


imza
imza
imza

Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

21.10.2019

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04/09/2019

Merve TEKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KLASİK ARAÇ VE YAKIT PİLLİ ARACIN SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNE BAĞLI OLARAK YAKIT TÜKETİM DEĞERLERİNİN HESABI VE KARŞILAŞTIRILMASI

Merve TEKİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Kirletici emisyonların sebep olduğu küresel ısınma ve artan dünya nüfusu ile birlikte fosil enerji kaynakları giderek azalmaktadır. Bu problem daha temiz, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı için çeşitli teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Ulaşım sektörünün küresel ısınmaya olan etkisini azaltmak ve enerji kullanımını daha verimli hale getirmek açısından elektrikli ve hibrit araçlar içten yanmalı motora sahip araçlara en iyi alternatiftir. Bataryalarla ya da yakıt pilleriyle çalışan tamamen elektrikli araçlar emisyon değerlerinin düşürülmesinde önemli derecede katkı sağlar. Yakıt pili ve hidrojen teknolojisinin gelişmesiyle alternatif taşıtlar arasında yakıt pilli elektrikli araçlar önem kazanmaya başlamıştır.

Bu tez çalışmasında aynı taşıt parametrelerine sahip yakıt pilli elektrikli araçların ve içten yanmalı motora sahip klasik araçların yakıt tüketimi değerlerinin karşılaştırılması ve yakıt pilli araç için rejeneratif frenleme ile geri kazanılabilecek enerji miktarının hesaplanması amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle MATLAB 2018b programında İçten Yanmalı Motorlu hafif ticari bir araç için geriye dönük taşıt modeli oluşturularak yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Ayrıca klasik araçlarda yakıt ekonomisini iyileştirmek amacıyla uygulanan yakıt kesme ve Dur&Kalk stratejileri ile yakıt tüketiminde sağlanan kazançlar da incelenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise aynı araç için bir yakıt pili kullanıldığında tüketilen hidrojen miktarı ve rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerji hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda iki araç için yakıt ve enerji tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Yakıt pilli aracın dizel eşdeğeri olarak tükettiği yakıt miktarının klasik aracın yakıt tüketiminden %32 daha az olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yakıt pilli araç, klasik araç, yakıt pili, yakıt tüketimi, hidrojen, rejeneratif frenleme
2019, ix + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

CALCULATION AND COMPARISON OF FUEL CONSUMPTION VALUES DEPENDING ON DRIVING CYCLES OF CONVENTIONAL VEHICLES AND FUEL CELL VEHICLES

Merve TEKİN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

The fossil energy resources are gradually decreasing with global warming caused by pollutant emissions and the increasing world population. This problem has required the development of various technologies for the use of cleaner, sustainable energy sources. In order to reduce the impact of the transport sector on global warming and make energy use more efficient, electric and hybrid vehicles are the best alternative to the internal combustion engine vehicles. Fully electric vehicles operating with batteries or fuel cells make a significant contribution to reducing emissions. With the development of fuel cell and hydrogen technology, fuel cell electric vehicles started to gain importance among alternative vehicles.

The aim of this thesis study is to compare the fuel consumption of fuel cell electric vehicles and conventional vehicles and to calculate the amount of energy recovered during recuperation. For this purpose, firstly, fuel consumption was calculated by creating backward vehicle model for a light commercial vehicle with internal combustion engine in MATLAB 2018b. In addition, the benefits of fuel cut-off and Start&Stop strategies which are applied for fuel economy in conventional vehicles were also examined. In the second part of the study, when a fuel cell was used for the same vehicle, the amount of hydrogen consumed and the energy recaptured during regenerative braking were calculated. At the end of the study, the amounts of fuel and energy consumed for both vehicle configuration were compared. According to the diesel equivalent, fuel consumption of fuel cell electric vehicle is less of 32% than that of the conventional vehicle.

Key words: Electric vehicles, conventional vehicles, fuel cell, fuel consumption, hydrogen, regenerative braking

2019, ix + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren sayın danışman hocam Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL'e teőekkürlerimi sunarım.

Yardımlarından dolayı Erkan TÜRKER'e, Kadir YILDIRIM'a ve Buğra AKSOP'a teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca manevi desteğini ve motivasyonunu esirgemeyen değerli arkadaőım Zeynep İnal'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, beni destekleyen ve bana inanan sevgili aileme teşekkür ederim. Dualarını hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli anneme ve babama ayrıca teşekkür ederim.

Merve TEKİN
04/09/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Elektrikli Araçlar.....	3
2.1.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar	5
2.1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar	6
2.1.2.1. Seri Hibrit Araçlar.....	6
2.1.2.2. Paralel Hibrit Araçlar	7
2.1.2.3. Hem Seri Hem Paralel Hibrit Araçlar	8
2.1.2.4. Kompleks Hibrit Araçlar	8
2.1.2.5. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar	9
2.2. Yakıt Pilleri	11
2.3. Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen	14
2.4. Rejeneratif Frenleme	16
2.4.1 Seri Rejeneratif Frenleme	17
2.4.2. Paralel Rejeneratif Frenleme.....	18
2.5. Sürüş Çevrimleri	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Taşıta Etki Eden Direnç Kuvvetleri	23
3.1.1. Yuvarlanma Direnci	23
3.1.2. Eğim Direnci	25
3.1.3. Aerodinamik Direnç Kuvveti.....	25
3.1.4. Atalet Kuvveti	26
3.1.5. Taşıt Hareket Denklemi	27
3.2. İçten Yanmalı Motora Sahip Bir Aracın Yakıt Tüketimi ve Emisyon Hesabı	28
3.3. Yakıt Pili Elektrikli Bir Aracın Yakıt Tüketimi Hesabı	30
3.3.1. Yakıt Pilinden Çekilen Güç ve Tüketilen Hidrojen Miktarı	30
3.3.2. Rejeneratif Frenleme Enerjisi	32
3.4. Model Girdileri.....	34
3.4.1. Sürüş Çevrimi	34
3.4.2. Çevresel Parametreler	36
3.4.3. Klasik Araca Ait Parametreler	37
3.4.4. Yakıt Pili Elektrikli Araca Ait Parametreler	39
3.5. Model Doğrulaması.....	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
4.1. Yuvarlanma Direnci Analizi	44
4.2. Aerodinamik Direnç Kuvveti Analizi	45
4.3. Atalet Kuvveti Analizi	45
4.4. Toplam Direnç Kuvveti Analizi.....	47

4.5. Tahrik Kuvveti ve Tahrik Gücü Analizi	47
4.6. İçten Yanmalı Motorun Çevrim Boyunca BMEP Değerinin Değişimi	50
4.7. Klasik Aracın Anlık ve Kümülatif Yakıt Tüketimi Değerleri	50
4.8. Klasik Aracın Yakıt Tüketimi Değerleri	54
4.9. Yakıt Pili Elektrikli Aracın Hidrojen Tüketimi ve Geri Kazanılan Enerji	55
5. SONUÇ	60
KAYNAKLAR	62
EK 1	64
EK 2	72
ÖZGEÇMİŞ	77



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	İvme (m/s^2)
A_f	Taşıtın ön yüzey alanı (m^2)
b _{mep}	Fren ortalama efektif basıncı (bar)
C_d	Taşıtın sürüklenme katsayısı (-)
D	Sürüş çevrimi mesafesi (km)
$E_{bat,g}$	Bataryaya giren enerji (kJ)
E_{rejen}	Rejeneratif frenleme enerjisi (kJ)
$E_{tekerlek,rejen}$	Bataryadan tekerleklere iletilen enerji (kJ)
F_0	Sabit yol yükü katsayısı (N)
F_1	Doğrusal yol yükü katsayısı (N/(km/h))
F_2	İkinci dereceden yol yükü katsayısı (N/(km/h) ²)
F_{aero}	Aerodinamik direnç kuvveti (N)
$F_{aero,x}$	Aerodinamik kaldırma kuvveti (N)
$F_{aero,y}$	Aerodinamik yanal kuvvet (N)
$F_{aero,z}$	Taşıta ters yönde etki eden aerodinamik kuvvet (N)
F_{atalet}	Atalet kuvveti (N)
$F_{coastdown}$	Coastdown kuvveti (N)
$F_{direnç}$	Direnç kuvveti (N)
$F_{eğim}$	Eğim direnç kuvveti (N)
f_f	Frenleme katsayısı
$f_{f,arka}$	Arka tekerleklerin frenleme katsayısı
$f_{f,ön}$	Ön tekerleklerin frenleme katsayısı
$f_{r,arka}$	Arka tekerleklerin yuvarlanma katsayısı
$f_{r,ön}$	Ön tekerleklerin yuvarlanma katsayısı
F_{tahrik}	Tahrik kuvveti (N)
$F_{yuvarlanma}$	Yuvarlanma direnci (N)
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
Gr	Yolun eğim açısı (°)
$H_{u,dizel}$	Dizel yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg)
$H_{u,H2}$	Hidrojenin ısıl değeri (kJ/kg)
i_d	Diferansiyel oranı (-)
i_v	Vites kutusu aktarma oranı (-)
J_m	Motorun polar atalet momenti (kgm^2)
J_p	Kardan mili polar atalet momenti (kgm^2)
J_t	Tekerleklerin polar atalet momenti (kgm^2)
k_{rej}	Geri kazanım katsayısı
m_{arka}	Arka akslara binen yük (kg)
m_{CO2}	Açığa çıkan CO ₂ miktarı (gr/km)
$m_{dizel,eşd.}$	Tüketilen yakıtın dizel eşdeğeri (lt/100 km)
m_{et}	Taşıtın etkin kütlesi (kg)
m_{H2}	Tüketilen hidrojen miktarı (kg)
M_m	Elektrik motoru momenti (Nm)
$m_{ön}$	Ön akslara binen yük (kg)

m_t	Taşıt ağırlığı (kg)
m_y	Yakıt tüketimi (lt/100 km)
\dot{m}	Anlık yakıt tüketimi (kg/h)
n	Motor devri (dev/dk)
$P_{bat,g}$	Bataryaya giren güç (kW)
$P_{bat,g}$	Bataryaya giren güç (kW)
P_e	Efektif güç (kW)
P_{fren}	Frenleme gücü (kW)
P_{tahrik}	Tahrik gücü (kW)
$P_{tekerlek,rejen}$	Bataryadan tekerleklere iletilen güç (kW)
$P_{yard. sist.}$	Yardımcı sistemler için harcanan güç (W)
P_{YP}	Yakıt pilinden çekilen güç (kW)
R_t	Tekerlek etkin yarıçapı (m)
v	Taşıt hızı (km/h)
V	Motor hacmi (lt)
v_r	Rüzgar hızı (km/h)
η	Aktarma organları verimi
$\eta_{DC/DC}$	DC/DC dönüştürücü verimi
$\eta_{M/J}$	Motor/jeneratör verimi
$\eta_{şarj}$	Batarya şarj verimi
η_{YP}	Yakıt pili verimi
μ	Yuvarlanma direnç katsayısı (-)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_{dizel}	Dizel yakıtın yoğunluğu (kg/lt)
$\rho_{yakıt}$	Yakıt yoğunluğu (kg/lt)
ω	Elektrik motorunun açısal hızı (rad/s)

Kısaltmalar Açıklama

ADVISOR	Advanced Vehicle Simulator
BEA	Bataryalı Elektrikli Araç
D&K	Dur&Kalk
DC	Doğru Akım
EM	Elektrik motoru
EUDC	Extra Urban Drive Cycle (Şehir Dışı Çevrim)
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
İYM	İçten Yanmalı Motor
NEDC	New European Driving Cycle (Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi)
PEM	Proton Geçirgenli Membran
SoC	Batarya şarj durumu
UDC	Urban Drive Cycle (Şehir İçi Çevrim)
WLTC	The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles
Y.K.	Yakıt Kesme
YHA	Yakıt Hücreli Araç
YP	Yakıt Pili

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elektrikli araçların sınıflandırılması	4
Şekil 2.2. Elektriksel çekiş sistemi türlerinin konvensiyonel çekiş sistemi ile yapısal karşılaştırması	4
Şekil 2.3. Bataryalı elektrikli aracın yapısı	5
Şekil 2.4. Elektriksel aktarma organları yapısı	5
Şekil 2.5. Seri hibrit elektrikli aracın yapısı.....	7
Şekil 2.6. Paralel hibrit elektrikli aracın mimarisi	8
Şekil 2.7. Hem seri hem paralel hibrit elektrikli araç topolojisi	8
Şekil 2.8. Kompleks hibrit elektrikli araç topolojisi	9
Şekil 2.9. Yakıt pilli elektrikli araç topolojisi	10
Şekil 2.10. Yakıt pilinin temel çalışma prensibi	11
Şekil 2.11. Farklı enerji dönüşüm teknolojilerinin enerji dönüşüm verimi bakımından karşılaştırılması	13
Şekil 2.12 Seri ve paralel rejeneratif frenleme stratejisi	19
Şekil 2.13. Farklı sürüş çevrimi örnekleri.....	21
Şekil 3.1. İleriye dönük ve geriye dönük taşıt modeli	22
Şekil 3.2. Taşıta etki eden direnç kuvvetleri.....	23
Şekil 3.3. Tekerleklerdeki frenleme kuvvetinin bataryalara aktarımı.....	33
Şekil 3.5. NEDC çevrimi boyunca zamana bağlı vites değişimi	36
Şekil 3.6. Taşıta ait dizel motorun özgül yakıt tüketim haritası.....	38
Şekil 3.7. Klasik araç için yakıt tüketimi ve emisyon değerleri hesabı akış şeması.....	39
Şekil 3.8. Modelde kullanılan elektrik motorunun verim haritası	41
Şekil 3.9. Modelde kullanılan yakıt pilinin verim haritası.....	41
Şekil 3.10. Yakıt pilli elektrikli aracın yakıt tüketimi akış şeması	42
Şekil 4.1. NEDC çevrimi boyunca yuvarlanma direncinin zamana bağlı değişimi.....	44
Şekil 4.2. NEDC çevrimi boyunca aerodinamik direnç kuvvetinin zamana bağlı değişimi	45
Şekil 4.3. NEDC çevrimi boyunca atalet kuvvetinin değişimi	46
Şekil 4.4. NEDC çevrimi boyunca toplam direnç kuvveti değişimi	47
Şekil 4.5. NEDC çevrimi boyunca tahrik kuvvetinin değişimi.....	48
Şekil 4.6. NEDC çevrimi boyunca tahrik gücünün değişimi	49
Şekil 4.7. NEDC çevrimi boyunca fren ortalama efektif basıncı (bmep)nın zamana bağlı değişimi	50
Şekil 4.8. Klasik aracın anlık yakıt tüketim değerleri.....	51
Şekil 4.9. Anlık yakıt tüketimi karşılaştırması.....	52
Şekil 4.10. Klasik araç için kümülatif yakıt tüketimi değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.11. Klasik aracın NEDC çevrimi boyunca özgül yakıt tüketim haritası üzerinde çalıştığı noktalar	54
Şekil 4.12. Yakıt pilli elektrikli aracın anlık hidrojen tüketimi	56
Şekil 4.13. Yakıt pilli elektrikli aracın kümülatif hidrojen tüketimi.....	57
Şekil 4.14. NEDC çevrimi boyunca elektrik motorunun çalışma noktaları.....	58
Şekil 4.15. NEDC çevrimi boyunca yakıt pilinin çalışma noktaları	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bataryalı, hibrit ve yakıt pilli elektrikli araçların karakteristikleri	10
Çizelge 2.2. Yakıt pilli türlerinin karşılaştırılması.....	12
Çizelge 3.1. NEDC çevrimi parametreleri	36
Çizelge 3.2. Çevresel parametreler	37
Çizelge 3.3. Klasik araca ait parametreler	37
Çizelge 3.4. Yakıt pilli elektrikli araca ait parametreler	40
Çizelge 3.5. Ford Taurus'a ait parametreler.....	43
Çizelge 4.1. Klasik aracın maksimum ve minimum kuvvet, güç ve enerji değerleri	49
Çizelge 4.2. Yakıt pilli elektrikli aracın maksimum ve minimum kuvvet, güç ve enerji değerleri.....	50
Çizelge 4.3. Modelleme sonuçları ile katalog değerlerinin karşılaştırması	54
Çizelge 4.4. Modellemede bulunan yakıt tüketimi ve CO ₂ emisyon değerleri	55
Çizelge 4.5. Klasik araç için yüzdesel yakıt kazancı	55
Çizelge 4.6. Frenleme enerjisinden geri kazanılan ve bataryada depolanan enerji değerleri	56
Çizelge 4.7. Yakıt pilli elektrikli aracın yakıt tüketim değerleri.....	59
Çizelge 5.1. Her iki araç için NEDC çevrimi boyunca harcanan ve kazanılan enerjilerin karşılaştırılması	60
Çizelge 5.2. Klasik ve yakıt pilli elektrikli araç arasındaki yakıt tüketimi değerlerinin karşılaştırılması	61

1. GİRİŞ

Elektrikli araçların icadı 1834 yılında İtten Yanmalı Motorlu (İYM) araçlardan önce gerçekleşmiştir. Ancak bataryaların performanslarının düşük olmasına karşın İYM teknolojisinin sürekli gelişmesi, fosil yakıtların bol ve ekonomik olmasının yanı sıra yüksek enerji ve güç yoğunluğu sağlaması elektrikli araçların İYM'li araçların gerisinde kalmasına sebep olmuştur. 1970 yılında yaşanan dünya enerji krizi elektrikli araçların tekrar gündeme gelmesine sebep olmuştur (de Lucena 2011). ABD, Rusya, Çin gibi petrol kaynaklarını en çok tüketen ülkeler enerjide dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla batarya ve elektrikli araç teknolojisini geliştirmek için çalışmalar başlatmıştır. İYM'li araçların çevreye saldığı kirletici emisyonların sera gazı etkisi ve iklim değişikliği üzerinde büyük rol oynaması da batarya, ultrakapasitör ya da yakıt pili ile güç sağlanan elektrikli ve hibrit araçların önemini arttırmıştır (Das ve ark. 2017).

Emisyon değerlerinin düşürülmesinde tamamen elektrikli araçlar ve yakıt pilli elektrikli araçlar hibrit araçlara kıyasla daha etkilidir. Hibrit araçlar emisyon değerlerinin azaltılmasına katkı sağlasa da ilerleyen yıllarda yeterli olmayacaktır (Wilberforce ve ark. 2017). Hidrojenle çalışan yakıt pilli elektrikli araçlar emisyonların ve petrol kaynaklı enerji tüketiminin azaltılmasında uzun vadede en faydalı seçenektir (Thomas 2009).

Bu çalışmada ilk önce elektrikli ve hibrit araçların bir sınıflandırması yapılmıştır. Ayrıca, yakıt pilli araçların temel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın bir kısmını oluşturan geri kazanımlı frenleme stratejileri irdelenmiştir. Ayrıca, sürüş çevrimleri analiz edilmiştir.

Daha sonra, taşıt boyuna hareket denklemi çıkartılmıştır. Taşıta etki eden direnç ve atalet kuvvetlerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Modelleme için seçilen araca ait direnç kuvvetleri ve atalet kuvvetleri hesaplandıktan sonra NEDC çevrimi için tahrik kuvveti, tahrik enerjisi ve geri kazanımlı frenleme enerji değerleri her iki araç için hesaplanmıştır. Klasik araca ait yakıt tüketim değerleri normal, yakıt kesme ve Dur&Kalk fonksiyonları kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yakıt pili hidrojen tüketim değeri ise doğrulama

yapıldıktan sonra anlık ve kümülatif olarak hesaplanmıştır. Yakıt tüketim hesaplamaları MATLAB 2018b kullanılarak yapılmıştır.

Son bölümde ise hidrojenli araca ait yakıt tüketim değeri dizel eşdeğerine çevrilerek her iki güç tahrik sistemi ile tüketilen yakıt miktarları dizel yakıtı cinsinde ifade edilerek bir karşılaştırma yapılmıştır.

Bu çalışma ile klasik dizel bir araç ile aynı aracın yakıt piline dönüştürülmüş halinin NEDC çevrimine göre yakıt tüketim hesabı detaylı bir şekilde incelenmiş ve literatüre kazandırılmıştır. Gelecekte, WLTC (The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles) gibi farklı çevrimler için de benzer çalışmaların yapılması düşünülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

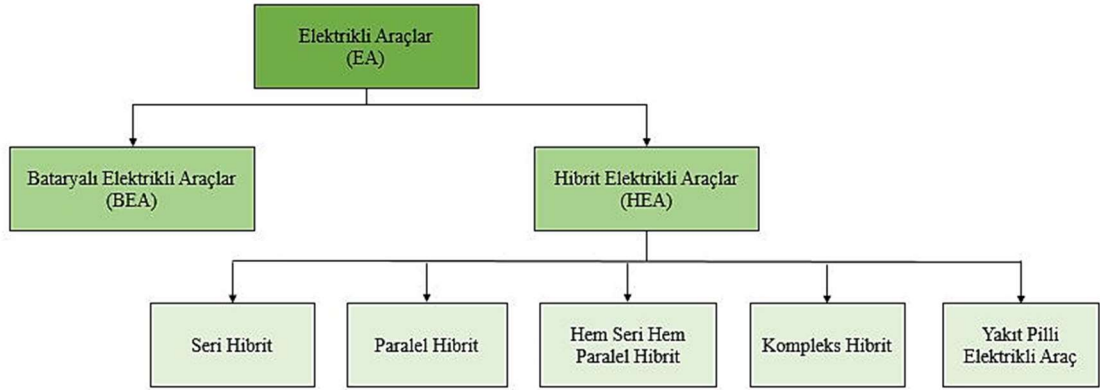
2.1. Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar bir içten yanmalı motora sahip değildir. Dolayısıyla bir yanma gerçekleşmez ve kirletici emisyonlar açığa çıkmaz. Elektrik enerjisi genellikle bir bataryada depolanır ya da bir yakıt hücresinde kimyasal enerjiden dönüştürülerek elektrik motoru vasıtasıyla tekerleklere mekanik enerji olarak iletilir. Bu nedenle sıfır emisyonlu araçlar olarak da adlandırılırlar. Ayrıca elektrik motoru içten yanmalı motora nazaran daha yüksek verim bölgelerinde çalışır (Emadi 2005) ve frenleme esnasında bir jeneratör gibi davranarak rejeneratif frenleme ile tekerleklerdeki kinetik enerjiyi geri kazanır. Sağladığı bu avantajlara rağmen elektrikli araçlar günümüzde otomotiv pazarında hala küçük bir dilime sahiptir. Bunun en önemli sebepleri klasik araçlara göre daha kısa menzilli olması, şarj altyapısının yetersizliği ve başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasıdır (de Lucena 2011). Bunun yanı sıra elektrikli araçların yaygınlaşmamasında şarj süreleri de etkilidir. Her ne kadar son yıllarda şarj süreleri düşürülmüş olsa da yeterli değildir. Bir elektrikli aracın şarj süresi yarım saat ile iki buçuk saat arasında değişmektedir. Bu süreler konvansiyonel bir aracın yakıt dolmuş süresi ile karşılaştırıldığında oldukça uzundur.

Elektrikli araçlardaki aktarma organları üç temel alt sistemden oluşur: Elektrik motoru tahriği, enerji kaynağı ve yardımcı sistemler. Elektrikli çekiş alt sistemi taşıt kontrol ünitesi, güç dönüştürücü, elektrik motoru, mekanik transmisyon ve tekerlekleri içerir; enerji depolama sistemi, enerji yönetim ünitesi ve enerji ikmali ünitesi ise enerji kaynağı alt sistemini oluşturur. Bunların dışında kalan direksiyon ünitesi, klima kontrol ünitesi vb. ise yardımcı sistemler olarak adlandırılırlar (Ehsani ve ark. 2018). Enerji depolama sistemi performans ve menzil gibi teknik özellikleri belirlemede önemli bir role sahiptir. Enerji depolama cihazları şarj edilebilir batarya tipleri (örneğin Kurşun-Asit, Nikel-Metal Hidrit ya da Lityum İyon batarya), kapasitörler veya hidrojenin bir yakıt pilinde enerji kaynağı olarak kullanılması ile ayırt edilebilir.

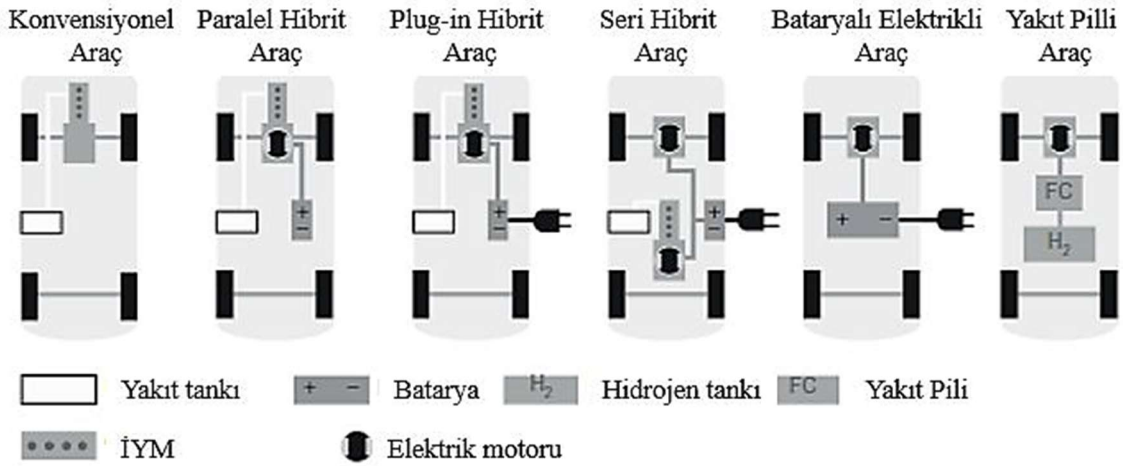
Elektrikli araçların çekişi sağlayan enerji dönüştürücünün tipine ya da aracın güç veya işlevine göre çeşitli sınıflandırmaları mevcuttur. Kullanılan enerji dönüştürücü tiplerine göre elektrikli araçları Şekil 2.1'deki gibi Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEA) ve Hibrit

Elektrikli Araçlar (EA) olarak temel iki sınıfa ayırmak mümkündür (de Lucena 2011). Tamamen elektrikli araçlar olarak da adlandırılan bataryalı elektrikli araçlarda (BEA), yakıt hücreli araçlarda (YHA) ve menzil uzatıcı (Range-extender) araçlarda elektrik motoru tek çekiş kaynağı olarak tanımlanır (Herrmann ve Rothfuss 2015).



Şekil 2.1. Elektrikli araçların sınıflandırılması (de Lucena 2011)

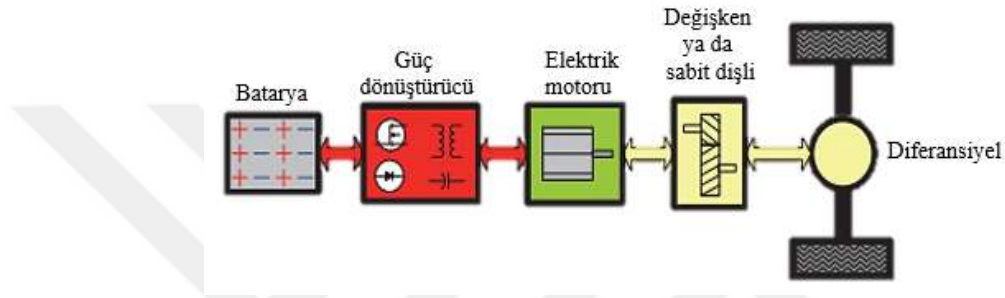
Elektrikli araçların sınıflandırılmasında çekiş bileşenlerinin konfigürasyonu da etkilidir. Şekil 2.2’de elektrikli araç tiplerine göre çekiş sistemindeki ana bileşenlerin yerleşimi ve karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla konvansiyonel bir araca ait iletim hattı mimarisi verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere elektrikli araç konfigürasyonları konvansiyonel araçlara göre daha esnektir (Chan ve Chau 2001).



Şekil 2.2. Elektriksel çekiş sistemi türlerinin konvansiyonel çekiş sistemi ile yapısal karşılaştırması (Herrman ve Rothfuss 2015)

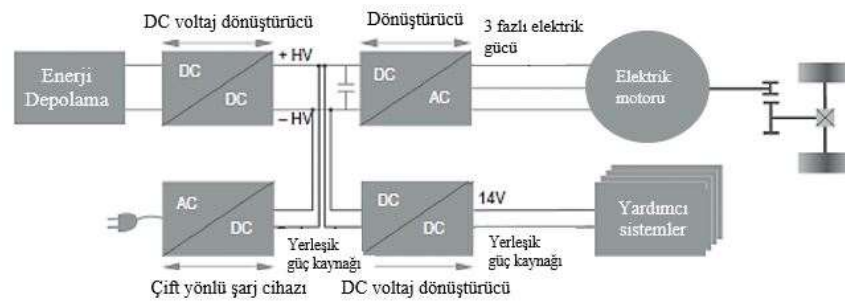
2.1.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar

Bataryalı elektrikli araçlar elektrik motoru tarafından üretilen elektriksel enerjiyi depolamak için bataryaya sahiptir. Bataryalarda depolanan elektriksel enerji daha sonra mekanik güce dönüştürülerek tahrik sağlanır (de Lucena 2011). Şekil 2.3'te bataryalı elektrikli araçların çekiş sistemi konfigürasyonu verilmektedir. Bataryadaki enerji bir güç dönüştürücünden geçerek elektrik motoruna iletilir. Sabit ya da değişken bir vites kutusu üzerinden enerji iletilerek tekerlekler tahrik edilir.



Şekil 2.3. Bataryalı elektrikli aracın yapısı

Elektrikli araçlarda doğru akımlı ya da alternatif akımlı elektrik motorları kullanılabilir. Bataryadan elektrik motoruna gelen akımın ve rejeneratif frenleme esnasında elektrik motorundan bataryaya iletilen akımın dönüştürülmesi gerekir. Bunun için iki yönlü bir dönüştürücüye (Şekil 2.4) ihtiyaç vardır. Dönüştürücü aynı zamanda voltajı da farklı seviyelere dönüştürebilmelidir (Herrmann ve Rothfuss 2015).



Şekil 2.4. Elektriksel aktarma organları yapısı (Herrmann ve Rothfuss 2015)

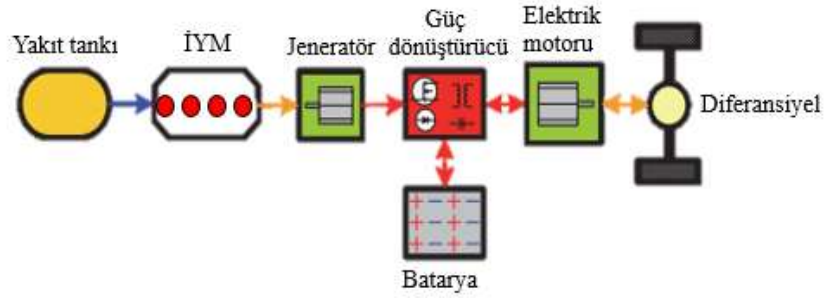
2.1.2. Hibrit Elektrikli Araçlar

Kullanılan bataryaların ömrü, şarj süresi ve maliyetleri elektrikli araçlar için sınırlayıcı bir etkidir. Bataryaların bu eksiklerini bertaraf etmek amacıyla hibrit elektrikli araçlar geliştirilmiştir. Bataryalı elektrikli araçlar sadece elektrik motoru ile tahrik edilirken hibrit elektrikli araçlar çekiş sistemlerinde içten yanmalı motor ve elektrik motorunun ikisini de kullanır. Ana çekiş sistemi içten yanmalı motordur, elektrik motoru ise hareket için yardımcı bir sistem olarak çalışır (Ribeiro ve ark. 2019). Böylelikle aynı güç çıkışı için daha küçük içten yanmalı motor kullanılabilir ve çalışma noktaları optimize edilerek İYM'nin daha yüksek verimlerde çalışması sağlanabilir.

İki enerji dönüştürücüsünün çekiş için birleştirilme şekli üç temel aktarma organı mimarisini tanımlar: seri hibrit, paralel hibrit ve hem seri hem paralel hibrit. Kompleks hibrit bu üç temel tipten biri olarak sınıflandırılmayan mimariyi ifade eder (de Lucena 2011).

2.1.2.1. Seri Hibrit Araçlar

Menzil uzatıcı olarak da bilinen (Emadi 2005) seri konfigürasyonda taşıt elektrik motorunun direkt bataryadan ya da İYM/jeneratör grubundan veya her ikisinden de beslenmesiyle tahrik edilir (Larminie ve Lowry 2012). Hangi güç kaynağından ne kadar güç çekileceği bir kontrolör tarafından belirlenir. Bu sayede yakıt ekonomisi, emisyonlar ve menzil optimize edilebilir. İYM/jeneratör grubu bataryaları da şarj eder. Bataryalar aynı zamanda rejeneratif frenleme ile de şarj edildiği için bu konfigürasyon şehir içi sürüşlerde birçok dur/kalk (start/stop) içeren sürüş çevrimleri için daha uygundur. Tekerleklere direkt bağlantısı olmadığında (Şekil 2.5) içten yanmalı motorun boyutları küçültülebilir ve dar aralıkta çalışacak şekilde optimize edilebilir (Bridges 2015).

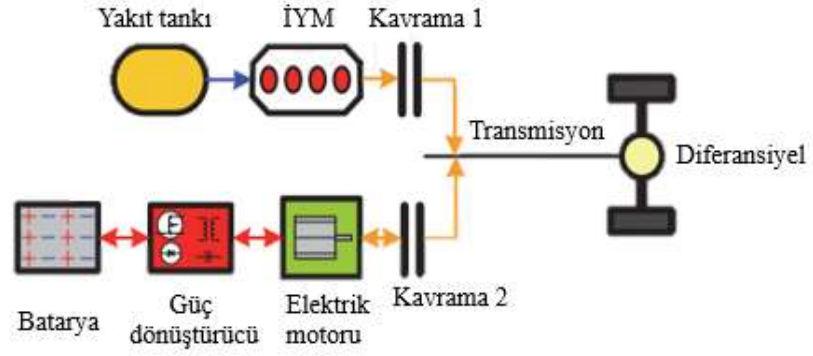


Şekil 2.5. Seri hibrit elektrikli aracın yapısı

Seri hibrit araçların bir dezavantajı yakıtın kimyasal enerjisinin önce İYM’de mekanik enerjiye dönüştürülmesi ve sonrasında bu mekanik enerjinin elektrik motorunda elektriksel enerjiye dönüştürülerek tekerleklere iletilmesidir. Enerjinin dönüşümü sırasında meydana gelen kayıplar sistemin veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bunun yanında bir diğer dezavantaj da sistemde kullanılan jeneratörün hem taşıtın ağırlığını hem de maliyetini arttırmasıdır.

2.1.2.2. Paralel Hibrit Araçlar

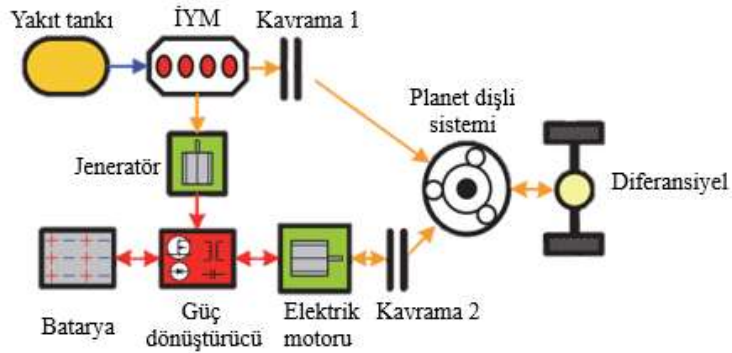
Paralel hibrit teknolojisi içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun beraber ya da ayrı ayrı kullanılabilmesine imkan sağlar (Emadi 2005). İYM elektrik motoru ile desteklendiği için emisyon değerleri nispeten daha düşüktür. Elektrik motoru rejeneratif frenleme ile bataryayı şarj etmek için kullanılır ya da EM çıkış gücü tahrik için yetersiz olduğunda jeneratör gibi çalışarak İYM’den güç çeker (Chan 2007). İçten yanmalı motorun elektrik motorundan bağımsız olarak tekerleklere tahrik verebilmesi için ayrı bir transmisyon sistemine ihtiyaç vardır (Şekil 2.6). Bu da yapıyı seri hibrit araçlara göre daha karmaşık hale getirmektedir. Ancak İYM tekerlekleri doğrudan tahrik ettiği için enerji dönüşümleri daha azdır, dolayısıyla verimi seri hibritin verimine göre yüksektir (Emadi 2005). Paralel hibrit konfigürasyonun bir diğer avantajı ise İYM ve elektrik motoru aynı anda tahrik sağladığı için daha küçük boyutlarda olabilir. Bu da fiyatın düşmesini ve yapının daha kompakt olmasını sağlar (de Lucena 2011).



Şekil 2.6. Paralel hibrit elektrikli aracın mimarisi

2.1.2.3. Hem Seri Hem Paralel Hibrit Araçlar

Hem seri hem paralel hibrit konfigürasyonu seri hibrit ve paralel hibrit araçların özelliklerini birleştirir. Seri hibritteki konfigürasyona ek olarak bir mekanik bağlantıya ve paralel hibrit konfigürasyona ek olarak da bir jeneratöre daha sahiptir. Seri ve paralel hibritin özelliklerinin bir arada bulunması yapının karmaşıklaşmasını ve maliyetlerin artmasını da beraberinde getirir (Chan 2007). Şekil 2.7’de hem seri hem paralel hibrit araç konfigürasyonu verilmiştir. İçten yanmalı motor tekerlekleri direkt tahrik edebilir. Düşük hızlarda seri hibrit gibi çalışır ve yüksek hızlarda ise İYM ile tekerleklere güç sağlanır, böylece seri hibritteki enerji dönüşümleri azaltılmış olur.



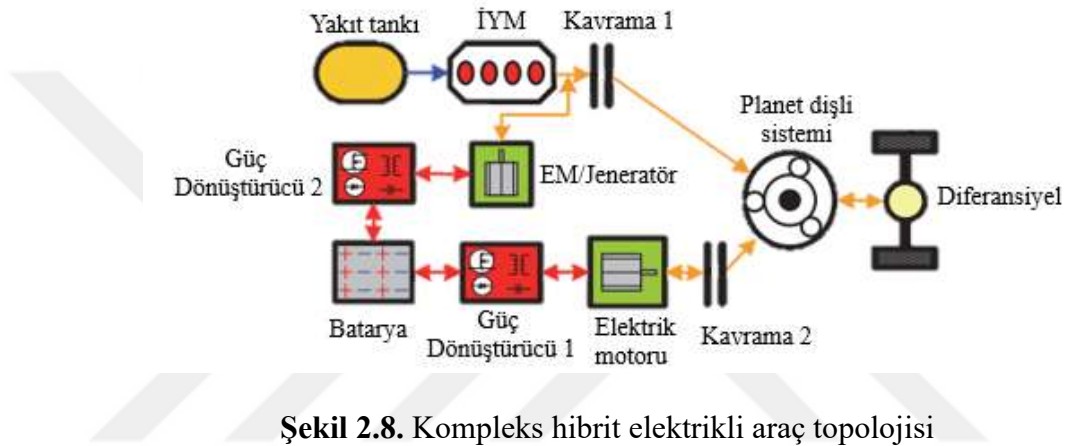
Şekil 2.7. Hem seri hem paralel hibrit elektrikli araç topolojisi

2.1.2.4. Kompleks Hibrit Araçlar

Kompleks hibrit araçlar yukarıda bahsedilen üç konfigürasyon ile birlikte sınıflandırılmazlar. Yapıları hem seri hem paralel hibrit konfigürasyonuna benzer ancak

temel fark kompleks hibritte hem seri hem paralel hibritin aksine elektrik motoru/jeneratör iki yönlü güç akışı sağlar. Bu iki yönlü güç akışı diğer konfigürasyonlardaki çalışma modlarına ek olarak farklı modlarda da çalışmasını sağlar (Chan 2007).

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bu topolojide iki tane elektrik motoru kullanılmaktadır. Elektrik motorlarından birisi ana güç dönüştürücü olarak diğeri ise yardımcı olarak kullanılır ve iki motor da eş zamanlı olarak tekerlekleri tahrik edebilir (de Lucena 2011).

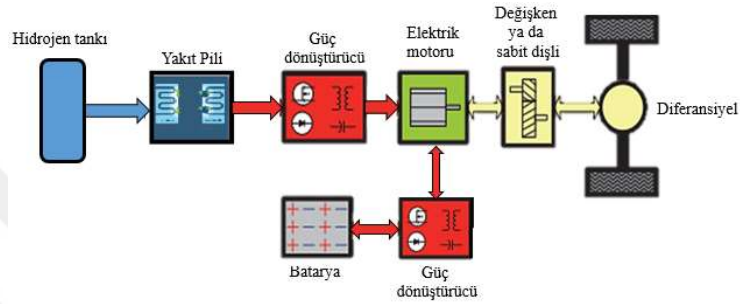


Şekil 2.8. Kompleks hibrit elektrikli araç topolojisi

2.1.2.5. Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

Yakıt pili araçların yapısı seri hibrit yapısına oldukça benzemektedir. Seri hibritteki içten yanmalı motor yerine birincil güç kaynağı olarak bir yakıt pili vardır. Yakıt pilleri içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha verimlidirler ve yakıtın enerjisini yanma olmadan doğrudan kimyasal enerjiden elektrik enerjisine dönüştürdüğü için emisyon değerleri düşüktür (Emadi 2005). Doğal gaz reformundan elde edilen hidrojen kullanıldığında kirletici emisyon değerlerinde %50’den daha yüksek oranlarda azalma görülür. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen düşük karbonlu hidrojen kullanıldığında bu oran %80’e kadar çıkabilir (Kumar ve Sehgal 2018). Yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığında ise yalnızca su açığa çıkar, dolayısıyla kirletici emisyon değerleri sıfırdır. Buna karşın yakıt pilinin maliyetlerinin yüksek olması, açığa çıkan suyun sistemden uzaklaştırılması ve sistemin soğutulması gibi henüz çözümlenememiş problemler bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Şekil 2.9’da yakıt pili elektrikli araca ait konfigürasyon verilmektedir. Gaz veya fren pedalından gönderilen tork ya da güç talebine bağlı olarak taşıt kontrolörü motor tork/güç çıkışını kontrol eder ve enerjiyi yakıt pili sisteminden çekiş hattına iletir. Ani ivmelenme gibi pik güç talebinde yakıt pili enerji depolama sistemi (batarya) ile birlikte elektrik motoruna çekiş gücü besler. Diğer elektrikli araç konfigürasyonlarında olduğu gibi frenlemede elektrik motoru jeneratör gibi çalışarak frenleme enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür ve enerji depolama sisteminde depolar (Emadi 2005).



Şekil 2.9. Yakıt pili elektrikli araç topolojisi

Çizelge 2.1’de yukarıda bahsedilen temel elektrikli araç konfigürasyonları karakteristik özellikleri açısından karşılaştırılmıştır.

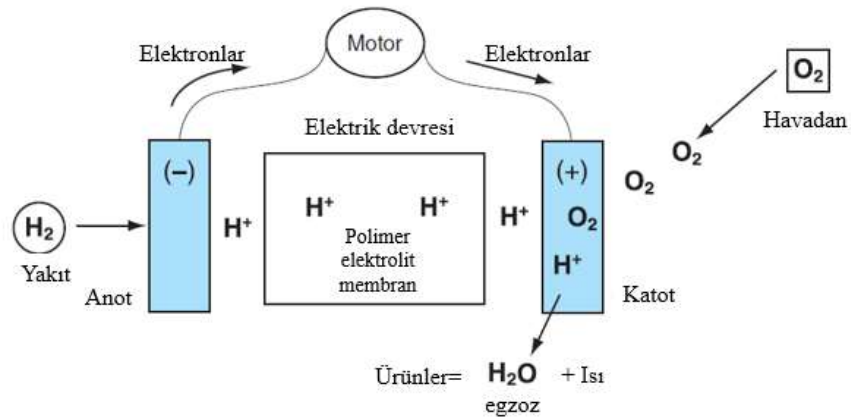
Çizelge 2.1. Bataryalı, hibrit ve yakıt pili elektrikli araçların karakteristikleri (Chan 2007)

Elektrikli araç tipi	Bataryalı EA	Hibrit EA	Yakıt Pili EA
Çekiş	Elektrik motoru	<ul style="list-style-type: none"> Elektrik motoru İçten yanmalı motor 	Elektrik motoru
Enerji sistemi	<ul style="list-style-type: none"> Batarya Ultrakapasitör 	<ul style="list-style-type: none"> Batarya Ultrakapasitör İYM jeneratör ünitesi 	<ul style="list-style-type: none"> Yakıt pili Batarya/ultrakapasitör (başlangıç için güç yoğunluğunu arttırmak amacıyla)
Enerji kaynağı ve altyapısı	<ul style="list-style-type: none"> Elektrik şebekesi Şarj istasyonları 	<ul style="list-style-type: none"> Benzin istasyonları Elektrik şebekesi şarj tesisleri (Plug-in HEA) 	<ul style="list-style-type: none"> Hidrojen Hidrojen üretim ve taşıma altyapısı
Karakteristikler	<ul style="list-style-type: none"> Sıfır emisyon Yüksek enerji verimliliği Ham petrolden bağımsızlık Nispeten kısa menzil Yüksek başlangıç maliyetleri Ticari olarak mevcut 	<ul style="list-style-type: none"> Oldukça düşük emisyon İYM araçlarla karşılaştırıldığında daha yüksek yakıt ekonomisi Uzun sürüş menzili Ham petrole bağımlılık (Plug-in olmayanlar) İYM araçlarla karşılaştırıldığında daha yüksek maliyetler Motor ve batarya güç seviyesinin yanı sıra sürüş çevrimine bağlı olarak artan yakıt ekonomisi Ticari olarak mevcut 	<ul style="list-style-type: none"> Sıfır ya da çok düşük emisyon Yüksek enerji verimliliği Ham petrolden bağımsızlık (Hidrojen üretimi için kullanılmadığında) Tatmin edici sürüş menzili Yüksek maliyet Geliştiriliyor
Ana problemler	<ul style="list-style-type: none"> Batarya ve batarya yönetimi Şarj istasyonları Maliyet 	<ul style="list-style-type: none"> Çoklu enerji kaynağı kontrolü, optimizasyonu ve yönetimi Batarya boyutları ve yönetimi 	<ul style="list-style-type: none"> Yakıt pili maliyetleri, çevrim ömrü ve güvenilirlik Hidrojen altyapısı

2.2. Yakıt Pilleri

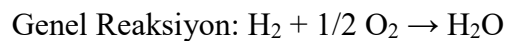
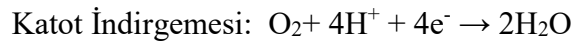
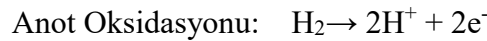
Yakıt pillerinin tarihi 1839 yılında William Grove'un "gazlı voltaik batarya"yı icat etmesine dayanmaktadır. 1889 yılında Mond ve Longer bu bataryaların yeni bir formunu geliştirerek yakıt pilinin bir prototipini oluşturmuşlardır. Yakıt pillerinin ilk pratik uygulamaları uzay araçlarında elektrik ve içme suyu üretmek için kullanılmasıyla başlamıştır (Hoogers 2002). Günümüzde ise yakıt pili teknolojisinin gelişimiyle beraber cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, ev ve ofisler, yardımcı güç sistemleri gibi pek çok uygulama alanı bulmuştur (Mench 2008). Yakıt pillerinin bir araca güç sağlamak için geliştirilmesi ise 1959 yılında başlamıştır (Franco 2013).

Yakıt pilinin çalışma prensibi temel olarak elektroliz olayının tersine dayanır. Hidrojenin oksijen ile yakılması sonucunda DC elektrik akımı oluşur ve su açığa çıkar. Şekil 2.10'da yakıt pilinin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Yakıt pilinin temel çalışma prensibi (Erjavec 2012)

Yakıt pili genel denklemleri ise aşağıdaki gibidir:



Yakıt pillerinde yakıt olarak yüksek saflıkta (%99,999) hidrojen kullanılır. Hidrojenin direkt kullanılmadığı yakıt pili sistemlerinde ise bir yakıt işlemcisi kullanılarak hidrojenin ayrıştırılması gerekir. Bir yakıt pili temel olarak elektrotlar, katalizör tabakaları ve elektrolitten oluşur. Anot elektrotuna gönderilen hidrojen elektron ve protonlarına ayrılır. Elektrolitte protonların geçişine izin verilirken elektronların geçişine izin verilmez ve elektronlar dış devreden dolanarak elektrik üretir. Diğer taraftan, elektrolitten geçen hidrojen iyonları, yani protonlar ise katotta oksijen ile birleşerek suyu oluşturur (Erjavec 2012). Kullanılan elektrolit malzemesine göre farklı yakıt pili çeşitleri mevcuttur. Çizelge 2.2’de yakıt pili türleri ve karşılaştırması verilmektedir. Otomobil uygulamalarında en çok kullanılan türleri Proton Geçirgen Membranlı (PEM) yakıt pilleridir.

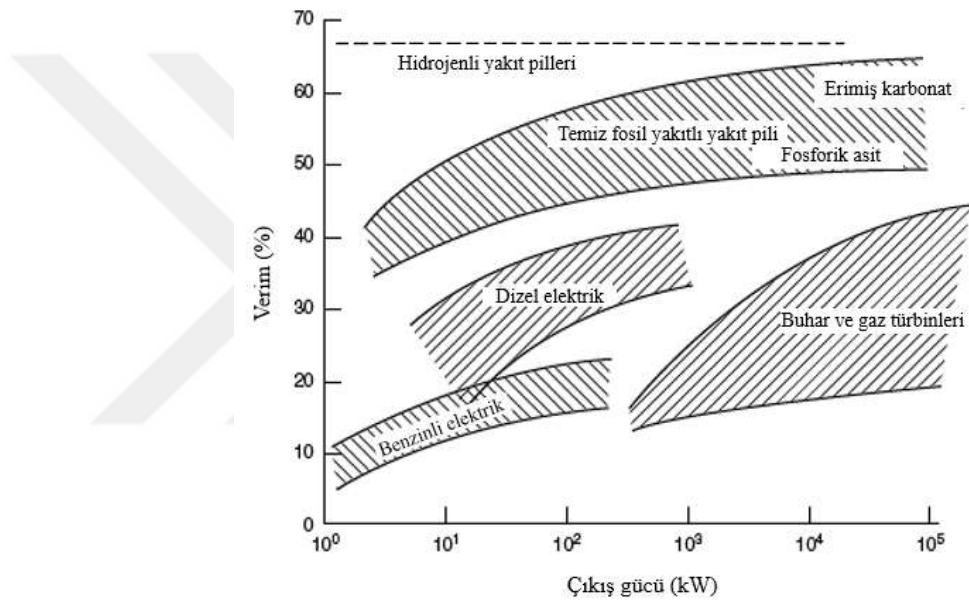
Çizelge 2.2. Yakıt pili türlerinin karşılaştırılması (Larminie ve Dicks 2003, El-Gohary 2013)

Yakıt pili tipi	Taşınan iyon	Elektrolit	Çalışma sıcaklığı (°C)	Çıkış gücü (kW)	Verim	Uygulama alanı
PEM	H ⁺	Katı organik polimer	50-100	<1-250	25-58	Taşıtlar ve mobil uygulamalar, düşük güçteki kojenerasyon güçleri
Alkali	OH ⁻	Sulu çözümlü potasyum hidroksit	50-200	10-100	60	Uzay araçları
Fosforik asit	H ⁺	Sıvı fosforik asit	150-200	50-1000	>40	200 kW kojenerasyon sistemleri
Erimiş Karbonat	CO ₃ ²⁻	Lityum, sodyum ve/veya potasyum karbonat	600-700	<1-1000	45-47	Orta ve büyük ölçekli kojenerasyon sistemleri için uygundur.
Katı Oksit	O ²⁻	İttriyum stabilize zirkon	600-1000	<1-3000	35-43	2 kW ile multi-MW arasındaki tüm kojenerasyon sistemleri için uygundur.

Bir yakıt pili en basit tanımıyla kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüdür. Herhangi bir yakıtın yakılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi temelde dört adımı içerir:

1. Yanma reaksiyonu sonucunda yakıtın kimyasal enerjisinin ısıya dönüşümü,
2. Açığa çıkan ısı ile suyun buharlaştırılması,
3. Elde edilen buharın bir türbini döndürmesi ile mekanik enerji eldesi,
4. Mekanik enerjinin jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi

Bu prosesin her basamağında enerji kayıpları gerçekleşir ve dolayısıyla sistemin veriminin düşmesine sebep olur. Yakıt pilleri ise tüm bu işlemleri atlayarak tek adımda ve daha yüksek verimlerde kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar (Barbir 2005). Şekil 2.11’de yakıt pili ve diğer enerji dönüşüm teknolojilerinin enerji dönüşüm verimleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.11. Farklı enerji dönüşüm teknolojilerinin enerji dönüşüm verimi bakımından karşılaştırılması (Li 2007)

Bu teknolojiler için aynı yakıt ve oksitleyici kullanıldığında kimyasal sürecin sonunda açığa çıkacak olan potansiyel enerji bellidir. Aralarındaki fark bu teknolojilerin reaksiyon entalpisini nasıl faydalı işe döndürdüğünde yatmaktadır. İçten yanmalı motorlar ile bir kıyaslama yapıldığında çalışma esnasında içten yanmalı motorlar yüksek sıcaklıklara çıkar ve oluşan ısının bir kısmı atık olarak çevreye salınır. Hidrojen yakıt pilleri ise 70-80 °C sıcaklıklarda çalışarak aynı faydalı gücü sağlar. Oluşan atık ısı İYM'ninkinden daha düşüktür ve dolayısıyla verimi daha yüksektir (Mench 2008).

Verimlerinin yüksek olmasının yanında sahip oldukları diğer avantajlar da özellikle otomotiv sektöründe yakıt pillerinin önemini arttırmıştır. Yakıt pillerinin diğer üstünlükleri de aşağıdaki gibi özetlenebilir (Barbir 2005, Mench 2008):

- Basit yapıdadır; yakıt pilleri hücrelerden oluşmaktadır. Hücrelerin bir araya getirilmesiyle yakıt pili yığını oluşturulur ve hareketli parçalar yoktur. Hareketli parçaların bulunmaması; arızaların ve bakımlarının da daha az olmasını sağlar.
- Modülerdir; hücre sayısı artırılarak daha fazla güç sağlanabilir.
- Sessizdir.
- Boyut ve ağırlık; mikrowatt ve megawatt aralığında çeşitli boyutlara sahip olabilir. Otomobillerde kullanılan yakıt pillerinin ağırlığı ve boyutu içten yanmalı motorlarınkine yakın sayılabilir. Ancak diğer yakıt pili sistemi elemanları ile birlikte ağırlıkları artmaktadır.
- Bataryalardan farklı olarak yakıt gönderildiği sürece güç üretir, şarj dolun süresi problemi yoktur.

Yukarıda sayılan avantajlarının yanında yakıt pillerinin geliştirilmesi gereken kısımları da vardır. Üretim maliyetlerinin içten yanmalı motorlarla rekabet edebilecek seviyeye düşürülmesi gerekir. Bunun için yakıt pili bileşenlerinde kullanılan malzemelerin yerine daha ucuz, alternatif malzemeler bulunmalıdır. Bileşenler zamanla hasara uğradığı için uygun güvenilirlik ve dayanım sağlanmalıdır. Yakıt olarak saf hidrojen kullanılması durumunda hidrojenin depolama ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gerekir (Mench 2008).

2.3. Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen

Hidrojen kokusuz, renksiz, şeffaf bir yapıya sahiptir ve doğada en çok bulunan elementtir (Uğurlu ve Oztuna 2015). Ancak, en küçük element olmasından dolayı serbest halde bulunan hidrojen miktarı düşüktür; oksijen ve karbon gibi diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Elektroliz, termokimyasal, fotobiyolojik ya da fotokatalitik yöntemlerle sudan veya buhar reformasyonu ile hidrokarbon yakıtlardan ayrıştırılarak hidrojen elde edilebilir (Jain 2009). Ayrıştırıldığında son derece temiz bir enerji taşıyıcısı (Hordeski 2008) olan hidrojen aynı zamanda yaygın olarak kullanılan yakıtların arasında en yüksek

ısıllı değere sahiptir. Benzin ile karşılaştırıldığında (Çizelge 2.3) birim kütle başına 2,6 kat daha fazla enerji depolayabilir (Sharma ve Ghoshal 2015).

Çizelge 2.3. Yaygın enerji kaynaklarının kg başına enerji değeri (Erjavec 2012)

Yakıt	Enerji
Uranyum 238	20 TJ
Hidrojen	120 MJ
Doğal gaz	50 MJ
LPG	46 MJ
Benzin	44 MJ
Dizel	43 MJ
Biyodizel	36,5 MJ
Kömür	35,5 MJ
Metanol	20 MJ
Süperkapasitör	100 kJ
Kurşun-asit batarya	100 kJ
Kapasitör	360 J

Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve fosil yakıtların çevreye saldıkları CO₂ ile küresel ısınmaya yol açması temiz ve yüksek özgül enerji değerine sahip olan hidrojenin alternatif yakıt olarak kullanılmasının önemini arttırmıştır. Hidrojenin taşıtlarda yakıt olarak kullanılmasında iki yol vardır. Bunlardan birincisi içten yanmalı motorlarda havadaki oksijen ile yakılması, ikincisi ise yakıt pillerinde yine havadaki oksijen ile elektrokimyasal olarak yakılmasıdır. Hidrojenin yüksek özgül enerjiye sahip olması yakıt tüketiminde bir avantajdır. 100 km'lik bir menzilde bir klasik araç 6 kg hidrokarbon yakıt tüketirken aynı menzil için İYM'li bir klasik araçta 2 kg ve yakıt pilli elektrikli bir araçta ise 1 kg hidrojen tüketilir (Sharma ve Ghoshal 2015).

Hidrojenin otomobillerde yakıt olarak kullanılmasındaki dezavantaj ise verimli ve güvenilir bir şekilde araçta depolanamamasıdır. Hidrojenin özgül enerjisi (kJ/kg) yüksek olmasına rağmen özgül yoğunluğu (kJ/m³) çok düşük olduğu için yüksek basınçlarda

depolanması gerekir (Larminie ve Dicks 2003). Çelik tanklarda, yüksek basınçlarda depolama mümkündür ancak depolama tankının ağırlıkları ve bir kaza anında güvenlik tehlikesi oluşturması gibi dezavantajları vardır (Hordeski 2008). Hidrojenin sıkıştırılmış gaz ve sıvı olarak depolanmasının yanı sıra karbon nanofiberlerde ve metal hidritlerde absorblayarak depolama yöntemleri de geliştirilmektedir (Larminie ve Dicks 2003). Ayrıca yakıt pilli elektrikli araçlarda hidrojenin sodyum borhidrürden ayrıştırılarak kullanılması ile ilgili çalışmalar da sürdürülmektedir.

2.4. Rejeneratif Frenleme

İçten yanmalı motora sahip araçlarda frenleme esnasında ısı olarak kaybedilen enerji elektrikli araçlarda elektrik motorunun yavaşlama sırasında jeneratör olarak çalışması ile geri kazanılabilir. Bu olay geri kazanımlı frenleme ya da rejeneratif frenleme olarak adlandırılır. Rejeneratif frenlemede kinetik enerjinin çoğu geri kazanılır ve daha sonra kullanmak için volan, batarya, ultrakapasitör gibi bir enerji depolama sisteminde depolanır ya da hemen sisteme geri beslenir (Singh 2013). Farklı enerji depolama metotları rejeneratif frenleme sistemi üzerinde farklı etkiye sahiptir ve teknolojilerinin uygunluğu farklıdır (Zhang ve Huang 2018). Örneğin enerji depolama kaynağı olarak batarya kullanıldığında her bir rejeneratif frenleme çevriminde 4 verim düşürücü dönüşüm vardır:

1. Kinetik enerji motor/jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülür.
2. Batarya şarj olurken elektrik enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülür.
3. Kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülürken batarya deşarj olur.
4. Elektrik enerjisi motor olarak çalışan motor/jeneratörden geçer ve bir kez daha kinetik enerjiye dönüştürülür.

Bu dört enerji dönüşümü genel verim seviyesini düşürür. Eğer motor/jeneratör pik yük altında giriş ve çıkışta %80 verimle çalışıyorsa ve batarya yüksek güçte %75 verimde şarj ve deşarj oluyorsa tam bir döngüde genel verim sadece %36 olur (Boretti 2011). Buradan görüleceği gibi geri kazanılan enerjinin seviyesi jeneratör gibi çalışan elektrik çekiş motorunun kapasitesine, motora bağlı enerji depolama sistemi ve kontrol sisteminin verimine bağlıdır (Walker ve ark. 2010).

Genelde, rejeneratif frenleme sistemi konvensiyonel sürtünme frenlemesi ile birlikte çalışır. Bunun sebeplerinden birisi motor-jeneratörün mevcut fren torkunun acil durum freni (emergency braking) meydana geldiğinde böyle büyük fren şartını yerine getirmek için yeterli olmamasıdır. İkinci sebebi ise enerji depolama bileşeninin yüksek voltajı, yüksek batarya şarj durumu (SoC) ya da bataryaya zarar verebilecek yüksek sıcaklıklar gibi durumlarda batarya hasarı sebebiyle rejeneratif frenlemenin çalışmamasıdır (Chanthanumataporn ve ark. 2011).

Taşıtların rejeneratif frenleme enerjisinin faydalarını niteliksel olarak tanımlamak kolaydır ancak bu faydaları niceliksel olarak tanımlamak için daha zor bir analiz gereklidir. Böyle bir analiz taşıt gücünün sürüş çevriminin bir fonksiyonu olarak tanımlanmasını gerektirir. Ayrıca sürüş çevriminin gerçek bir gösterimini ve kontrol sistemi açısından kullanılacak rejeneratif frenleme sisteminin karakteristiklerini, enerji depolama kaynağının hangi şartlar altında şarj ya da deşarj olacağını belirlediği algoritmanın da tanımlanması gerekir. Alternatif olarak rejeneratif frenlemenin potansiyel faydalarını ölçmedeki ilk adım taşıtı, yolu ve sürüş çevrimini tanımlamak ve daha sonra motor tarafından üretilen toplam düzenli enerjinin ne kadarlık kısmının frenler tarafından absorbe edildiğini belirlemektir (Wicks ve ark. 1997).

2.4.1 Seri Rejeneratif Frenleme

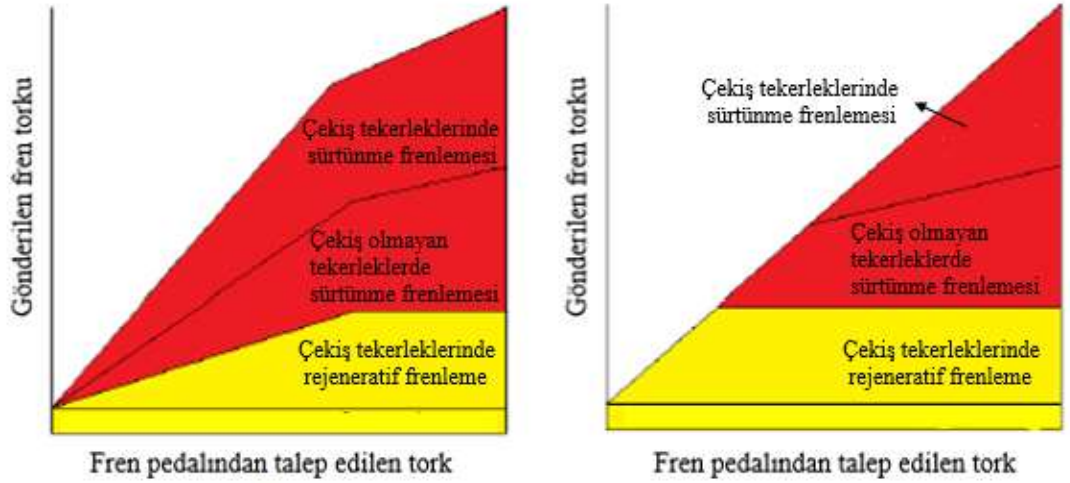
Seri rejeneratif frenleme, entegre bir kontrol stratejisi altında elektrik motorlarına ve bataryalara enerji aktaran bir rejeneratif fren sistemi ile sürtünme bazlı, ayarlanabilir fren sistemi kombinasyonuna dayanmaktadır. Fren pedalına basıldığında baskı seviyesine bağlı olarak tekerleklere bir frenleme torku gönderilir. Bu frenleme torku fren kontrol stratejisi bloğundan geçer ve burada öncelikle batarya şarj seviyesi kontrol edilir. Şarj seviyesi olması gereken değerin altındaysa (bu değer genellikle %80'dir) batarya rejeneratif frenleme ile şarj edilir. Talep edilen frenleme torku maksimum rejeneratif torka eşit ya da küçükse araç sadece rejeneratif tork ile frenleme yapar ve batarya şarj edilir. Örneğin önden çekişli bir araç için eğer talep edilen frenleme torku motor/jeneratörün sağlayabileceği torktan büyük ya da eşit ise ön tekerlekler sadece rejeneratif frenleme yapar, çekişin olmadığı arka tekerlekler ise sürtünme ile frenleme yapar. Talep edilen toplam frenleme torku arttığında ön tekerleklerdeki sürtünme

frenlemesi, arka tekerleklerdeki sürtünme frenlemesi ve ön tekerleklerdeki rejeneratif frenleme bir kombinasyon oluşturur (Varocky 2011).

Şekil 2.12’de sol taraftaki grafik seri rejeneratif frenleme stratejisini göstermektedir. Şekildeki sarı bölge rejeneratif frenlemeyi ve kırmızı bölge sürtünme frenlemesini gösterir. Alt kısımdaki küçük sarı bölge, gaz kelebeği kapalı yavaşlama durumundaki geri kazanımdır. Onun üzerindeki diğer sarı bölge ise fren pedalı uygulandığındaki geri kazanımı gösterir ve seri strateji durumunda jeneratör torku maksimuma ulaştığında ve paralel strateji için sürekli sürtünme frenlemesi olduğunda kırmızı bölgeye geçer. Seri rejeneratif frenlemenin yakıt verimliliğine katkısı %15-%30 aralığındadır (Varocky 2011).

2.4.2. Paralel Rejeneratif Frenleme

Paralel rejeneratif frenleme stratejisinde gerekli olan frenleme torku her zaman rejeneratif ve sürtünme frenlemesi arasında bölünür. Paralel rejeneratif frenleme geleneksel sistemlere bir eklenti olduğu için herhangi bir entegre kontrolden yoksundur. Rejeneratif frenleme ve sürtünme frenlemesi arasındaki geçişi ya da beraber çalışmasını yumuşak hale getirmek için rejeneratif ve sürtünme fren torklarının miktarı, aralarında net bir ayırım olacak şekilde atanır. Önden çekişli araçlarda, gerekli olan fren torku ön tekerlek ve arka tekerleklere dağıtılan fren torkunun maksimum jeneratör torkundan büyük veya ona eşit olduğu sürece rejeneratif frenleme ve sürtünme frenlemesi birlikte gerçekleştirilir. Aksi halde tüm tekerlekler sadece sürtünme frenlemesi yapar. Paralel rejeneratif frenlemenin yakıt verimliliğine katkısı %9-%18 aralığındadır (Varocky 2011).



Şekil 2.12 Seri ve paralel rejeneratif frenleme stratejisi

2.5. Sürüş Çevrimleri

Bir taşıtın yakıt ekonomisi ve emisyon değerleri yol şartları, trafik, sürüş stili ve hava gibi çevresel faktörlerden oldukça etkilenir. Bu nedenle taşıtın yakıt ekonomisini ya da emisyonlarını yolda ölçülen gerçek değerlere bağlı olarak değerlendirmek iyi bir yöntem değildir. Bu sorunu aşmak için otomobil endüstrisi ve hükümetler farklı araçların birbiriyle adil bir şekilde karşılaştırılabildiği, tekrarlanabilir şartlar altında taşıtın yakıt tüketimi ve emisyonlarını ölçmek için bir dizi standart testler geliştirmişlerdir. Bu testler sürüş çevrimi olarak adlandırılır ve tüm yeni otomobil tasarımlarında rutin olarak kullanılır (Liu 2013).

Sürüş çevrimleri genellikle zamanın bir fonksiyonu olarak taşıt hızı ve vites seçimi ile tanımlanır (Guzzella ve Sciarretta 2013), bunun yanında zamana karşı yol eğimi profilinin oluşturulduğu çevrimler de mevcuttur. Tipik olarak bir sürüş çevrimi 30 dakika kadar sürer ancak daha uzun çevrimler de geliştirilmiştir (Giakoumis 2017). Ortalama veya tipik sürüş şartlarına vekaleten hizmet eden çevrimler, modelleme, envanter oluşturma ve emisyon kontrol stratejilerini uygulamak amacıyla birçok araştırma çalışması ve projelerde de kullanılır (Giakoumis 2017). İdeal olarak bir sürüş çevrimi;

- Tipik ortalama bir sürücünün “sürüş agresifliği” ve vites değiştirme modeli gibi aracın/motorun yaklaşık olarak gerçek dünya davranışını yansıtan sonuçlar

sağlamalıdır. Bu amaçla ve belirli uygulamalara bağlı olarak sürüş çevrimleri bazı sürüş koşullarını ya da tüm günlük sürüş/çalışma koşullarını içermelidir:

- Soğuk çalışma (tipik olarak 20-30 °C’de, bir gece gibi uzun bir süreden sonra ilk defa motorun çalıştırılması)
- Sıcak çalışma (Birkaç dakika ya da birkaç saat önceki çalıştırmadan hemen sonraki çalışma)
- İvmelenme, yavaşlama ve yük artış veya azalış fazları
- Tipik şehir sürüşündeki boşta çalışma şartları (örneğin kırmızı ışıkta beklemek)
- Kırsal sürüş
- Otoyolda şehir dışı sürüş temsilcisi
- Pratik olmalıdır yani çok uzun ya da uygulama için çok komplike olmamalıdır; örneğin 20 ya da 30 dakika süre tüm sürüş faaliyetlerini temsil etmek için yeterli miktarda veri içerecek kadar uzundur ve aynı zamanda uygun bir maliyette tekrarlanabilecek kadar kısadır.
- Test ve sonuçlar tekrarlanabilir olmalıdır.
- Tamamen kontrol edilebilir olmalıdır.

Ayrıca belirli bir sürüş çevriminde test edilmek istenen tüm araçlar bu çevrim profilini yakından takip edebilmelidir(Giakoumis 2017).

Sürüş çevrimlerini kategorize etmek için birçok sınıflandırma vardır. Birincisi tüm taşıtın mı yoksa sadece motorun mu test edildiğidir. Bu nedenle referans;

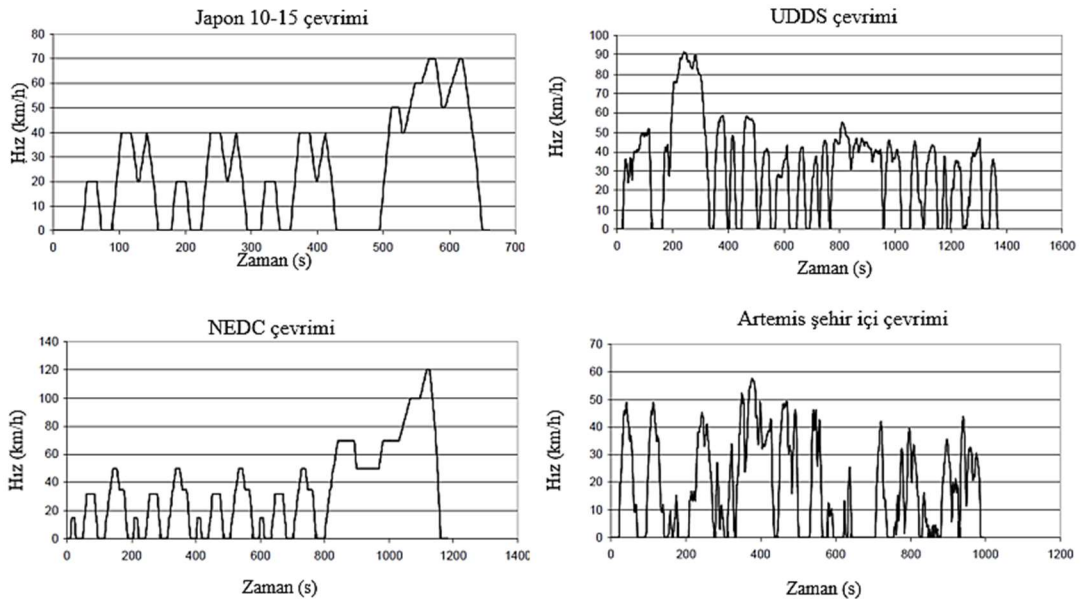
- Şasi dinamometresi ve
- Motor dinamometre çevrimleri

şeklinde yapılır (Giakoumis 2017). Hafif ticari araçlar güç absorbe eden şasi dinamometresi kullanılarak test edilirken ağır ticari araç motorları bir test düzeneğinde çalıştırılır (Barlow ve ark. 2009). Diğer sınıflandırma çevrimin yasallaştırılmış (dolayısıyla sertifikasyon prosedürlerinde kullanılan) ya da yasallaştırılmamış (çeşitli araştırma projeleri ve envanter çalışmaları amacıyla kullanılan) olmasına göre yapılır (Giakoumis 2017).

Şasi dinamometresi kullanılarak gerçekleştirilen testlerde araç tekerlekleri silindirlerle temasta olacak şekilde konumlandırılır. Silindirler aerodinamik direnç ve sürtünme kayıplarını simüle etmek için ayarlanabilir. Daha sonra egzoz gazı emisyonu örnekleme, daha önceden tanımlanan gerçek dünya operasyonunun belirli bir tipini yansıtmak için tasarlanmış sürüş çevrimi ile gerçekleştirilir (Barlow ve ark. 2009).

Hız ve motor yükü değişimlerine bağlı olarak çevrimler sabit çevrim ve değişken çevrim olarak ikiye ayrılır. Sabit çevrim değişmeyen bir hız ve motor yükü modlarının bir dizisidir. Bu tür çevrimler ağır ticari dizel araç motorlarını test etmek için kullanılır (Barlow ve ark. 2009).

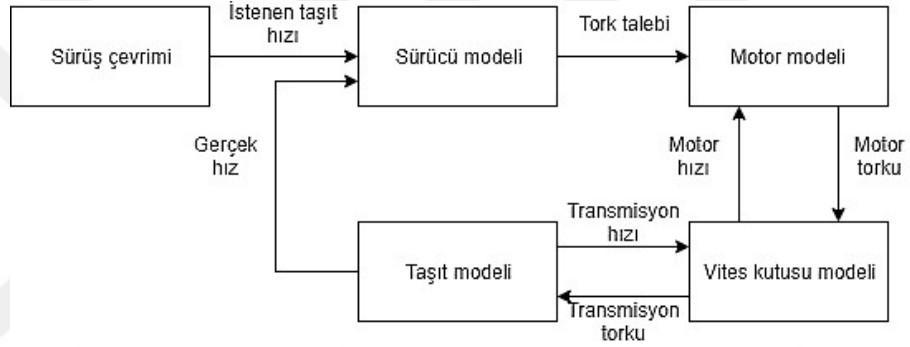
Sürüş çevrimleri belirli trafik koşulları/alışkanlıkları için ve ABD, Avrupa ya da Japonya gibi belirli bir şehir ya da ülkede kullanılan araçlar için lokal/ulusal tabanlı geliştirilebilir (Giakoumis 2017). Yaygın olarak bilinen sürüş çevrimleri Şekil 2.13'te verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) 3. bölümde detaylandırılmıştır.



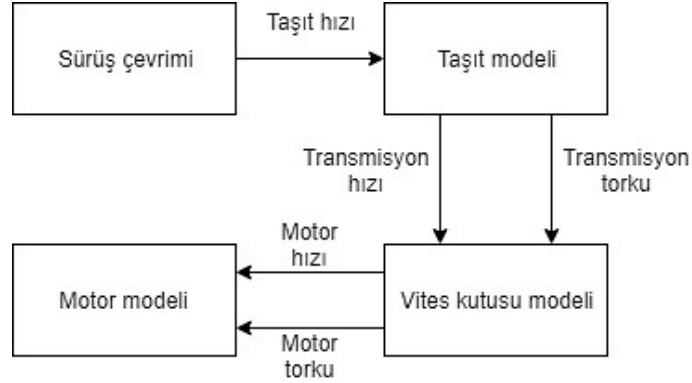
Şekil 2.13. Farklı sürüş çevrimi örnekleri (Barlow ve ark. 2009)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Taşıt sürüş çevrimi modelleri ileriye dönük ve geriye dönük olmak üzere iki farklı şekilde modellenebilir. İleriye dönük modellemelerde (Şekil 3.1 a) başlangıç noktası olarak sürücü alınır ve bir hız-zaman profilini takip etmesi için sürücünün gaz pedalı ya da fren pedalına basması gibi davranışları sinyal olarak türetilir (Chubbock ve Clague 2016). Temel bir sürücü modeli bir ya da daha fazla PI kontrolcüsü aracılığıyla gerekli hız profilini referans alarak tork talebini karşılar. Güç kaynağının ürettiği tork aktarma organları ile tekerleklere iletilir. Geriye dönük modellemenin aksine taşıta bir hız profili uygulanmaz ve bu nedenle gerçek taşıt ile arasında bir hata payı oluşur. Bu hata payı sürücü modeli ile en aza indirilir (Ehsani ve ark. 2018).



(a)



(b)

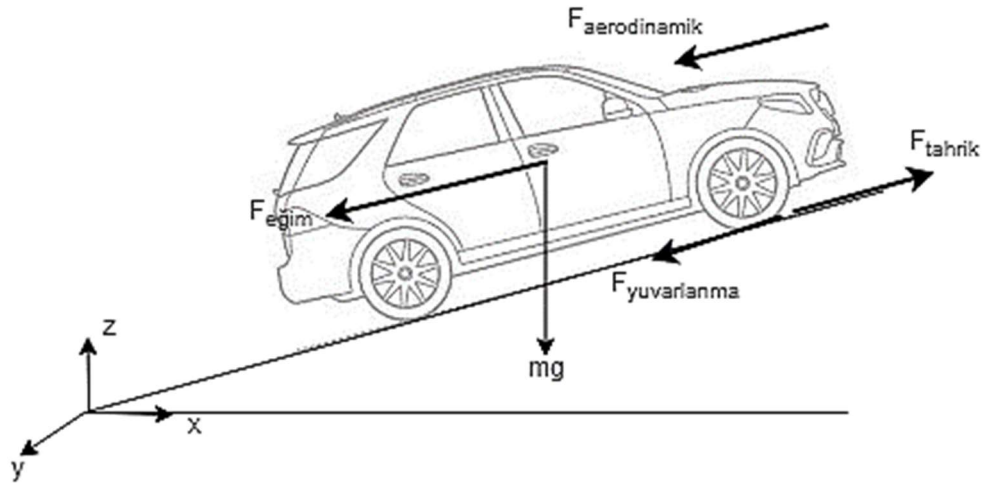
Şekil 3.1. İleriye dönük (a) ve geriye dönük (b) taşıt modeli (Chubbock ve Clague 2016)

Geriye dönük modellemelerde (Şekil 3.1 b) ise bir sürücü modeline gerek duyulmaz, başlangıç noktası olarak bir sürüş çevrimi alınır. Bu tür modellerde tekerleklerdeki açısal hızı ve torku hesaplamak için hız profili taşıt modeline tanımlanır. Sürüş çevrimi hızına bağlı olarak taşıtın ivmelenmesi ve araca etki eden direnç kuvvetleri hesaplanarak gerekli

olan çekiş kuvveti belirlenir. Ardından çekiş sistemi hattı üzerindeki her bir aktarma organının verim haritaları ya da verim modelleri vasıtasıyla tekerleklerden geriye doğru gidilir. Konvensiyonel bir araç olması durumunda içten yanmalı motorun tork ve açısal hızı ya da elektrikli veya hibrit bir araç için elektrik motorunun tork ve açısal hızı elde edilir. Geriye dönük modelleme, yakıt tüketimi ve emisyonların hesaplanmasında uygun bir yöntemdir. Ana eksikliği ise sürüş çevriminin önceden bilinmesi gerekir ve bu nedenle bir geri besleme ya da kontrol sistemi bulunmaz (Ehsani ve ark. 2018).

3.1. Taşıta Etki Eden Direnç Kuvvetleri

Taşıtın hareketi esnasında taşıta üç ana direnç kuvveti etki etmektedir. Bunlar yuvarlanma direnci, eğim direnci ve aerodinamik direnç kuvvetidir (Şekil 3.2). Taşıtın hareket edebilmesi için bu direnç kuvvetlerini yenmesi gerekir.



Şekil 3.2. Taşıta etki eden direnç kuvvetleri

3.1.1. Yuvarlanma Direnci

Yol ile tekerleğin yola temas eden kısmın arasında meydana gelen sürtünmeden dolayı oluşan direnç kuvvetidir. Yuvarlanma direnci en genel haliyle Eşitlik 3.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$F_{\text{yuv}} = \mu \cdot m_t \cdot g \cdot \cos(Gr) \quad (3.1)$$

Burada,

μ yuvarlanma direnç katsayısını (-),

m_t taşıt ağırlığını (kg),

g yer çekimi ivmesini (m/s^2) ve

Gr yolun eğim açısını ($^\circ$)

ifade etmektedir. Yuvarlanma katsayısı lastik özelliklerine, yolun asfalt, beton, toprak ya da çakıllı olması vb. gibi çeşitli faktörlere göre farklı değerler alır. Asfalt yol için yuvarlanma direnç katsayısı genellikle 0.013 gibi sabit bir değer kabul edilerek taşıta etki eden yuvarlanma direnci bulunabilir. Yuvarlanma direncinin bir başka ifadesi ise Eşitlik 3.2'deki gibidir.

$$F_{yuv} = (f_{r,\text{ön}} \cdot m_{\text{ön}} + f_{r,\text{arka}} \cdot m_{\text{arka}}) \cdot g \cos(Gr) \quad (3.2)$$

F_{yuv} yuvarlanma direnci (N),

$f_{r,\text{ön}}$ ve $f_{r,\text{arka}}$ ön ve arka tekerleklerin yuvarlanma direnç katsayısı,

$m_{\text{ön}}$ ve m_{arka} ön ve arka akslara binen yük (kg),

g yer çekimi ivmesi (m/s^2),

Gr yolun eğim açısı ($^\circ$)

Bu eşitlikte yuvarlanma direnç katsayısı ön ve arka tekerlekler için ayrı ayrı hesaplanmaktadır ve taşıt hızına bağlı olarak değişkendir. Bu katsayılar aşağıdaki bağıntılar yardımıyla bulunabilir.

$$\alpha = \beta \left(k_1 - k_2 \frac{p}{p_r} \right)$$
$$a_{\text{ön}} = \alpha \cdot \frac{(k_1 - k_2) \cdot 400}{\frac{m_{\text{ön}}}{2}}$$

$$f_{r,\text{ön}} = a_{\text{ön}} + b \left(\frac{v}{3,6} \right)$$

$$a_{\text{arka}} = \alpha \cdot \frac{(k_1 - k_2) \cdot 400}{\frac{m_{\text{arka}}}{2}}$$

$$f_{r,\text{arka}} = a_{\text{arka}} + b \left(\frac{v}{3,6} \right)$$

α , β , k_1 , k_2 , $a_{\text{ön}}$, a_{arka} ve b katsayılarıdır,
 p ve p_r lastiğe ait basınç değerleri,
 $m_{\text{ön}}$ ve m_{arka} sırasıyla ön ve arka aksa binen ağırlıklar,
 v taşıt hızıdır (km/h).

3.1.2. Eğim Direnci

Bir araç yokuş yukarı tırmanırken ya da yokuş aşağı inerken taşıt ağırlığı bir direnç kuvveti oluşturur. Oluşan bu direnç kuvveti taşıt ağırlığının yola paralel olan bileşenidir ve her zaman aşağı doğrudur. Yol eğimi negatif olduğunda eğim direnç kuvvetinin yönü taşıtın ilerleme yönü ile aynı olacağından taşıtın hareketine katkı sağlar. Hesaplamalarda genellikle yolun eğimsiz olduğu kabul edilerek eğim direnci dikkate alınmaz.

$$F_{\text{eğim}} = m_t \cdot g \cdot \sin(\text{Gr}) \quad (3.3)$$

3.1.3. Aerodinamik Direnç Kuvveti

Taşıtın hareketi esnasında meydana gelen düşük ve alçak basınç bölgelerinin oluşturduğu kuvvete aerodinamik direnç kuvveti denir. Aerodinamik direnç kuvvetinin yanal kuvvet ($F_{\text{aero,y}}$), kaldırma kuvveti ($F_{\text{aero,z}}$) ve taşıta ters yönde etki eden aerodinamik direnç kuvveti ($F_{\text{aero,x}}$) olmak üzere üç bileşeni vardır. Yanal kuvvet taşıtın viraja girmesiyle ya da rüzgarın bir açıyla etki etmesi sonucunda taşıtın sapmasına sebep olan bir moment oluşturur. Kaldırma kuvveti taşıtın üzerinden akan havanın hızının yüksek, altından akan havanın hızının ise düşük olmasından kaynaklanır ve Bernoulli denklemi ile ifade edilir.

Taşıt hareket denkleminde x doğrultusunda (Şekil 3.2) etki eden bileşen dikkate alınır ve Eşitlik 3.4 ile hesaplanabilir.

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot \left(\frac{v \pm v_r}{3,6} \right)^2 \quad (3.4)$$

Eşitlikteki

ρ havanın yoğunluğunu (kg/m^3),

C_d taşıtın sürüklenme katsayısını (-),

A_f taşıtın ön yüzey alanını (m^2)

v taşıt hızını (km/h),

v_r rüzgar hızını (km/h)

ifade etmektedir. Taşıtın hareket yönü ile rüzgarın yönü aynı ise aradaki işaret negatif, farklı ise pozitif alınır. Havanın yoğunluğu sıcaklığa ve yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir ancak sabit olduğu kabul edilerek aerodinamik direnç kuvveti hesaplanabilir.

3.1.4. Atalet Kuvveti

Taşıt üzerindeki dişliler, kardan mili, krank mili, tekerlekler gibi dönen parçaların oluşturduğu atalet taşıt performansı üzerinde etkilidir ve dikkate alınması gerekir. Bu parçaların atalet kuvvetleri tekerlek eksenine indirgenerek taşıtın etkin kütlesi bulunur. Etkin kütle taşıtın ivmesi ile çarpımı ise taşıtın atalet kuvvetini verir (Eşitlik 3.5).

$$F_{\text{atalet}} = m_{\text{et}} \cdot a \quad (3.5)$$

$$m_{\text{et}} = m_t + \sum \frac{J_t}{R_t^2} + \frac{J_m}{R_t^2} i_v^2 i_d^2 + \frac{J_p}{R_t^2} i_d^2$$

m_{et} etkin kütle (kg),

a taşıtın ivmesi (m/s^2),

m_t taşıt ağırlığı (kg),

- J_t tekerleklerin polar atalet momenti (kgm^2),
- J_m motorun polar atalet momenti (kgm^2),
- J_p kardan mili polar atalet momenti (kgm^2),
- R_t tekerlek etkin yarıçapı (m),
- i_v vites kutusu aktarma oranı (-),
- i_d diferansiyel aktarma oranıdır (-).

Dönen parçalar eşitlikte de görüldüğü gibi taşıt ataletinin artmasına sebep olmaktadır ve taşıt performansını etkilemektedir. Etkin kütle taşıtın hangi vites konumunda olduğuna bağlı olarak değişmektedir.

3.1.5. Taşıt Hareket Denklemi

Bir taşıtın hareketi Newton'un II. hareket yasası ile ifade edilebilir. Bir nesneye etki eden net kuvvet nesnenin hareketini yönetir. Taşıtlar için hareket kanunu Eşitlik 3.6 ile ifade edilir.

$$F_{\text{tahrik}} - F_{\text{direnc}} = m_{\text{et}} \cdot a \quad (3.6)$$

$$F_{\text{direnc}} = F_{\text{yuv}} + F_{\text{aero}} + F_{\text{egim}}$$

Toplam direnc kuvvetleri Eşitlik 3.7'deki gibi taşıt hızının bir fonksiyonu olarak da ifade edilebilir.

$$F_{\text{coastdown}} = F_0 + F_1 v + F_2 v^2 \quad (3.7)$$

Eşitlikteki

- F_0 sabit yol yükü katsayısı (N),
- F_1 doğrusal yol yükü katsayısı ($\text{N}/(\text{km}/\text{h})$),
- F_2 ikinci dereceden yol yükü katsayısını ($\text{N}/(\text{km}/\text{h})^2$)

ifade eder. Bu katsayılar araç vites konumunda değilken düz bir yolda gerçekleştirilen standartlaştırılmış testler ile belirlenir.

Eşitlik 3.6'ya göre taşıtın hareketi için üç durum söz konusudur,

$$\begin{cases} a = 0 & F_{\text{tahrik}} = F_{\text{direnç}} , \\ a > 0 & F_{\text{tahrik}} = F_{\text{direnç}} + m_{\text{et}} \cdot a , \\ a < 0 & F_{\text{tahrik}} = F_{\text{direnç}} - m_{\text{et}} \cdot a . \end{cases}$$

Taşıt sabit hızda ilerliyorsa tahrik kuvveti direnç kuvvetlerine; hızlanıyorsa tahrik kuvveti direnç kuvvetleri ile atalet kuvvetinin toplamına; yavaşlıyorsa tahrik kuvveti direnç kuvvetleri ile atalet kuvvetinin farkına eşittir. Taşıtın hareketi için güç kaynağı (İYM ya da elektrik motoru) tahrik kuvvetine bağlı olarak güç üretir. Güç kaynağının tekerleklere ilettiği güç, toplam direnç kuvvetleri ile taşıt hızının çarpımından bulunur (Eşitlik 3.8).

$$P_{\text{tahrik}} = \left(\mu \cdot m_t \cdot g \cdot \cos(Gr) + m_t \cdot g \cdot \sin(Gr) + \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot \left(\frac{v \pm v_r}{3,6} \right)^2 + m_{\text{et}} \cdot a \right) \frac{v}{3600} \quad (\text{kW}) \quad (3.8)$$

3.2. İçten Yanmalı Motora Sahip Bir Aracın Yakıt Tüketimi ve Emisyon Hesabı

İçten yanmalı motorların yakıt ekonomisi özgül yakıt tüketimi ile tanımlanır. Her içten yanmalı motorun kendine ait bir özgül yakıt tüketimi haritası mevcuttur ve motorun farklı çalışma noktaları için yakıt tüketim değerleri farklılık gösterir. Herhangi bir çalışma noktasındaki anlık yakıt tüketimini bulmak için motor hızının ve fren ortalama efektif basıncının bilinmesi gerekir. Fren ortalama efektif basıncı teorik bir değerdir, motor üzerinden doğrudan ölçülemez. Fren ortalama efektif basıncının hesaplanabilmesi için frenleme torkunun ya da efektif torkun bilinmesi gerekir. Motor devri Eşitlik 3.9 ile ve fren ortalama efektif basıncı (bmep) Eşitlik 3.10 ile hesaplanabilir.

$$n = \frac{60 i_v \cdot i_d \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot 3,6} \quad (3.9)$$

Eşitlikteki

n motor devri (dev/dk)

i_v vites oranı,

i_d diferansiyel oranı,

v taşıt hızı (km/h),
R_t tekerlek etkin yarıçapını (m)

ifade etmektedir.

$$b_{mep} = \frac{1200 \cdot P_e}{n \cdot V} \quad (3.10)$$

Burada

b_{mep} fren ortalama efektif basıncı (bar),
P_e efektif güç(kW),
n motor devri (dev/dk),
V motor hacmi (lt),

Yakıt ekonomisi genellikle 100 km'de tüketilen yakıt miktarı ile tanımlanır ve Eşitlik 3.11'deki gibi hesaplanabilir.

$$m_y = \frac{\frac{1}{3600} \sum_0^t \dot{m}(n, b_{mep}) \cdot 100}{\rho_{yakıt} \cdot D} \quad (3.11)$$

Eşitlikteki,

m_y yakıt tüketimi (lt/100 km),
·
m_{anlık} yakıt tüketimi (kg/h)
n motor devri (dev/dk),
b_{mep} fren ortalama efektif basıncı (bar),
ρ_{yakıt} yakıt yoğunluğu (kg/lt),
D sürüş çevrimi mesafesini (km)

belirtmektedir.

Açığa çıkan CO₂ emisyonu miktarı ise tüketilen yakıt miktarı yardımıyla bulunabilir,

$$m_{CO_2} = \frac{m_y \cdot \rho_{yakıt}}{0,0317} \quad (3.12)$$

Eşitlikteki

m_{CO_2} açığa çıkan CO₂ miktarı (gr/km),

m_y tüketilen yakıt miktarı (lt/100 km)

$\rho_{yakıt}$ yakıt yoğunluğunu (kg/lt),

ifade etmektedir. Denklemdaki 0,0317 katsayısı aşağıdaki denklemde CO₂'nin katsayısı ile 0,116'nın çarpımından elde edilir (United Nations 2013):

$$m_y = \left(\frac{0,116}{\rho_y} \right) \cdot [(0,861 HC) + (0,429 CO) + (0,273 CO_2)] \quad (3.13)$$

Yakıt ekonomisini iyileştirmek için birtakım stratejiler geliştirilmiştir. Bunlara yakıt kesme ve Dur&Kalk stratejileri örnek olarak verilebilir. Yakıt kesme stratejisinde motor devrinin rölanti devrinden yüksek olması şartıyla, sürücü gaz pedalına ve debriyaja basmadığı durumlarda silindirlere yakıt gönderilmez. Bu stratejinin rölanti devrinin üzerindeki devrilerde etkin olmasının sebebi motorun durmasının önüne geçmektir. Yakıt kesme stratejisi 1000 dev/dk motor devrinin üzerindeki değerlerde etkindir. Yakıt ekonomisini arttırmaya yönelik uygulanan Dur&Kalk stratejisinde ise fren pedalına kuvvet uygulandığında ve araç vites konumunda değilken elektronik kontrol ünitesi motoru durdurmak için yakıt gönderimini ve ateşlemeyi keser.

3.3. Yakıt Pili Elektrikli Bir Aracın Yakıt Tüketimi Hesabı

3.3.1. Yakıt Pilinden Çekilen Güç ve Tüketilen Hidrojen Miktarı

Taşıtın hareketi için talep edilen güç yakıt pili tarafından elektrik motoruna gönderilir ve elektrik motorunda bu gücün bir kısmı kayba uğrayarak çekiş sistemi iletim hattı ile tekerleklere iletilir. Silecekler, radyo, ışıklar, klima vb. gibi yardımcı sistemler için gerekli olan güç de yakıt pili tarafından sağlanır. Elektrik motoru giriş gücü ve yardımcı sistemlerin gücünün toplamı yakıt pili çıkış gücünü verir. Bu güç değerinin yakıt pili verimine bölünmesiyle yakıt pilinden çekilen güç bulunur (Eşitlik 3.14). Yavaşlama ya da durma esnasında elektrik motoru enerji tüketmeyeceği için yakıt pilinden sadece yardımcı sistemler için güç çekilecektir.

$$P_{YP} = \frac{\frac{M_m \cdot \omega}{\eta_m} + P_{yard.sist.}}{1000 \cdot \eta_{YP}} \quad (3.14)$$

P_{YP} yakıt pilinden çekilen güç (kW)

M_m elektrik motoru momentini (Nm),

ω elektrik motoru açısal hızı (rad/s),

$P_{yard. sist.}$ yardımcı sistemler için gerekli olan güç (W),

η_{YP} yakıt pili verimidir.

Yakıt pilinden çekilen enerjinin hidrojenin ısı enerjisine bölünmesiyle tüketilen hidrojen miktarı bulunabilir.

$$m_{H_2} = \frac{\int P_{YP} dt}{H_{u,H_2}} \quad (3.15)$$

Eşitlikteki

m_{H_2} tüketilen hidrojen miktarı (kg)

P_{YP} yakıt pilinden çekilen güç (kW)

H_{u,H_2} hidrojenin ısı değeridir (kJ/kg).

Tüketilen hidrojen miktarının dizel yakıtı olarak karşılığı ise Eşitlik 3.16 ile hesaplanabilir.

$$m_{dizel, eşd.} = \frac{H_{u,H_2} \cdot m_{H_2}}{H_{u,dizel} \cdot \rho_{dizel}} \quad (3.16)$$

$m_{dizel, eşd.}$ tüketilen hidrojenin dizel yakıtı eşdeğeri (lt/100 km)

m_{H_2} tüketilen net hidrojen miktarı (kg)

H_{u,H_2} hidrojenin alt ısı değeri (kJ/kg)

$H_{u,dizel}$ dizelin alt ısı değeri (kJ/kg)

ρ_{dizel} dizelin yoğunluğu(kg/lt)

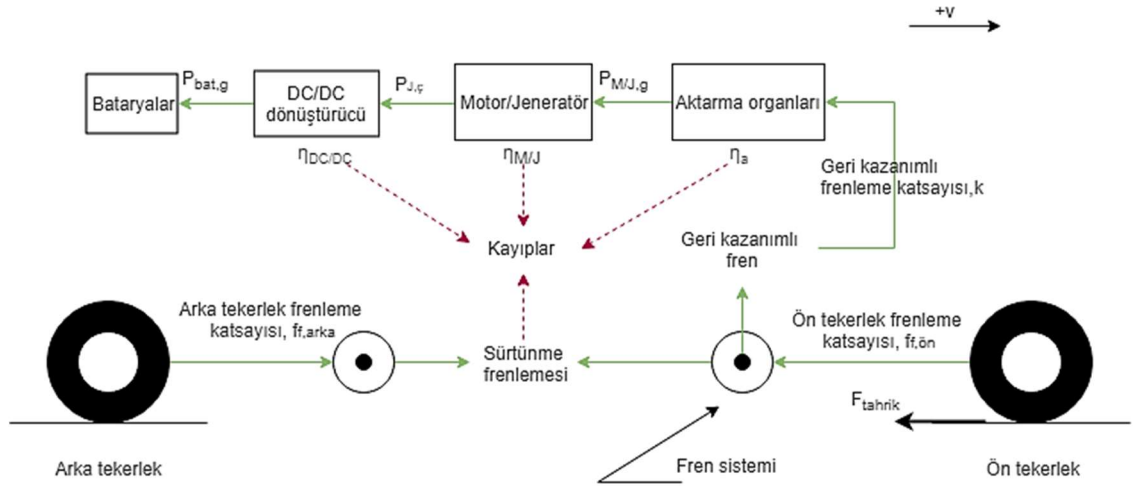
3.3.2. Rejeneratif Frenleme Enerjisi

Elektrikli ve hibrit araçlarda yavaşlama esnasında elektrik motoru bir jeneratör gibi davranarak tekerleklerdeki frenleme gücünü enerji depolama sisteminde depolar. Yavaşlama esnasında geri kazanılabilecek teorik enerji miktarı Eşitlik 3.17 ile bulunabilir.

$$E_{\text{rejen}} = \int P_{\text{fren}} dt \quad (3.17)$$

Ön ve arka tekerleklerin frenlemeye katkısı aynı değildir. Arka tekerleklerin maksimum frenleme esnasında kilitlenmesini önlemek için genelde ön tekerleklerin frenleme katsayısı daha büyüktür. Bu nedenle tekerleklerde oluşan fren kuvvetinin frenleme katsayısı ile çarpılması gerekir. Dört çeker araçlarda tekerleklerin dördü de rejeneratif frenlemeye katkı sağladığı için frenleme katsayısı (f_f) 1 olabilir, önden ya da arkadan çekişli araçlarda ise rejeneratif frenleme enerjisi sadece iki tekerlekten geri kazanıldığı için 0 ile 1 arasında bir değer alır (Lee ve ark. 2005).

Rejeneratif frenleme sistemi, fren enerjisinin tamamını geri kazanamaz, bir geri kazanım katsayısı vardır. Bu katsayı rejeneratif frenleme kontrol stratejisine göre değişkenlik gösterir (Lee ve ark. 2005). Bu katsayı ile orantılı olarak geri kazanılan enerji tekerleklerden bataryaya doğru iletilirken enerji kayıpları meydana gelir. Bu nedenle tekerleklerdeki geri kazanılan enerji iletim hattı üzerindeki her bir bileşenin verimi ile çarpılarak bataryaya giren enerji bulunur. Şekil 3.3'te tekerleklerdeki fren kuvvetinin bataryaya iletimi ve meydana gelen kayıplar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Tekerleklerdeki frenleme kuvvetinin bataryalara aktarımı (Lee ve ark. 2005)

Tekerleklerden bataryaya iletilen güç,

$$P_{bat,g} = P_{fren} \cdot f_f \cdot k_{rej} \cdot \eta_a \cdot \eta_{M/J} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{şarj} \quad (3.18)$$

eşitliği ile elde edilir. Eşitlikteki

$P_{bat,g}$ bataryaya giren güç (kW),

P_{fren} frenleme gücü (kW),

f_f frenleme katsayısı,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Dört çeker araç ise } f_f=1, \\ \text{Önden çekişli araç ise } 0 < f_{f,ön} < 1 \\ \text{Arkadan çekişli ise } 0 < f_{f,arka} < 1, f_{f,arka} = 1 - f_{f,ön} \end{array} \right.$$

k_{rej} geri kazanım katsayısı,

η_a aktarma organları verimi,

$\eta_{M/J}$ motor/jeneratör verimi,

$\eta_{DC/DC}$ DC/DC dönüştürücü verimi,

$\eta_{şarj}$ batarya şarj verimini

ifade etmektedir.

Bataryada depolanan enerji bataryaya giren gücün zamana göre integrali ile bulunur (Eşitlik 3.19).

$$E_{\text{bat,g}} = \int P_{\text{bat,g}} dt \quad (3.19)$$

Eşitlikteki

$E_{\text{bat,g}}$ bataryaya giren enerjiyi (kJ),

$P_{\text{bat,g}}$ bataryaya giren gücü (kW)

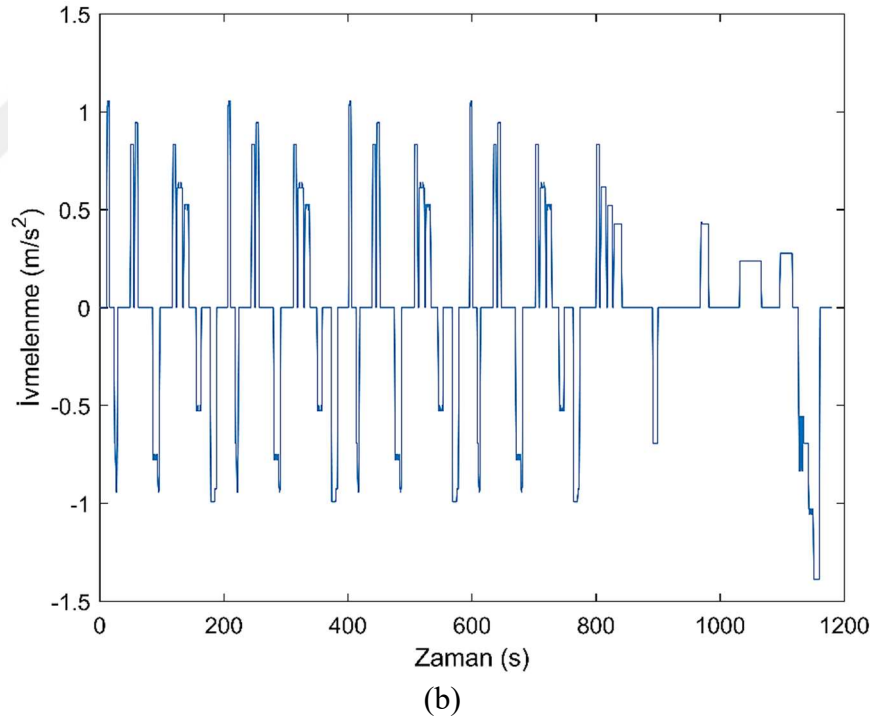
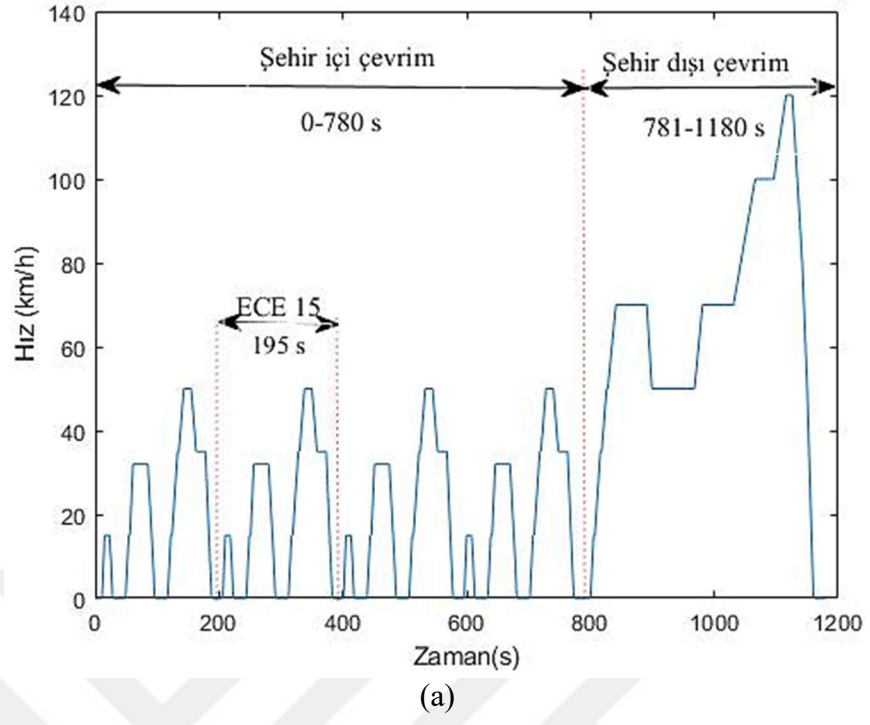
ifade etmektedir.

3.4. Model Girdileri

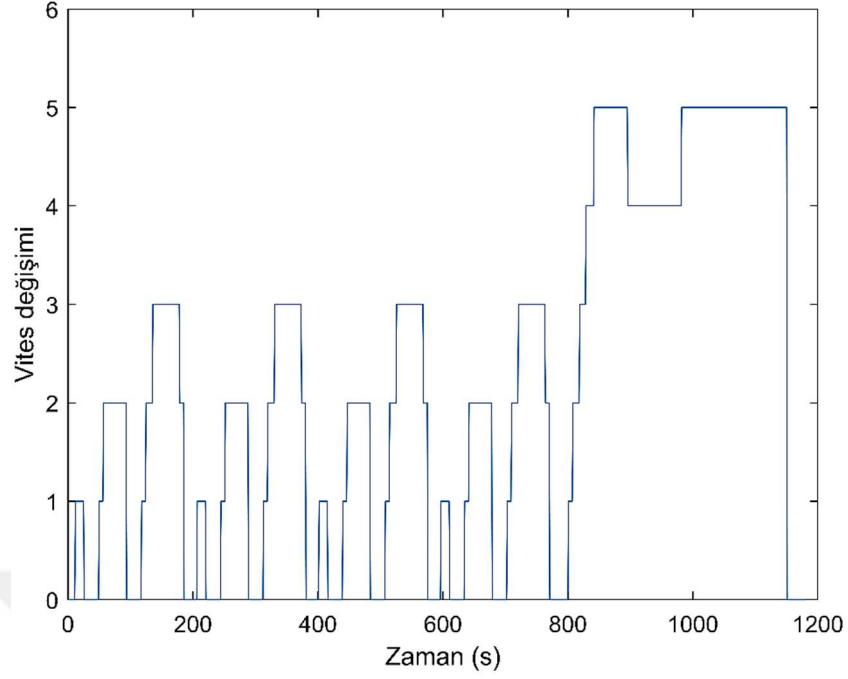
3.4.1. Sürüş Çevrimi

Oluşturulan taşıt modelleri, giriş parametresi olarak bir sürüş çevrimine ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, modellerde NEDC sürüş çevrimi kullanılarak yakıt tüketim değerleri ve emisyonlar hesaplanmıştır.

NEDC çevrimi taşıt tip onay testlerinde yaygın olarak kullanılan bir sürüş çevrimidir. Düşük taşıt hızı, düşük motor yükü ile karakterize edilmiş bir şehir içi sürüş ve onu takip eden yüksek taşıt hızı profiline sahip bir şehir dışı sürüş içermektedir. Şehir içi çevrim ECE 15 çevriminin art arda dört kez tekrar etmesiyle elde edilir ve toplam 780 saniye sürer. Çevrimin toplam süresi ise 1180 saniyedir. NEDC çevrimine ait hız profili ve ivmelenme Şekil 3.4'te ve vites değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Diğer parametreler ise Çizelge 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.4. NEDC çevrimine ait (a) zaman-hız ve (b) zaman-ivme grafiği



şekil 3.5. NEDC çevrimi boyunca zamana bağlı vites değişimi

Çizelge 3.1. NEDC çevrimi parametreleri

	şehir içi çevrim (UDC)	şehir dışı çevrim (EUDC)	Karma çevrim
Etkin sürüş süresi (s)	780	400	1180
Mesafe (km)	4,052	6,955	11,007
Maksimum hız (km/h)	50	120	120
Ortalama hız (km/h)	19	62,6	33,35
Maksimum ivmelenme (m/s^2)	1,042	0,833	1,042
Ortalama ivmelenme (m/s^2)	0,599	0,354	0,506

Sürüş çevrimine ait zaman, hız ve vites değişimleri bir Excel dosyasında matris olarak verilmiştir ve modele tanımlanmıştır.

3.4.2. Çevresel Parametreler

Modellemelerde kullanılan çevresel parametreler Çizelge 3.2'deki gibidir. Hava yoğunluğunun değişmediği, rüzgar hızının ve yol eğiminin ise sıfır olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 3.2. Çevresel parametreler

Parametre	Değer	Birim
Havanın yoğunluğu	1.226	kg/m ³
Yer çekimi ivmesi	9.81	m/s ²
Rüzgar hızı	0	km/h
Yol eğim açısı	0	°

3.4.3. Klasik Araca Ait Parametreler

Bu çalışmada geriye dönük taşıt modeli oluşturularak bir dizel aracın NEDC çevrimi boyunca herhangi bir yakıt tasarrufu stratejisi uygulanmadığında, yakıt kesme, Dur&Kalk ve her ikisinin de etkin olduğu durumlar için yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu değerleri hesaplanmıştır. Sürüş çevrimi boyunca taşıta etki eden direnç kuvvetlerinin yakıt tüketimine olan etkisi incelenmiştir. Çizelge 3.3'te taşıta ait parametreler verilmektedir.

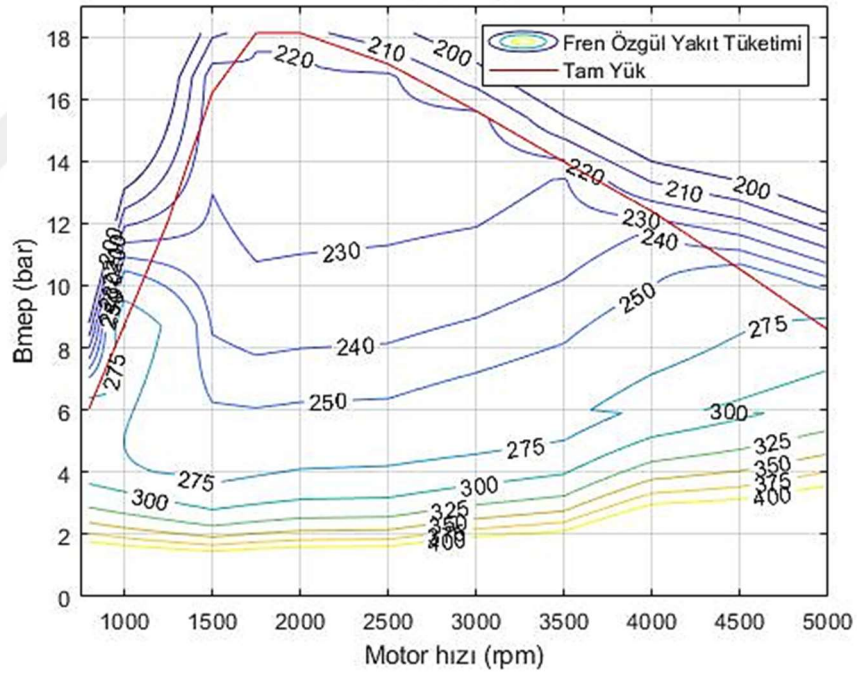
Çizelge 3.3. Klasik araca ait parametreler

Parametre	Değer	Birim
Taşıtin boş ağırlığı	1345	kg
Ön yüzey alanı	2.7	m ²
Sürüklenme katsayısı	0.38	-
Tekerlek yarıçapı	0.31	m
Motor hacmi	1.248	lt
Rölanti devri	800	d/dak
Tekerlek ve aksların polar atalet momenti	3.6248	kgm ²
Kardan mili polar atalet momenti	0	kgm ²
İYM polar atalet momenti	0.2041	kgm ²
Vites oranları ve aktarma organları parametreleri		
I. vites	4.273	-
II. vites	2.238	-
III. vites	1.444	-
IV. vites	1.029	-
V. vites	0.795	-
Diferansiyel	3.818	-
Aktarma organları verimi	0.95	-
Diferansiyel verimi	1	-

Çizelge 3.3. Klasik araca ait parametreler (devamı)

Yakıt parametreleri		
Dizel yakıtın yoğunluğu	0.835	kg/lt
Rölantideki yakıt tüketimi	0.315	kg/h
Şehir içi yakıt tüketimi kötüleştirme faktörü	1.15	-
Şehir dışı yakıt tüketimi kötüleştirme faktörü	1.03	-

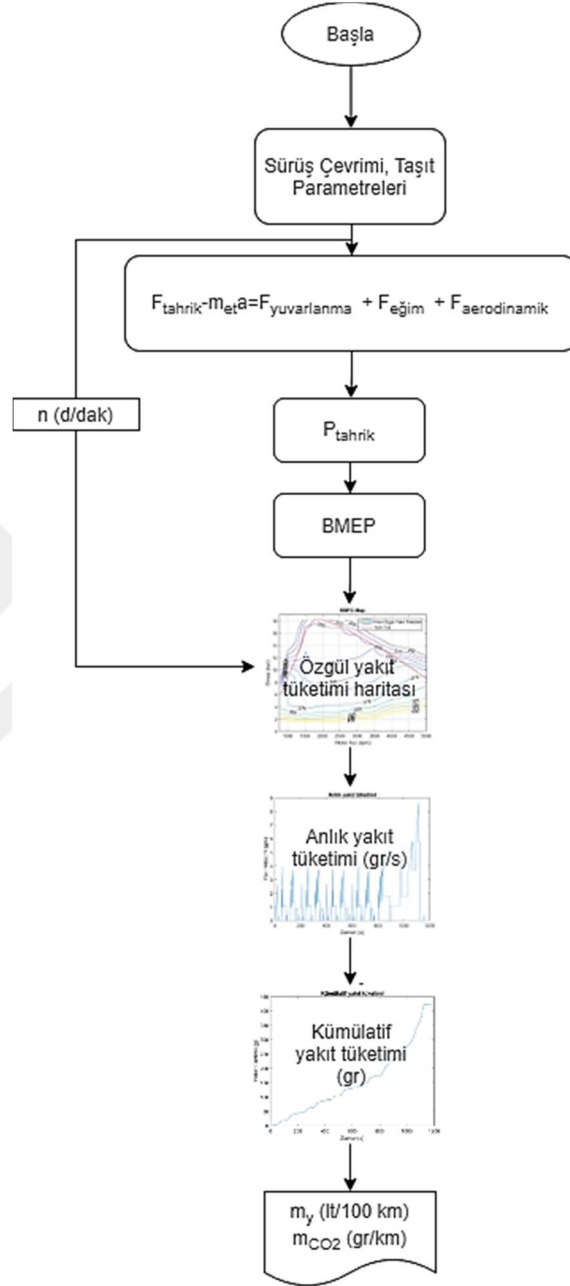
Oluşturulan modelde tanımlanan sürüş çevrimi için birer saniye aralıklarla taşıta etki eden direnç kuvvetleri ve motordan çekilmesi gereken güç hesaplanmıştır. Her saniyedeki motor hızı ve fren ortalama efektif basıncı hesaplanarak anlık yakıt tüketimi değerleri özgül yakıt tüketimi haritasından interpolasyon ile bulunmuştur. Motora ait özgül yakıt tüketim haritası (Şekil 3.6) İtalya Torino Politeknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilen deneylerde elde edilen verilerle oluşturulmuştur.



Şekil 3.6. Taşıta ait dizel motorun özgül yakıt tüketim haritası

Anlık yakıt tüketimi değerleri yardımıyla aracın şehir içi, şehir dışı ve tüm çevrim boyunca tükettiği yakıt miktarları dört durum için (Normal, Yakıt Kesme, Dur&Kalk, Yakıt kesme+Dur&Kalk) ayrı ayrı hesaplanmıştır. Modelde kullanılan özgül yakıt

tüketimi haritası rejim halindeki motor deneyleri ile elde edildiği için hesaplanan tüketim miktarları bir kötüleştirme faktörüyle çarpılmıştır.



Şekil 3.7. Klasik araç için yakıt tüketimi ve emisyon değerleri hesabı akış şeması

3.4.4. Yakıt Pili Elektrikli Araca Ait Parametreler

Çalışmanın ikinci kısmında ise aynı araç için güç kaynağı olarak içten yanmalı motor yerine yakıt pili kullanılmasının yakıt ekonomisine ne kadarlık bir katkı sağlayacağı ve

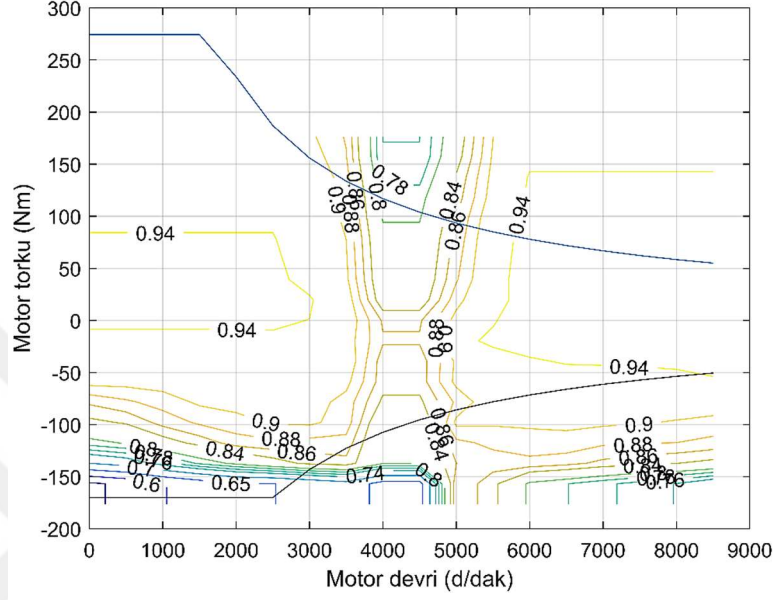
rejeneratif frenleme ile geri kazanılabilecek enerji miktarı hesaplanmıştır. Bunun için 50 kW güce sahip PEM (Proton Geçirgenli Membran) yakıt pili ve 49 kW güce sahip kalıcı mıknatıslı elektrik motoru seçilmiştir. Tek kademeli bir vites kutusu kullanılmıştır. Yardımcı sistemler için gerekli olan güç değeri 500 W olarak kabul edilmiştir. Çizelge 3.4'te tasarlanan yakıt pilli elektrikli araca ait parametreler verilmiştir. İki araç için daha doğru bir karşılaştırma yapmak amacıyla taşıt ağırlığının değişmediği kabul edilmiştir.

Çizelge 3.4. Yakıt pilli elektrikli araca ait parametreler

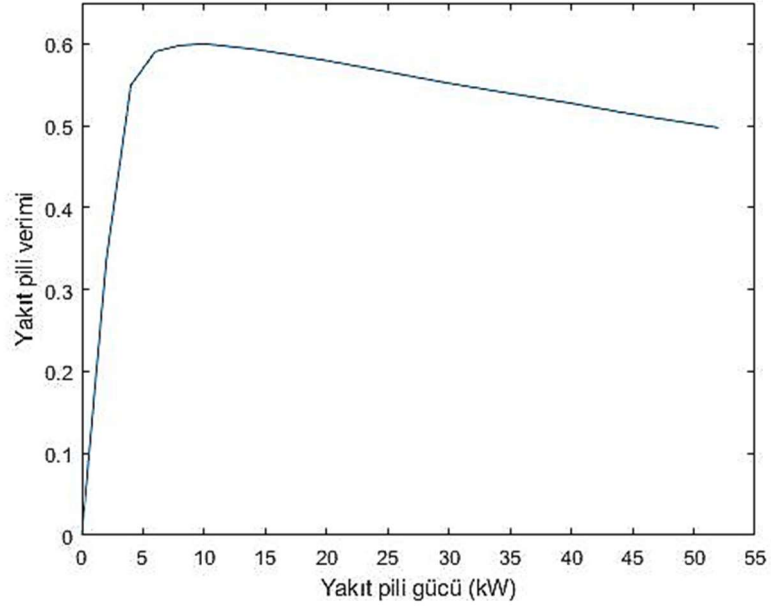
Parametre	Değer	Birim	Referans
Taşıtın boş ağırlığı	1345	kg	
Ön yüzey alanı	2,7	m ²	
Sürüklenme katsayısı	0,38	-	
Tekerlek yarıçapı	0,31	m	
Elektrik motoru gücü	49	kW	ADVISOR
Yakıt pili gücü	50	kW	ADVISOR
Toplam aktarma oranı	7,065	-	Mitsubishi i-MiEV
Aktarma organları verimi	0,95	-	
Tekerlek ve aksların polar atalet momenti	3,6248	kgm ²	
Kardan mili polar atalet momenti	0	kgm ²	
Elektrik motoru polar atalet momenti	0,0507	kgm ²	ADVISOR
Yardımcı sistemler için gerekli güç	500	W	(Friedman ve ark. 2000)
Faydalı frenleme katsayısı	0,55	-	(Popiolek ve ark. 2019)
Batarya şarj verimi	0,85	-	
DC/DC dönüştürücü verimi	0,98	-	
Hidrojenin alt ısıl değeri	120	MJ/kg	

Popiolek ve ark. (2019) “Analysis of Regenerative Braking Strategies” başlıklı çalışmalarında NEDC çevriminde tekerleklerdeki enerjinin ne kadarının geri kazanıldığını analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada NEDC çevrimi boyunca geri kazanılan frenleme enerjisini tekerleklerdeki toplam frenleme enerjisine bölerek geri kazanım oranını seri rejeneratif frenleme stratejisi için 0,55 ve paralel rejeneratif frenleme stratejisi için ise 0,24 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmadaki sonuçlar seri rejeneratif frenleme stratejisinin sağladığı faydalı frenleme katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir. Aktarma oranı ise aynı motor tipi ve gücüne sahip Mitsubishi i-MiEV’in aktarma oranı referans alınarak belirlenmiştir.

Yakıt pili sistemine ve elektrik motoruna ait verim haritaları ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) programından alınmıştır. Yakıt pili verim haritası ve elektrik motoru verim haritası sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilmiştir.

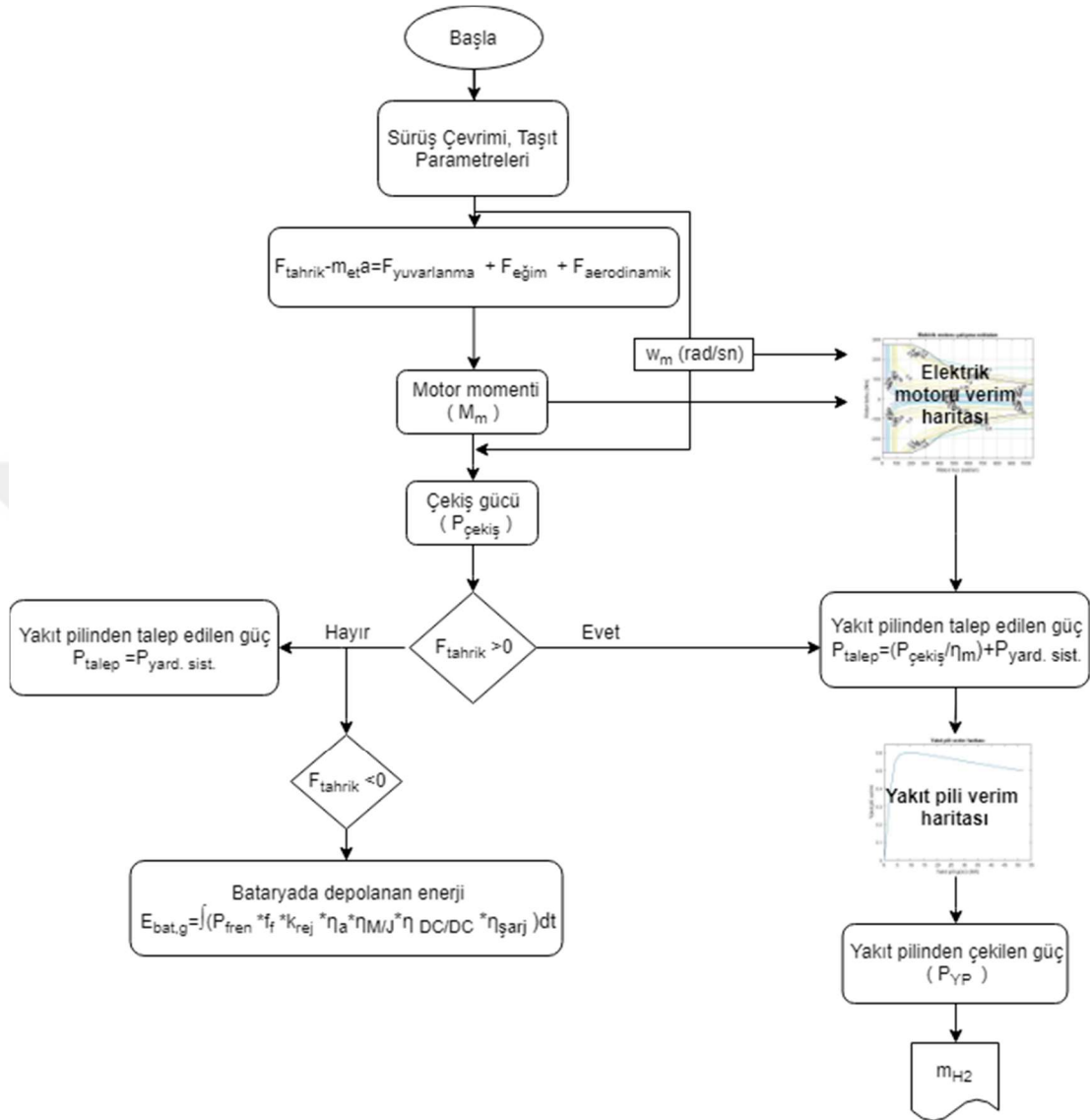


Şekil 3.8. Modelde kullanılan elektrik motorunun verim haritası



Şekil 3.9. Modelde kullanılan yakıt pilinin verim haritası

Şekil 3.10’da modelde yakıt tüketimi değerlerinin hesaplanmasında kullanılan akış şeması verilmektedir.



Şekil 3.10. Yakıt pilli elektrikli aracın yakıt tüketimi akış şeması

3.5. Model Doğrulaması

Yakıt pilli elektrikli araç için oluşturulan model “Hybridization: Cost and Efficiency Comparisons for PEM Fuel Cell Vehicles” (Friedman ve ark. 2000) başlıklı çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Friedman ve ark. (2000) yaptıkları çalışmalarında Ford Taurus aracının farklı hibrit konfigürasyonları için FTP-75 çevrimi boyunca tükettikleri hidrojen miktarlarını bulmuşlardır. Bu tez çalışmasında oluşturulan

yakıt tüketimi modelinin doğrulamasında sadece saf yakıt pilli elektrikli araca ait yakıt tüketim değerleri dikkate alınmıştır. Ford Taurus'a ait parametreler Çizelge 3.5'te verilmiştir. Klasik araç için hesaplanan değerler katalog değerleri ile karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır. Modelden elde edilen sonuçlar ve katalog değerlerinin karşılaştırması Bölüm 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Ford Taurus'a ait parametreler

Parametreler	Değerler
Taşıt ağırlığı (kg)	1500
Ön yüzey alanı (m ²)	0,27
Sürüklenme katsayısı (-)	2,18
Yuvarlanma direnç katsayısı (-)	0,007
Yardımcı sistemler için gerekli güç (W)	500
Yakıt pili sistemi gücü (kW)	74
Yakıt pili sistemi verimi (-)	0,55
Elektrik motoru gücü (kW)	74
Batarya güç yoğunluğu (kg/kW)	0
Batarya gücü (kW)	0
Batarya enerjisi (kWh)	0

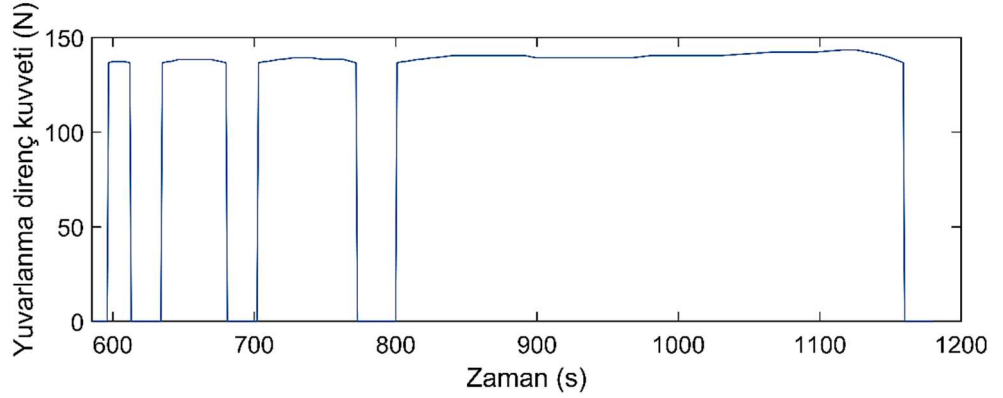
Friedman ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada elektrik motorunun verimi ile ilgili herhangi bir veri olmadığından verimi hesaplamak için ADVISOR programındaki 74 kW gücündeki bir elektrik motorunun verim haritası kullanılmıştır. Modelleme sonucunda Ford Taurus için yakıt tüketimi değeri 14,22 gr/mil olarak bulunmuştur. Friedman ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada yakıt tüketimini 14 gr/mil olarak bulmuşlardır. Aradaki fark kabul edilebilir bir değerdir ve taşıta ait veriler detaylı olmadığı için hesaplama hatalarından kaynaklanmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde modellemeler sonucunda klasik araç ve yakıt pilli elektrikli araç için hesaplanan kuvvet, güç değerleri, yakıt tüketim değerleri ve çalışma noktaları grafik olarak verilmiştir. Grafiklerin daha anlaşılabilir olması bakımından şehir içi çevrimin tamamı alınmamıştır, grafikler yalnızca son ECE15 çevrimi ve şehir dışı çevrim alınarak çizdirilmiştir. Analizlerde elde edilen sonuçlar ilgili bölümlerin sonlarında çizelgeler halinde özetlenmiştir.

4.1. Yuvarlanma Direnci Analizi

Sürüş çevrimi süresince tekerlekler etki eden yuvarlanma direncinin değişimi Şekil 4.1’de verilmektedir. Yuvarlanma direnç katsayısı taşıt hızına bağlı olarak hesaplandığı için sürüş çevrimi boyunca değişkenlik göstermektedir. Ancak Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere hızın yuvarlanma direnci üzerindeki etkisi büyük değildir. En yüksek yuvarlanma direnci değeri 143,36 N’dur. Hızın sıfır olduğu noktalarda tekerleklere bir direnç kuvveti etki etmediği için yuvarlanma direnci sıfırdır. Çevrim boyunca etki eden ortalama yuvarlanma direnç kuvveti değeri 104,4 N’dur.

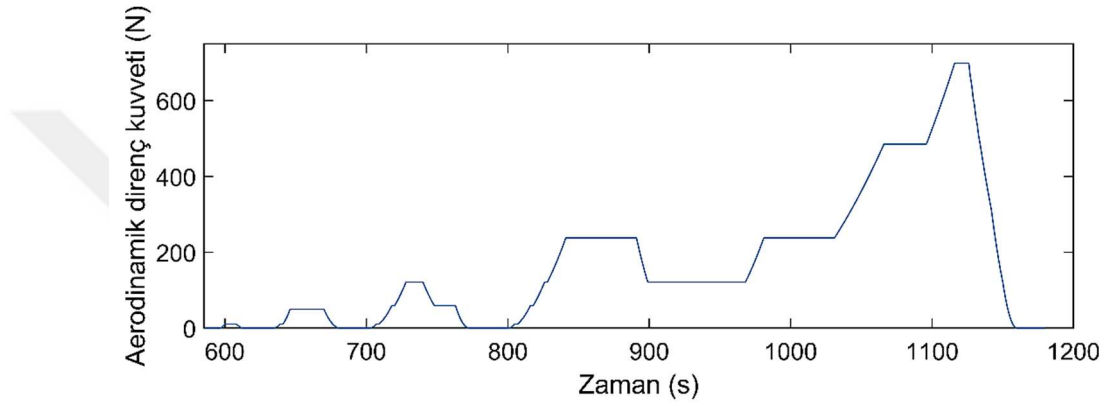


Şekil 4.1. NEDC çevrimi boyunca yuvarlanma direncinin zamana bağlı değişimi

Diğer taşıt parametreleri bu direnç kuvveti üzerinde etkili olmadığı için değerler her iki araç için de aynıdır.

4.2. Aerodinamik Direnç Kuvveti Analizi

Aerodinamik direnç kuvveti hızın karesi ile doğru orantılıdır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi çevrim boyunca aerodinamik direnç kuvvetleri hız profiline benzer bir profil oluşturmuştur. Şehir dışı çevrimde yüksek hızlara çıktığı için taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvveti şehir içi çevrime göre daha yüksektir. Taşıta etki eden en yüksek aerodinamik direnç kuvveti değeri 698,82 N’dur. Çevrim boyunca taşıta etki eden ortalama aerodinamik direnç kuvveti değeri 101,25 N’dur.

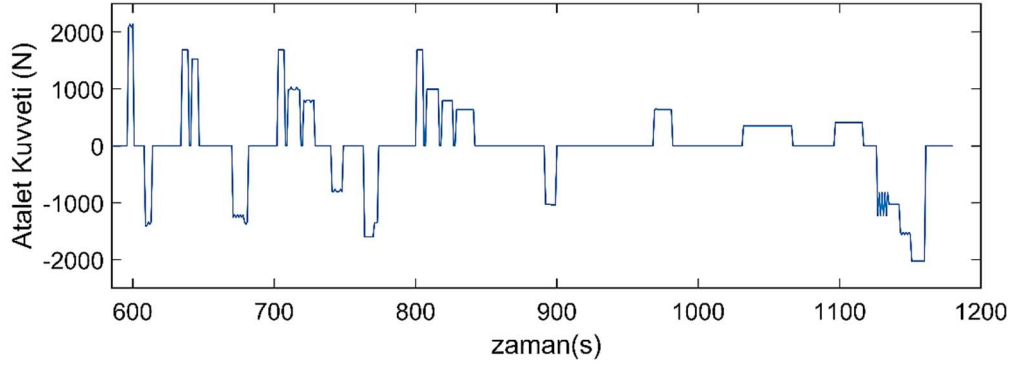


Şekil 4.2. NEDC çevrimi boyunca aerodinamik direnç kuvvetinin zamana bağlı değişimi

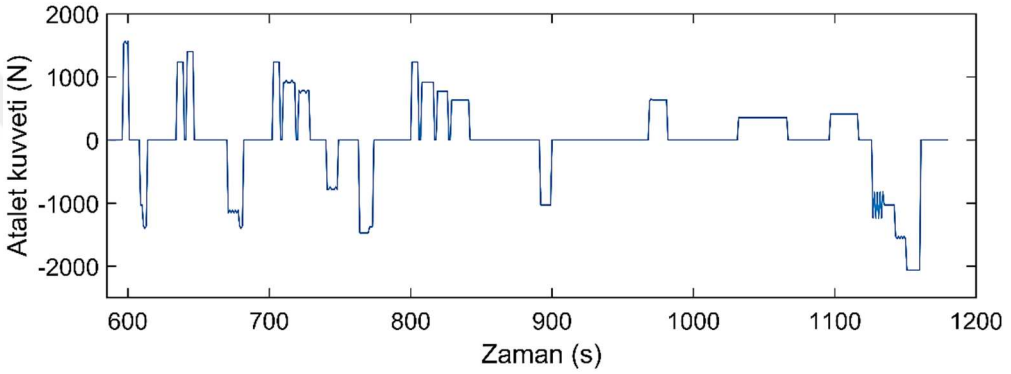
Bölüm 3’te verilen Eşitlik 3.4’te görüldüğü gibi aerodinamik direnç kuvveti taşıtın sürüklenme katsayısı ve ön yüzey alanına da bağlıdır. Bu değerlerin iyileştirilmesi ile taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvveti azaltılabilir ve böylelikle daha iyi bir taşıt performansı ve yakıt ekonomisi sağlanabilir.

4.3. Atalet Kuvveti Analizi

Atalet kuvveti eğrisi taşıtın ivmesi ile etkin kütle ile çarpımıyla değişmektedir. İvmelenmenin negatif olduğu noktalarda atalet kuvveti negatif değerler almaktadır. Etkin kütle formülünde dönen parçaların taşıt ağırlığına olan etkisinin aktarma oranı ile ilişkili olduğu görülmektedir. Klasik araç ve yakıt pilli elektrikli araçta farklı vites kutuları kullanıldığından iki ayrı atalet kuvveti eğrisi elde edilmiştir. Şekil 4.3’te klasik araca (a) ve yakıt pilli araca (b) ait atalet kuvveti grafikleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.3. NEDC çevrimi boyunca atalet kuvvetinin değişimi (a) Klasik araç (b) Yakıt pilli elektrikli araç

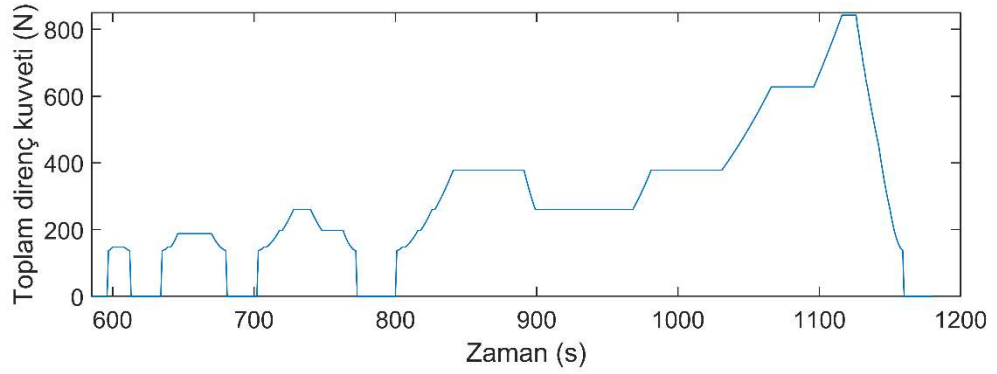
Klasik araçta vites konumu yükseldikçe aktarma oranı düştüğü için düşük vites konumlarında etkin kütle atalet kuvvetine olan etkisi artmıştır. Şehir içi çevrimi daha yüksek ivmelenme değerleri ve daha düşük vites konumlarında seyrettiği için şehir içi çevrimde atalet kuvvetlerinin etkisi daha büyüktür. En yüksek atalet kuvveti değeri 2135,4 N olarak şehir içi çevriminde ve aksi yöndeki en büyük atalet kuvveti değeri ise 2024,6 N olarak şehir dışı çevriminde hesaplanmıştır.

Yakıt pilli elektrikli araçta tek kademeli bir vites kutusu kullanılmasından dolayı çevrim boyunca etkin kütle değişmemiştir. Atalet kuvveti sadece ivmeye bağlı olarak değişmiştir. Grafikteki pozitif ivmelenme ve negatif ivmelenme için en yüksek atalet kuvveti değerleri sırasıyla 1566,5 ve 2061,2 N'dur. Yakıt pilli elektrikli aracın etkin kütle değeri klasik

aracinkinden daha düşük olduğu için hesaplanan atalet kuvveti değerleri de daha düşüktür.

4.4. Toplam Direnç Kuvveti Analizi

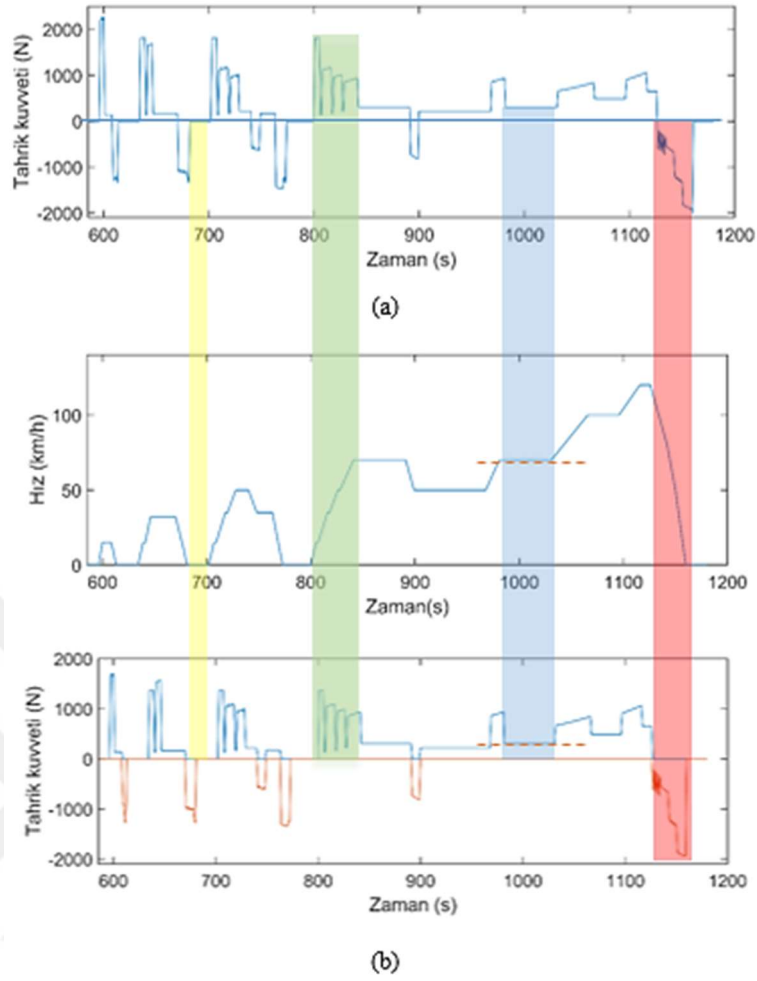
Eğim direnci, yuvarlanma direnci ve aerodinamik direncin toplamı taşıta etki eden toplam direnç kuvvetini verir. Yolun eğimsiz olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapıldığı için eğim direncinin bir etkisi yoktur, değeri sıfırdır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi taşıt hızı arttıkça taşıtın yenmesi gereken direnç kuvveti değerleri de artmaktadır. Direnç kuvvetini etkileyen parametreler iki araç için de aynı olduğundan Şekil 4.4'teki grafik her iki araç konfigürasyonu için de geçerlidir. Toplam direnç kuvvetinin en yüksek değeri 842,18 N'dur.



Şekil 4.4. NEDC çevrimi boyunca toplam direnç kuvveti değişimi

4.5. Tahrik Kuvveti ve Tahrik Gücü Analizi

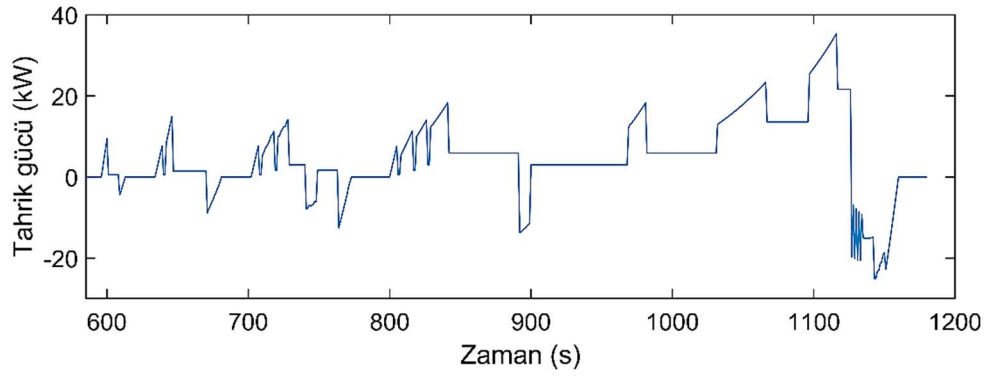
Tahrik kuvveti toplam direnç kuvveti ile atalet kuvvetinin toplamına eşittir. Şekil 4.5'te kırmızı sütun ile gösterilen bölgede görüldüğü gibi taşıt yavaşlıyorken tahrik kuvveti negatif değerler almaktadır. Taşıtın hızlandığı noktalarda (yeşil bölge) tahrik kuvveti pozitifdir. Taşıt sabit hızla hareket ederken taşıta etki eden net kuvvet değişmediği için tahrik kuvveti de sabittir (mavi bölge). Taşıtın hareket etmediği noktalarda ise herhangi bir kuvvet etki etmediği için tahrik kuvveti de sıfırdır (sarı bölge).



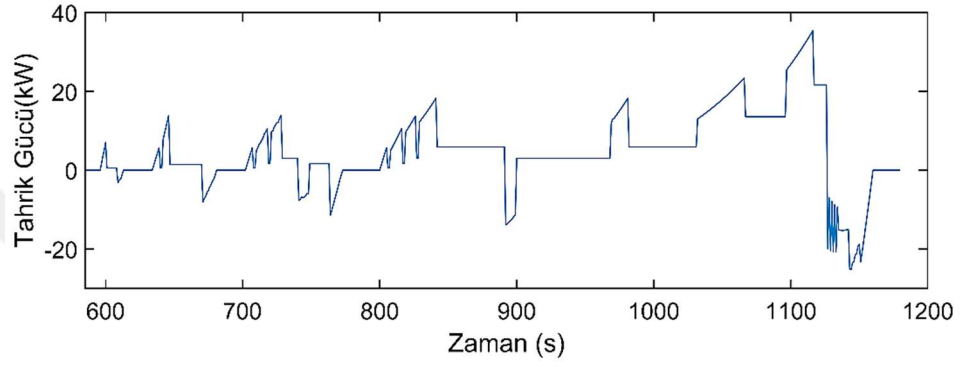
Şekil 4.5. NEDC çevrimi boyunca tahrik kuvvetinin değişimi (a) Klasik araç (b) Yakıt pilli elektrikli araç

Klasik araç için çevrim boyunca etki eden en yüksek tahrik kuvveti 2268,3 N ve en küçük tahrik kuvveti ise -1889 N'dur. Yakıt pilli elektrikli araç için ise en büyük ve en küçük tahrik kuvveti değerleri sırasıyla 1699,4 N ve -1935,6 N'dur.

Tahrik kuvvetinin taşıt hızı ile çarpılması taşıtın hareketi için gerekli olan tahrik gücünü verir (Şekil 4.6). Klasik araç için sürüş çevrimi boyunca tahrik gücünün en yüksek değeri 35,31 kW ve en düşük değeri -25,046 kW'tır. Yakıt pilli elektrikli araç için ise en yüksek tahrik gücü 35,37 kW ve en düşük tahrik gücü -25,2 kW'tır. İki araç için de en düşük değerler aynı zamanda en yüksek frenleme gücü değerleridir.



(a)



(b)

Şekil 4.6. NEDC çevrimi boyunca tahrik gücünün değişimi (a) Klasik araç (b) Yakıt pilli elektrikli araç

Çizelge 4.1’de klasik araç için ve Çizelge 4.2’de yakıt pilli elektrikli araç için modelleme sonucunda elde edilen kuvvet, güç ve enerji değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Klasik aracın maksimum ve minimum kuvvet, güç ve enerji değerleri

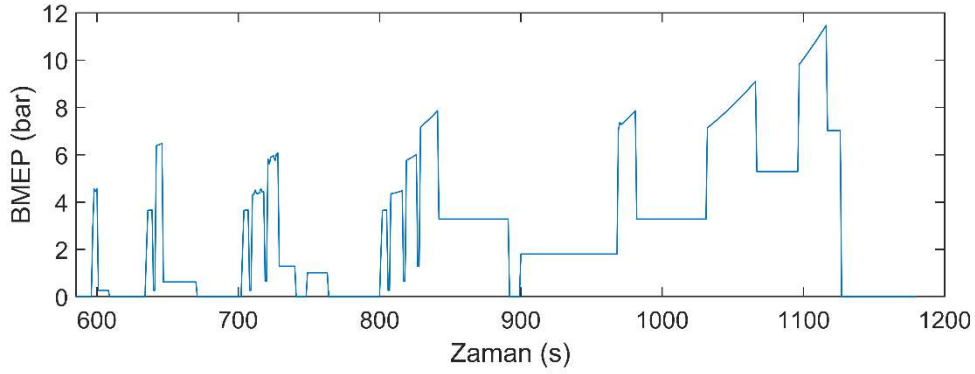
	Değer		Birim
	Maksimum	Minimum	
Etkin kütle	2023	1457,7	kg
Atalet kuvveti	2135,4	-2024,6	N
Tahrik kuvveti	2268,3	-1899	N
Tahrik gücü	35,307	-25,046	kW
Çekiş enerjisi	4,86		MJ
Frenleme enerjisi	1,35		MJ

Çizelge 4.2. Yakıt pilli elektrikli aracın maksimum ve minimum kuvvet, güç ve enerji değerleri

	Değer		Birim
	Maksimum	Minimum	
Etkin kütle	1484,1		kg
Atalet kuvveti	1566,5	-2061,2	N
Tahrik kuvveti	1699,4	-1935,6	N
Tahrik gücü	35,37	-25,2	kW
Yakıt pili çıkış gücü	39,395	0,5	kW
Yakıt pili giriş gücü	74,485	5,943	kW
Çekiş enerjisi	4,73		MJ
Frenleme enerjisi	1,30		MJ

4.6. İçten Yanmalı Motorun Çevrim Boyunca BMEP Değerinin Değişimi

Fren ortalama efektif basıncı (bme_p) motorun efektif gücü ve devrine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek motor devirlerinde bme_p değeri de yüksektir (Şekil 4.7). Tahrik gücünün negatif olduğu ve aracın viteste olmadığı noktalarda ise bme_p değeri sıfırdır.

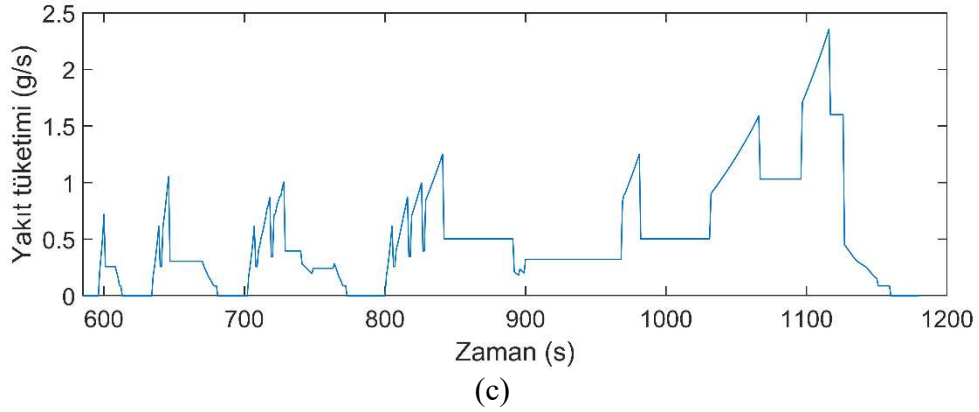
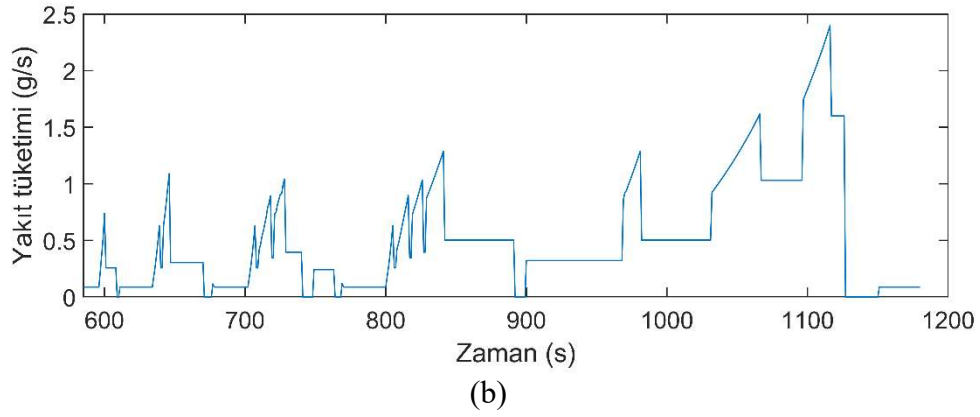
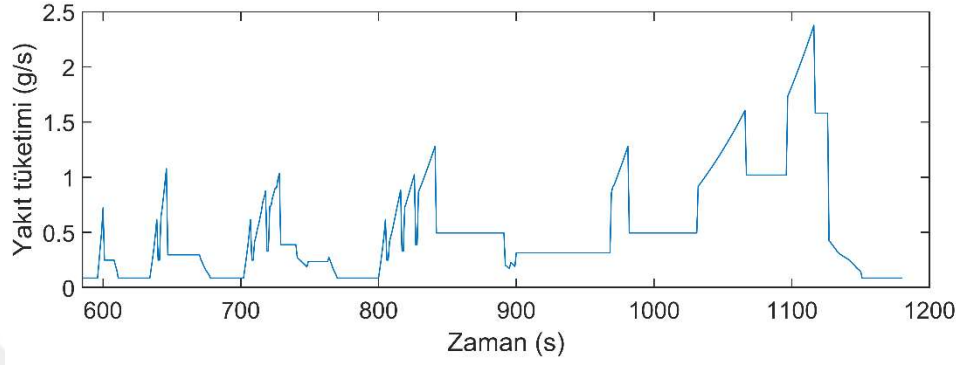


Şekil 4.7. NEDC çevrimi boyunca fren ortalama efektif basıncı (bme_p)nın zamana bağlı değişimi

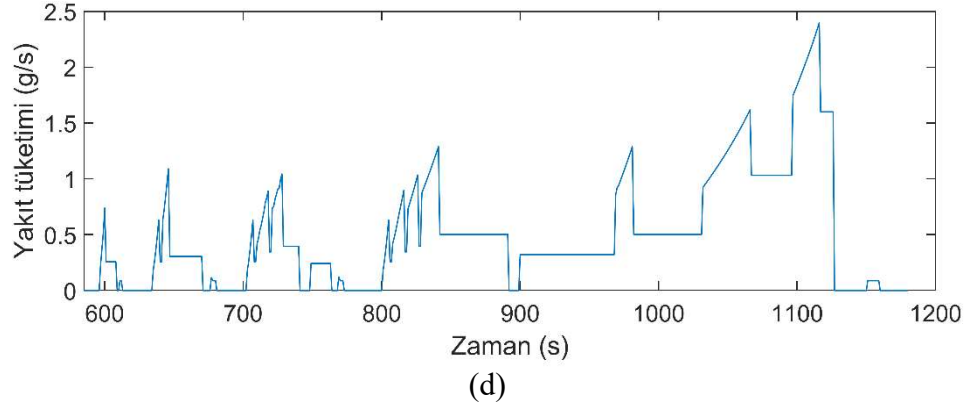
4.7. Klasik Aracın Anlık ve Kümülatif Yakıt Tüketimi Değerleri

Şekil 4.8’de normal durumda, Yakıt Kesme, Dur&Kalk ve Yakıt Kesme+Dur&Kalk stratejilerinin aktif olması durumlarındaki anlık yakıt tüketim değerleri verilmiştir. Anlık yakıt tüketimi eğrisinin Şekil 4.8’deki bme_p eğrisine benzer bir profil çizdiği görülmektedir. Dolayısıyla taşıt hızının artmasıyla yakıt tüketiminin de arttığı açıktır.

Yüksek hızlarda yakıt tüketiminin ani artış göstermesinin sebebi aerodinamik direnç kuvvetlerinin hızın karesi ile doğru orantılı olmasıdır. Bunun yanı sıra vites konumu da yakıt tüketimi üzerinde etkilidir. Yüksek vites konumlarında taşıt hızı arttıkça yakıt tüketimi de artmaktadır.



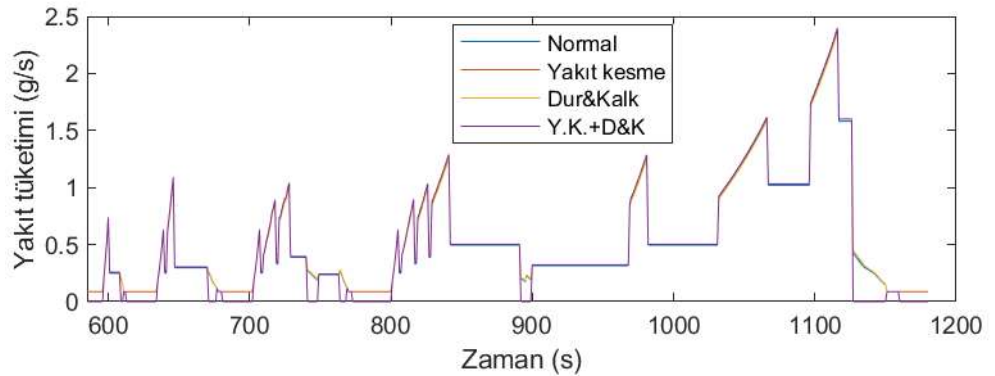
Şekil 4.8. Klasik aracın anlık yakıt tüketim değerleri (a) Normal, (b) Yakıt kesme, (c) Dur&Kalk, (d) Yakıt kesme+Dur&Kalk



Şekil 4.8. Klasik aracın anlık yakıt tüketim değerleri (a) Normal, (b) Yakıt kesme, (c) Dur&Kalk, (d) Yakıt kesme+Dur&Kalk (devam)

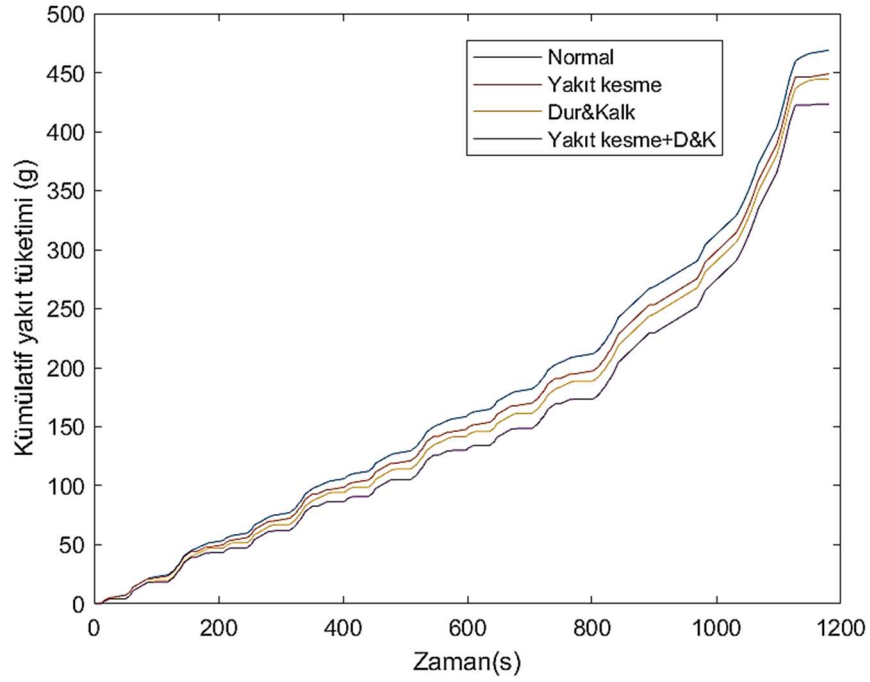
Normal durumda (Şekil 4.8 a) herhangi bir yakıt ekonomisi stratejisi uygulanmamaktadır. Araç rölanti devrindeyken de yakıt tüketmeye devam etmektedir. Yakıt kesme stratejisi uygulandığında motorun rölanti devrinin üzerindeki devirlerde yavaşlama noktalarındaki yakıt tüketiminin sıfır olduğu görülmektedir (Şekil 4.8 b). Dur&Kalk (Şekil 4.8 c) stratejisinde ise sadece araç hızının sıfır olduğu noktalarda yakıt tüketimi sıfırdır. Yakıt kesme ve Dur&Kalk stratejilerinin beraber uygulandığı durum ise Şekil 4.8 d’de verilmiştir, taşıtın yavaşlama hareketi yaptığı ve durduğu noktalarda yakıt tüketimi sıfırdır.

Dört durum için yakıt tüketimi farklılıklarının hangi noktalarda gerçekleştiğinin daha iyi anlaşılması amacıyla Şekil 4.9’da anlık yakıt tüketim eğrileri birlikte verilmiştir.

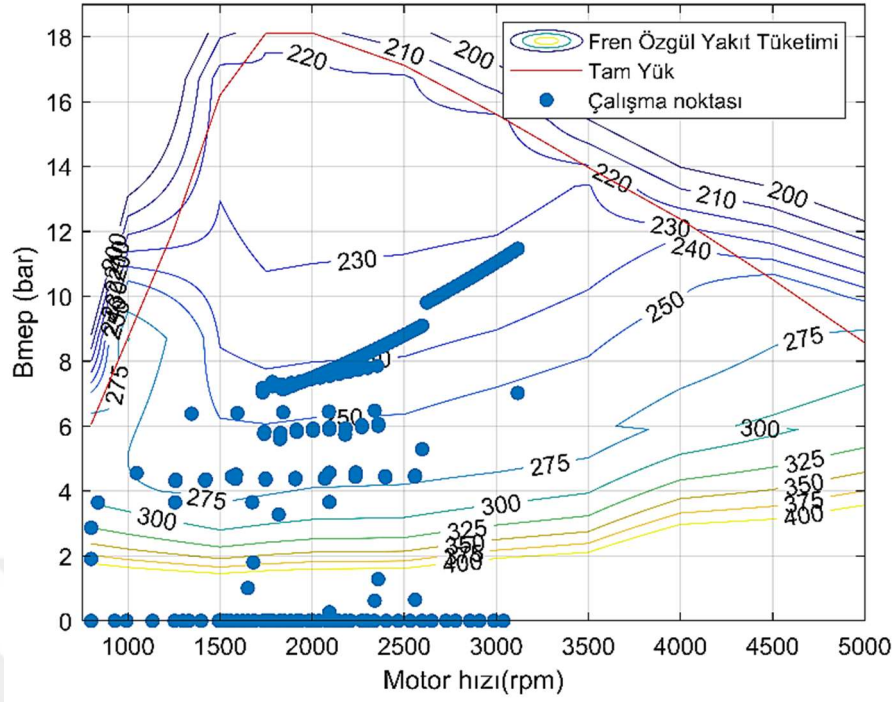


Şekil 4.9. Anlık yakıt tüketimi karşılaştırması

Şekil 4.10’da ise kümülatif yakıt tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Beklenildiği gibi yakıt kesme ve Dur&Kalk stratejisinin beraber uygulandığı durumda daha fazla yakıt ekonomisi sağlanmıştır. Bir NEDC çevrimi boyunca normal durumda 469 gr, yakıt kesme devredeyken 449 gr, Dur&Kalk stratejisi devredeyken 444 gr ve her ikisi devredeyken ise 423 gr yakıt tüketilmiştir. Görüldüğü gibi Dur&Kalk stratejisinin yakıt ekonomisine katkısı yakıt kesme stratejisine göre daha fazladır. Çevrim boyunca motorun çalıştığı noktalar ise Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Klasik araç için kümülatif yakıt tüketimi değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.11. Klasik aracın NEDC çevrimi boyunca özgül yakıt tüketim haritası üzerinde çalıştığı noktalar

4.8. Klasik Aracın Yakıt Tüketimi Değerleri

Klasik araç için modelleme doğrulaması katalog değerleri ile modelde hesaplanan yakıt tüketimi değerleri karşılaştırılarak yapılmıştır. Yakıt kesme ve Dur&Kalk stratejisi günümüzde pek çok araçta mevcut olduğu için modelde ikisinin de aktif olduğu durumdaki yakıt tüketim değerleri göz önünde bulundurularak bir karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi katalog değerleri ve model sonuçları arasındaki farklar kabul edilebilir değerlerdir. Bu farklar modellemede yapılan kabullerden ve hesaplama hatalarından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.3. Modelleme sonuçları ile katalog değerlerinin karşılaştırması

	Katalog değerleri	Modelleme sonuçları	Fark
Şehir içi çevrimi (lt/100km)	6	5,86	-0,14
Şehir dışı çevrimi (lt/100km)	4,3	4,43	0,13
Karma çevrim (lt/100km)	4,9	4,96	0,06
CO ₂ emisyonu (gr/km)	129	131,5	2,5

Çizelge 4.4'te ise tüm durumlar için yakıt tüketim değerleri verilmektedir. Şehir içi çevriminde normal durum için yakıt tüketimi değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi taşıtın dur-kalk noktalarında daha fazla yakıt tüketmesidir ve şehir içi çevrimindeki dur-kalk noktaları şehir dışı çevrimine nazaran daha çoktur. CO₂ emisyonlarının da yakıt tüketimindeki düşüğe bağlı olarak azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.4. Modellemede bulunan yakıt tüketimi ve CO₂ emisyon değerleri

	Yakıt tüketimi (lt/100 km)			CO ₂ emisyonu (gr/km)
	Şehir içi çevrimi	Şehir dışı çevrimi	Karma çevrim	
Normal	7,1	4,6	5,52	145,33
Yakıt kesme	6,61	4,5	5,28	138,94
Dur&Kalk	6,38	4,53	5,21	137,38
Yakıt kesme+Dur&Kalk	5,86	4,43	4,96	130,67

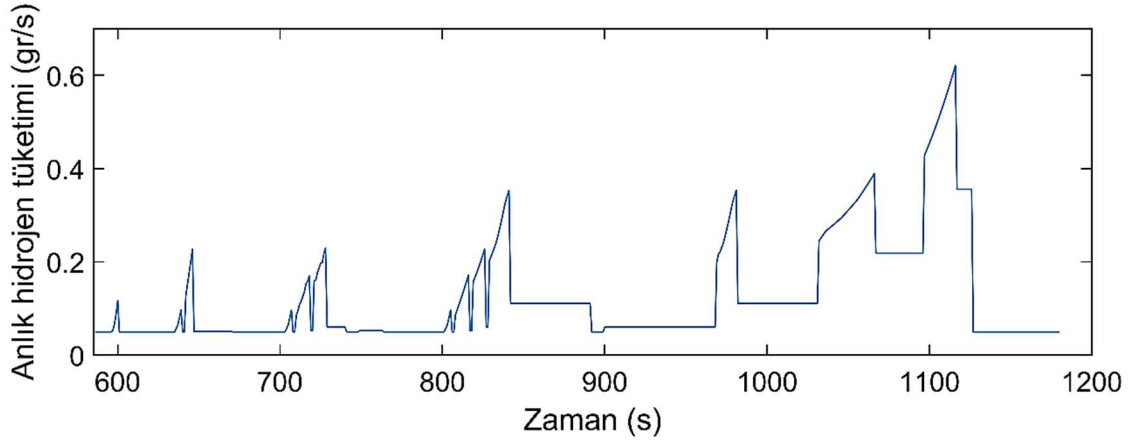
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bir klasik araçta yakıt tasarrufu teknolojileri kullanılarak %17,5 değerinde bir oran ile en fazla şehir içi sürüşlerde yakıt tasarrufu sağlanabileceği görülmektedir (Çizelge 4.5). Şehir dışı ve karma çevrim için ise bu oranlar sırasıyla %3,7 ve %10'dur.

Çizelge 4.5. Klasik araç için yüzdesel yakıt kazancı

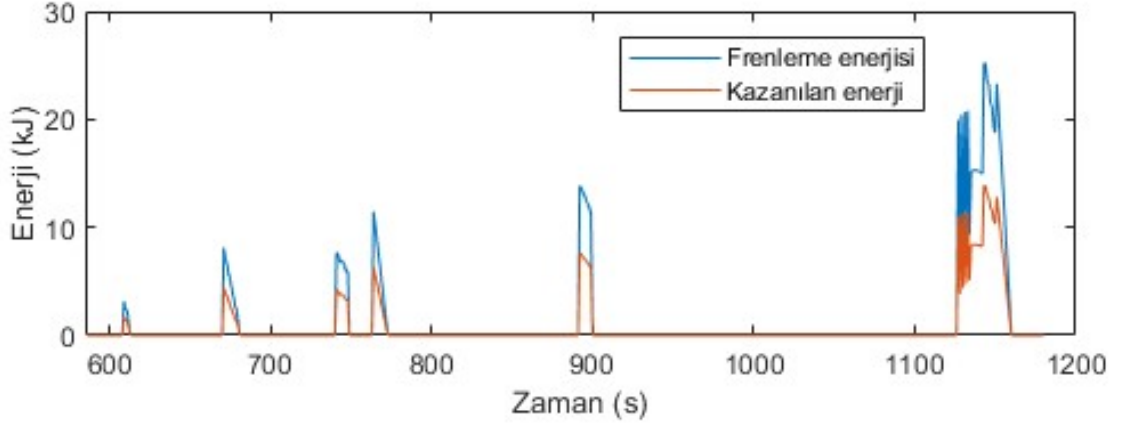
	Yakıt Kazancı (%)		
	Şehir içi çevrim	Şehir dışı çevrim	Karma çevrim
Yakıt kesme	7	2,2	4,3
Dur&Kalk	10	1,5	5,6
Y.K.+D&K	17,5	3,7	10

4.9. Yakıt Pili Elektrikli Aracın Hidrojen Tüketimi ve Geri Kazanılan Enerji

Şekil 4.12'de anlık hidrojen tüketimi (a) ve çevrim süresince yavaşlama bölgelerinde frenlemeden kazanılan enerji (b) gösterilmektedir. Negatif ivmelenmenin yüksek olduğu bölgelerde frenleme enerjisi ve dolayısıyla geri kazanılan enerji de daha yüksektir. En yüksek frenleme enerjisi 25,2 kJ'dür bu enerjinin 13,85 kJ'ü rejeneratif frenleme ile tekerleklerden geri kazanılmıştır.



(a)



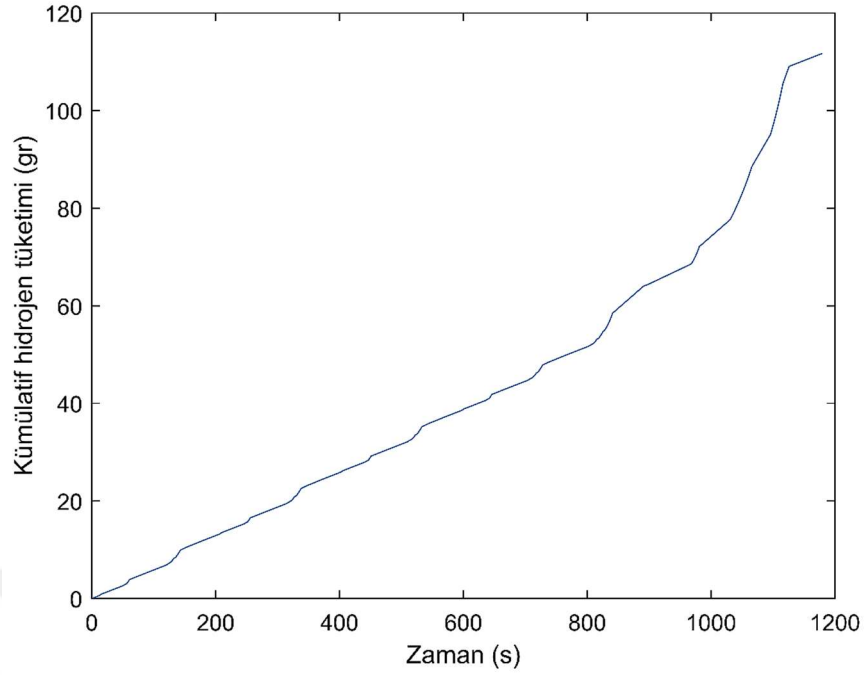
(b)

Şekil 4.12. Yakıt pilli elektrikli aracın anlık hidrojen tüketimi (a) ve rejeneratif frenleme ile kazanılan enerji (b)

Çevrim boyunca harcanan toplam frenleme enerjisi, geri kazanılan enerji miktarı ve bu enerji tekerleklerden bataryaya doğru iletilirken gerçekleşen kayıplar neticesinde bataryada depolanan enerji miktarı Çizelge 4.6’da özetlenmiştir. Kümülatif hidrojen miktarı ise 111,72 gr olarak bulunmuştur ve Şekil 4.13’te verilmiştir.

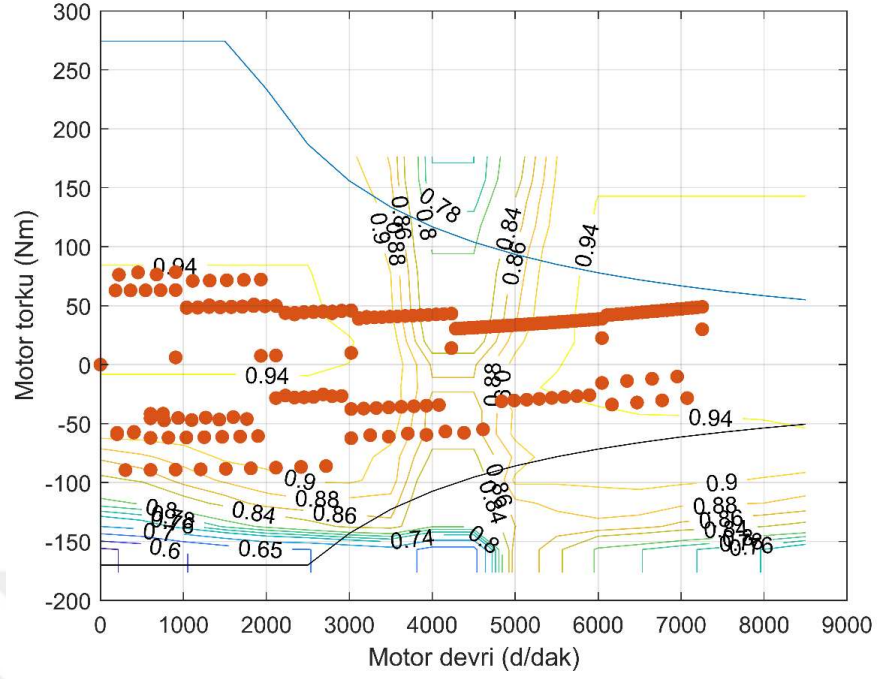
Çizelge 4.6. Frenleme enerjisinden geri kazanılan ve bataryada depolanan enerji değerleri

	Değer	Birim
Frenleme enerjisi	1,3	MJ
Geri kazanılan enerji	0,71	MJ
Bataryada depolanan enerji	0,52	MJ

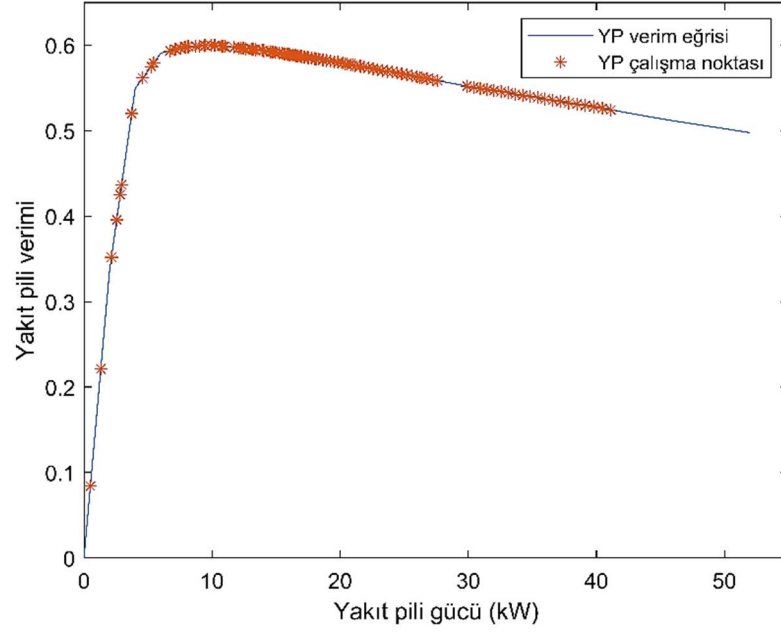


Şekil 4.13. Yakıt pilli elektrikli aracın kümülatif hidrojen tüketimi

Şekil 4.14'te ve Şekil 4.15'te sırasıyla elektrik motoru ve yakıt pilinin çevrim boyunca çalıştığı noktalar gösterilmektedir. Elektrik motoru şehir içi çevrim süresince ortalama %94, şehir dışı çevrimde %90 verimle çalışmıştır ve tüm çevrim boyunca ortalama verimi ise %93'tür. Yakıt pili ise şehir içi çevrimde ortalama %26 ve şehir dışı çevrimde %47 verimle çalışmıştır. Karma çevrimdeki yakıt pili ortalama verimi %33'tür. Yakıt pilinin ortalama veriminin düşük çıkmasının sebebi şehir içi çevrimdeki dur-kalk noktalarında sadece yardımcı sistemler için enerji sağlamasıdır. Yardımcı sistemler için gerekli olan gücün çok düşük (500 W) olmasından ve yakıt pillerinin düşük güçlerde düşük verimle çalışmasından (Şekil 4.15) kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.14. NEDC çevrimi boyunca elektrik motorunun çalışma noktaları



Şekil 4.15. NEDC çevrimi boyunca yakıt pilinin çalışma noktaları

Hesaplamalar sonucunda yakıt pilli elektrikli aracın hidrojen tüketim değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Ayrıca klasik araç ile daha doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi adına tüketilen hidrojen miktarlarının dizel eşdeğeri de tabloda mevcuttur. Yakıt pillerinde

yakıt olarak direkt hidrojen kullanıldığında herhangi bir kirletici gaz açığa çıkmadığı için emisyon değerleri sıfırdır.

Çizelge 4.7. Yakıt pilli elektrikli aracın yakıt tüketim değerleri

	Hidrojen tüketimi (kg/100 km)	Dizel eşdeğeri (lt/100km)
Şehir içi çevrimi	1,24	4,15
Şehir dışı çevrimi	0,88	2,95
Karma çevrim	1,01	3,38

5. SONUÇ

Bu çalışmada hafif ticari bir aracın klasik ve yakıt pilli konfigürasyonlarının geriye dönük modellemeleri yapılarak yakıt tüketimi değerleri hesaplanmıştır. Klasik araçlarda yakıt ekonomisini iyileştirmek amacıyla geliştirilen yakıt kesme ve Dur&Kalk stratejilerinin yakıt tüketimine sağladığı katkı bulunmuştur. Daha sonra aynı araç için uygun bir yakıt pili, elektrik motoru ve vites kutusu seçilerek yakıt pilli elektrikli araç konfigürasyonunda taşıtın yakıt tüketimi ve rejeneratif frenleme ile geri kazandığı enerji miktarı hesaplanmıştır (Şekil 5.1). İki durum için de sağlanabilecek yakıt tasarrufu yüzdeleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1. Her iki araç için NEDC çevrimi boyunca harcanan ve kazanılan enerjilerin karşılaştırılması

		Çekiş Enerjisi (MJ)	Geri Kazanılabilir Enerji (MJ)	Net Çekiş Enerjisi (MJ)	Kayıplar (MJ)
Klasik Araç	Rejeneratif frenlemesiz	4,86	0	4,86	1,35 (Fren)
	İdeal rejeneratif frenleme	4,86	1,35	3,51 (% -27)	0
Yakıt Pili Araç	Rejeneratif frenlemesiz	4,73	0	4,73	1,30
	İdeal rejeneratif frenleme	4,73	1,30	3,43 (% -27)	0
	Gerçek rejeneratif frenleme	4,73	0,71	4,23 (% -15)	0,59

Klasik araçta frenleme esnasında 1,35 MJ enerji harcanmaktadır ve herhangi bir enerji geri kazanım sistemi olmadığı için bu enerjinin bir kısmı sürtünmelere harcanırken bir kısmı da ısı olarak çevreye atılmaktadır. Yakıt pilli elektrikli araçta ise frenleme için

çevrim boyunca toplam 1,30 MJ enerji harcanmıştır. Bu enerjinin %55'i rejeneratif frenleme ile geri kazanılarak daha sonra kullanılmak üzere bataryalarda depolanmaktadır. 0,71 MJ'lük geri kazanılabilir enerji daha sonra aktarma organları, motor/jeneratör ve dönüştürücüler üzerinden geçerek bataryaya iletilmektedir. Dolayısıyla pratikte bu enerjinin de ancak belli bir kısmı değerlendirilebilmektedir.

Çizelge 5.2'de iki araç için yakıt tüketimi değerleri verilmektedir. Dizel eşdeğeri olarak tüketilen yakıt miktarları karşılaştırıldığında yakıt pilli aracın yakıt ekonomisinin klasik araçtan daha iyi olduğu görülmektedir. Yakıt pilli araç klasik araca göre şehir içi çevrimde %29, şehir dışı çevrimde %34 ve toplamda ise %32 daha düşük yakıt tüketmiştir.

Çizelge 5.2. Klasik ve yakıt pilli elektrikli araç arasındaki yakıt tüketimi değerlerinin karşılaştırılması

	Şehir içi çevrim	Şehir dışı çevrim	Karma çevrim
Klasik araç (lt/100km)	5,86	4,43	4,96
Yakıt pilli araç (lt dizel/100 km) [kg H₂/100km]	4,15 [1,24]	2,95 [0,88]	3,38 [1,01]
Fark	%-29	% -34	% -32

Sonuç olarak, hidrojenli yakıt pillerinin içten yanmalı motorlardan daha fazla yakıt ekonomisi sağladığı açık olarak görülmektedir. Çevreye salınan emisyon gazlarını büyük miktarda azaltması da yakıt pilli elektrikli araçların önemini arttırmaktadır. Ancak yakıt pilli araçların yaygınlaşabilmesi için hidrojen tanklarının ağırlığı, yakıt pili maliyetleri, sistemin soğutulması ve üretilen suyun sistemden uzaklaştırılması gibi problemlerin iyileştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Barbir, F. 2012.** PEM Fuel cells: Theory and Practice. Academic Press. London, 453 pp.
- Barlow, T. J., Latham, S., Mccrae, I. S., Boulter, P. G. 2009.** A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. TRL Limited. UK, 276 pp.
- Boretti, A. 2011.** Improvements of Vehicle Fuel Economy Using Mechanical Regenerative Braking. *SAE Technical Paper*, 55: 35-48.
- Bridges, H. 2015.** Hybrid Vehicles and Hybrid Electric Vehicles: New Developments, Energy Management and Emerging Technologies. Nova Science Pub Inc. UK, 90 pp.
- Chan, C. C., Chau, K. T. 2001.** Modern Electric Vehicle Technology. Oxford University Press. New York, 352 pp.
- Chan, C.C. 2007.** The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95:704-718.
- Chanthanumataporn, S., Lerspalungsanti, S., Pimsarn, M. 2011.** Design of Regenerative Braking System for an Electric Vehicle (EV) Modified from Used Car. *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering* 19-21 October, 2011, Krabi.
- Chubbock, S., Clague, R. 2016.** Comparative Analysis of Internal Combustion Engine and Fuel Cell Range Extender. *SAE Int. J. Alt. Power*, 5(1):175-182.
- Das, H., Tan, C., Yatim, A. 2017.** Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,76:268-291.
- De Lucena, S. 2011.** A Survey on Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology: Electric Vehicles The Benefits and Barriers, Ed: Soylu, S., 1:13.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo S., Ebrahimi K. 2018.** Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. CRC Press. London, 546 pp.
- El-Gohary, M. M. 2013.** Overview of past, present and future marine power plants. *Journal of Marine Science and Application*, 12(2):219–227.
- Emadi, A. 2005.** Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives. CRC Press. New York, 736 pp.
- Erjavec, J. 2012.** Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles. Cengage Learning. USA, 400 pp.
- Franco, A. A. 2013.** Polymer Electrolyte Fuel Cells : Science, Applications, and Challenges. Pan Stanford Publishing Pte Ltd. Singapore, 616 pp.
- Friedman, D. J., Timothy, E. L., Anthony, R. E., Sitaram, R., Karl-Heinz, H. 2000.** Hybridization: Cost and Efficiency Comparisons for PEM Fuel Cell Vehicles. *Society of Automotive Engineers Technical Paper Series*, 2000-01-3078
- Giakoumis, E. G. 2017.** Driving and Engine Cycles. Springer. Switzerland, 408 pp.
- Guzzella, L., Sciarretta, A. 2013.** Vehicle Propulsion Systems. Springer. Berlin, Heidelberg, 413 pp.
- Herrmann, F., Rothfuss, F. 2015.** Introduction to hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and off-road electric vehicles: Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, Ed: Scrosati B., Garche, J., Tillmetz, W.,3:16.
- Hoogers, G. 2002.** Fuel Cell Technology Handbook. CRC press. USA, 360 pp.
- Hordeski, M. F. 2008.** Alternative Fuels— the Future of Hydrogen. CRC Press. USA,297 pp.

- Jain, I. P. 2009.** Hydrogen the fuel for 21st century. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17):, 7368–7378.
- Kumar, A., Sehgal, M. 2018.** Hydrogen Fuel Cell Technology for a Sustainable Future: A Review. *SAE Technical Papers*, 2018-01-1307.
- Larminie, J., Dicks, A. 2003.** Fuel Cell Systems Explained. Wiley. England, 406 pp.
- Larminie, J., Lowry, J. 2012.** Electric Vehicle Technology Explained. Wiley. England, 340 pp.
- Lee, J., Nelson, D. J. 2005.** Rotating Inertia Impact on Propulsion and Regenerative Braking for Electric Motor Driven Vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* 7 September, 2005, Chicago.
- Li, X. 2007.** Thermodynamic Performance of Fuel Cells and Comparison with Heat Engines: Advanced in Fuel Cells, Ed: Zhao, T.S., Kreuer, K.D., Nguyen, T. V., 1-46.
- Liu, W. 2013.** Introduction to Hybrid Vehicle System Modeling and Control. Wiley. New Jersey, 432 pp.
- Mench, M.M. 2008.** Fuel Cell Engines. Wiley. New Jersey, 515 pp.
- Popiolek, K., Detka, T., Zebrowski, K., Malek, K. 2019.** Analysis of Regenerative Braking Strategies. *Przegląd Elektrotechniczny* 1(6):119-125.
- Riberio, B., Brito, F., Martins, J. 2010.** A Survey on Electric/Hybrid Vehicles. *SAE Technical Paper*, 2010-01-0856.
- Sharma, S., Ghoshal, S. K. 2015.** Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43:, 1151–1158.
- Singh, M. 2013.** Regenerative Braking: A Good Source of Green Energy. *International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)*, 1(4): 333–337.
- Thomas, C. 2009.** Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15):6005-6020.
- Ugurlu, A., Oztuna, S. 2015.** A comparative analysis study of alternative energy sources for automobiles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34):, 11178–11188.
- United Nations 2013.** Addendum 100: Regulation No. 101. E/ECE/324/Rev.2/Add.100/Rev.3– E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.100/Rev.3, (March 1958)
- Varocky, B.J., 2011.** Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car. <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12673.pdf>, (Erişim tarihi: 31/12/2018).
- Walker, A. M., Lamperth, M., Wilkins, S. 2010.** On Friction Braking Demand with Regenerative Braking. *SAE Technical Paper Series*, 1(3): 7–14.
- Wicks, W., Donnelly, K. 1997.** Modeling regenerative braking and storage for vehicles. *IECEC-97 Proceeding of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* 27.07-01.08, 199, Honolulu, USA.
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F. 2017.** Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40):25695-25734.
- Zhang, Q. Y., Huang, J. 2018.** Research on regenerative braking energy recovery system of electric vehicles. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 21(5): 1321–1326.

EK 1

```
close all
clear all
clc

global m_t A_f C_d R_t V ro Gr g v_r g1 g2 g3 g4 g5 d eta_a eta_d J_w
J_p J_e t v_full a_full gp_full WB CGf Wf Wr K1 K2 a_pr p b fc_idle
rpm_idle

%% BASE 1
%% Taşıt Parametreleri
m_t=1345;
A_f=2.7;
C_d=0.38;
R_t=0.31;
V=1.248;
%% Çevresel parametreler
ro=1.226;
Gr=0;
g=9.81;
v_r=0

%% Vites oranları
g1=4.273;
g2=2.238;
g3=1.444;
g4=1.029;
g5=0.795;
d=3.818;
eta_a=0.95;
eta_d=1;
J_w=3.6248;
J_p=0;
J_e=0.2041;

%% Sürüş Çevrimi verileri
NEDC=xlsread('NEDC');
t=NEDC(:,1);
v=NEDC(:,2);
gp=NEDC(:,3);

%% Yakıt Tüketimi Haritası Verileri
pq=dlmread('fuel_cons_kg_h_vers_matlab.pqm','\t');
rpm_pq=pq(1,2:end);
bmep_pq=pq(2:end,1);
fc_pq=pq(2:end,2:end);

rpm_idle=800;
km_UDC=0;
km_EUDC=0;
km_tot=0;
fc_UDC=0;
fc_EUDC=0;
fc_tot=0;
mekanik_enerji=0;
frenleme_enerjisi=0;
```

```

F0=124.7;
F1=0;
F2=0.0364;

for i=1:length(t)
%% Aktarma oranı
if gp(i)==0
    i_v=0;
    eta=0;
elseif gp(i)==1
    i_v=g1;
    eta=eta_a;
elseif gp(i)==2
    i_v=g2;
    eta=eta_a;
elseif gp(i)==3
    i_v=g3;
    eta=eta_a;
elseif gp(i)==4
    i_v=g4;
    eta=eta_a;
elseif gp(i)==5
    i_v=g5;
    eta=eta_a;
end
%% Motor devri
rpm(i)=60*i_v*d*v(i)/(2*pi*R_t*3.6);
if rpm(i)<800
    rpm(i)=800;
end
rpm_plot(i,1)=rpm(i);
%% İvmelenme
if i==1
    a(i)=0;
else
    a(i)=(v(i)-v(i-1))*1000/3600/(t(i)-t(i-1));
end

%% Açısal hız
w(i)=2*pi*rpm(i)/60;

%% Etkin kütle
m_et(i)=m_t+J_w/R_t^2+J_e/R_t^2*i_v^2*d^2;

%% Atalet kuvveti
F_atalet(i)=m_et(i)*a(i);

%% Aerodinamik direnç kuvveti
F_aero(i)=0.5*ro*C_d*A_f*(v(i)/3.6)^2;

%% Yuvarlanma direnci
a1=a_*(K1-K2*p/pr);
a_front=a1*(K1-K2*(400/(Wf/2)));
fr_front(i)=a_front+b*(v(i)/3.6);
a_rear=a1*(K1-K2*(400/(Wr/2)));
fr_rear(i)=a_rear+b*(v(i)/3.6);
Fyuv_top(i)=fr_front(i)*Wf*g+fr_rear(i)*Wr*g;

```

```

%% Eğim direnci
F_egim(i)=m_t*g*sin(Gr);

%% Direnç kuvveti
F_direnc(i)=F0+F1*v(i)+F2*v(i)^2;

%% Tahrik kuvveti
F_tah(i)=F_direnc(i)+m_et(i)*a(i);
if v(i)==0
    F_tah(i)=0;
end
%% Tahrik gücü
P_t(i)=(F_direnc(i)+m_et(i)*a(i))*v(i)/3600;
if P_t(i)>0
    Pt_pos(i)=P_t(i);
else
    Pt_pos(i)=0;
end
if P_t(i)<0
    Pt_neg(i)=P_t(i);
else
    Pt_neg(i)=0;
end
% Mekanik ve frenleme enerjileri (kJ)
if i==1
    mekanik_enerji=mekanik_enerji+Pt_pos(i)*(t(i)-0);
    frenleme_enerjisi=frenleme_enerjisi+Pt_neg(i)*(t(i)-0);
else
    mekanik_enerji=mekanik_enerji+Pt_pos(i)*(t(i)-t(i-1));
    frenleme_enerjisi=frenleme_enerjisi+Pt_neg(i)*(t(i)-t(i-1));
end
%% Motor momenti

M_m(i)=F_tah(i)*R_t/(eta*i_v);

%% Motor gücü

P_m(i)=M_m(i)*w(i)/1000;

if P_m(i)>0
    Pm_pos(i)=P_m(i);
else
    Pm_pos(i)=0;
end
if P_m(i)<0
    Pm_neg(i)=P_m(i);
else
    Pm_neg(i)=0;
end

%% BMEP Hesabı
bmep(i)=1200*P_t(i)/(rpm(i)*V*eta);
if (...)
    bmep(i)=0;
end
load_plot(i,1)=bmep(i);

```

```

%% Yakıt Tüketimi
    if (.....)
        fc(i)=fc_idle;
    elseif (...)
        fc(i)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,850,bmep(i));
    elseif (.....)
        fc(i)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm(i),0.5);
    else
        fc(i)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm(i),bmep(i));
    end
    fc_plot(i,1)=fc(i)*1000/3600;
end
%% Yakıt Tüketimi Hesabı

% Şehir içi yakıt tüketimi

for i=1:780
    if i==1
        fc_UDC=fc_UDC+fc(i)*1.15*(t(i)-0)/3600;
        km_UDC=km_UDC+v(i)*(t(i)-0)/3600;
    else
        fc_UDC=fc_UDC+fc(i)*1.15*(t(i)-t(i-1))/3600;
        km_UDC=km_UDC+v(i)*(t(i)-t(i-1))/3600;
    end
end

%Şehir dışı yakıt tüketimi

for i=781:1180
    fc_EUDC=fc_EUDC+fc(i)*1.03*(t(i)-t(i-1))/3600;
    km_EUDC=km_EUDC+v(i)*(t(i)-t(i-1))/3600;
end
%Ortalama yakıt tüketimi ve emisyon miktarı
fc_tot=fc_UDC+fc_EUDC;

for i=1:length(t)
    if i==1
        km_tot=km_tot+v(i)*(t(i)-0)/3600;
    else
        km_tot=km_tot+v(i)*(t(i)-t(i-1))/3600;
    end
end

lUDC_100km=fc_UDC/0.835/km_UDC*100
lEUDC_100km=fc_EUDC/0.835/km_EUDC*100
l_100km=(fc_UDC+fc_EUDC)/0.835/km_tot*100
m_CO2_base=0.835*l_100km/0.0315

%% CUT-OFF 2

%% BMEP Hesabı
bmep_cutoff(k)=1200*P_t_cutoff(k)/(rpm_cutoff(k)*V*eta);
if (....)
    bmep_cutoff(k)=0;
end
load_plot_cutoff(k,1)=bmep_cutoff(k);

```



```

%% Yakıt Tüketimi
    if (.....)
        fc_cutoff(k)=fc_idle;
    elseif (.....)
        fc_cutoff(k)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,850,bmep_cutoff(k));
    elseif (.....)
        fc_cutoff(k)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm_cutoff(k),0.5);
    else

fc_cutoff(k)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm_cutoff(k),bmep_cutoff(k)
);
    end

    if (.....) %Cut-off
        fc_cutoff(k)=0;
    end
        fc_plot_cutoff(k,1)=fc_cutoff(k)*1000/3600;

%% Yakıt Tüketimi Hesabı

% Şehir içi yakıt tüketimi

for k=1:780
    if k==1

        fc_UDC_cutoff=fc_UDC_cutoff+fc_cutoff(k)*(t(k)-0)/3600;

        km_UDC_cutoff=km_UDC_cutoff+v_cutoff(k)*(t(k)-0)/3600;
    else

        fc_UDC_cutoff=fc_UDC_cutoff+fc_cutoff(k)*(t(k)-t(k-1))/3600;

    end

end

%Şehir dışı yakıt tüketimi

for k=780:1180

        fc_EUDC_cutoff=fc_EUDC_cutoff+fc_cutoff(k)*(t(k)-t(k-1))/3600;

        km_EUDC_cutoff=km_EUDC_cutoff+v_cutoff(k)*(t(k)-t(k-1))/3600;

end

%Ortalama yakıt tüketimi

fc_tot_cutoff=fc_UDC_cutoff+fc_EUDC_cutoff;

for k=1:length(t)
    if k==1

        km_tot_cutoff=km_tot_cutoff+v_cutoff(k)*(t(k)-0)/3600;

    else

        km_tot_cutoff=km_tot_cutoff+v_cutoff(k)*(t(k)-t(k-1))/3600;
    end
end

```

```

end
end

lUDC_100km_cutoff=fc_UDC_cutoff*1.15/0.835/km_UDC_cutoff*100
lEUDC_100km_cutoff=fc_EUDC_cutoff*1.03/0.835/km_EUDC_cutoff*100

l_100km_cutoff=(fc_UDC_cutoff*1.15+fc_EUDC_cutoff*1.03)/0.835/km_tot_c
utoff*100
m_CO2_coff=0.835*l_100km_cutoff/0.0315

%% START&STOP 3

%% BMEP Hesabı
bmep_ss(1)=1200*P_t_ss(1)/(rpm_ss(1)*V*eta);

if (.....)
    bmep_ss(1)=0;
end
load_plot_ss(1,1)=bmep_ss(1);

%% Yakıt Tüketimi
if (.....)
    fc_ss(1)=fc_idle;
elseif (.....)
    fc_ss(1)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,850,bmep_ss(1));
elseif (.....)
    fc_ss(1)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm_ss(1),0.5);
else
    fc_ss(1)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm_ss(1),bmep_ss(1));
end
if (.....) % Start&Stop
    fc_ss(1)=0;
end
fc_plot_ss(1,1)=fc_ss(1)*1000/3600;
end

%% Yakıt Tüketimi Hesabı

% Şehir içi yakıt tüketimi

for l=1:780
    if l==1

        fc_UDC_ss=fc_UDC_ss+fc_ss(1)*(t(l)-0)/3600;

        km_UDC_ss=km_UDC_ss+v_ss(1)*(t(l)-0)/3600;
        else

        fc_UDC_ss=fc_UDC_ss+fc_ss(1)*(t(l)-t(l-1))/3600;

        km_UDC_ss=km_UDC_ss+v_ss(1)*(t(l)-t(l-1))/3600;
        end
    end
end
%Şehir dışı yakıt tüketimi

for l=781:1180

```

```

        fc_EUDC_ss=fc_EUDC_ss+fc_ss(1)*(t(1)-t(1-1))/3600;
        km_EUDC_ss=km_EUDC_ss+v_ss(1)*(t(1)-t(1-1))/3600;
    end
    %Ortalama yakıt tüketimi
    fc_tot_ss=fc_UDC_ss+fc_EUDC_ss;
    for l=1:length(t)
        if l==1
            km_tot_ss=km_tot_ss+v_ss(1)*(t(1)-0)/3600;
        else
            km_tot_ss=km_tot_ss+v_ss(1)*(t(l)-t(l-1))/3600;
        end
    end
    lUDC_100km_ss=fc_UDC_ss*1.15/0.835/km_UDC_ss*100
    lEUDC_100km_ss=fc_EUDC_ss*1.03/0.835/km_EUDC_ss*100
    l_100km_ss=(fc_UDC_ss*1.15+fc_EUDC_ss*1.03)/0.835/km_tot_ss*100
    m_CO2_ss=0.835*l_100km_ss/0.0315

%% FULL 4
%% BMEP Hesabı
    bmep_full(j)=1200*P_t_full(j)/(rpm_full(j)*V*eta);
    if (.....)
        bmep_full(j)=0;
    end
    load_plot_full(j,1)=bmep_full(j);
%% Yakıt Tüketimi
    if (.....)
        fc_full(j)=fc_idle;
    elseif (.....)
        fc_full(j)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,850,bmep_full(j));
    elseif (.....)
        fc_full(j)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm_full(j),0.5);
    else

fc_full(j)=interp2(rpm_pq,bmep_pq,fc_pq,rpm_full(j),bmep_full(j));
    end
    if (.....) %cut-off
        fc_full(j)=0;
    elseif (.....) %Start&stop
        fc_full(j)=0;
    end
    fc_plot_full(j,1)=fc_full(j)*1000/3600;

%% Yakıt Tüketimi Hesabı

% Şehir içi yakıt tüketimi

for j=1:781
    if j==1
        fc_UDC_full=fc_UDC_full+fc_full(j)*1.15*(t(j)-0)/3600;

        km_UDC_full=km_UDC_full+v_full(j)*(t(j)-0)/3600;

    else
        fc_UDC_full=fc_UDC_full+fc_full(j)*1.15*(t(j)-t(j-1))/3600;

        km_UDC_full=km_UDC_full+v_full(j)*(t(j)-t(j-1))/3600;
    end
end

```

```

end
%Şehir dışı yakıt tüketimi

for j=781:1180
    fc_EUDC_full=fc_EUDC_full+fc_full(j)*1.03*(t(j)-t(j-1))/3600;

    km_EUDC_full=km_EUDC_full+v_full(j)*(t(j)-t(j-1))/3600;
end
%Ortalama yakıt tüketimi
fc_tot_full=fc_UDC_full+fc_EUDC_full;

for j=1:length(t)
    if j==1
        km_tot_full=km_tot_full+v_full(j)*(t(j)-0)/3600;

    else
        km_tot_full=km_tot_full+v_full(j)*(t(j)-t(j-1))/3600;
    end
end

lUDC_100km_full=fc_UDC_full/0.835/km_UDC_full*100
lEUDC_100km_full=fc_EUDC_full/0.835/km_EUDC_full*100
l_100km_full=(fc_UDC_full+fc_EUDC_full)/0.835/km_tot_full*100
m_CO2=0.835*l_100km_full/0.0315

```

EK 2

```
close all
clear all
clc

global t v a m_t R_t J_w J_p J_e a_f c_d i_v eta_a d Wf Wr K1 K2 a_pr
p b ro g Pow_acc H_u

%% Sürüş çevrimi parametreleri

NEDC=xlsread('NEDC');
t=NEDC(:,1);
v=NEDC(:,2);
km_tot=0;
km_UDC=0;
km_EUDC=0;
E_rejen=0;
E_battin=0;
%% Araç parametreleri
m_t=1345;
R_t=0.31;
a_f=2.7;
c_d=0.38;
J_w=3.6248;
J_p=0;
J_e=0.0507;

%% Aktarma organları parametreleri
i_v=7.065;
eta_a=0.95;
d=1;

%% Ortam Parametreleri
ro= 1.226;
g=9.81;

%% Yakıt Pili parametreleri
P_fcell=50;
fc_eff_map=xlsread('YakitPiliVerimHaritasi');
P_fc_map=fc_eff_map(:,1);
eta_fc_map=fc_eff_map(:,2);

%% Elektrik motoru parametreleri
em_eff_map=xlsread('EMharitasi');
em_tork=em_eff_map(1,2:end);
em_w=em_eff_map(2:end,1);
eta_m_map=em_eff_map(2:end,2:end);

%% Yardımcı sistemler için gerekli güç
Pow_acc=500;

%% Yakıt ısııl değeri
H_u=120e6;

%%Rejeneratif frenleme parametreleri
k=0.55;
```

```

%% Batarya Parametreleri
eta_sarj=0.85;      ;

%% Alt Sistemlerin verimleri
eta_DCDC=0.98;

for i=1:length(t)
%% Motor devri (dev/dak)
n(i)=60*i_v*v(i)/(2*pi*R_t*3.6);

%% Motorun açısai hızı
w(i)=2*pi*n(i)/60;

%% İvmelenme
if i==1
a(i)=0;
else
a(i)=((v(i)-v(i-1))*1000/3600)/(t(i)-t(i-1));
end
%% Etkin kütle
m_et(i)=m_t+J_w/R_t^2+J_e/R_t^2*i_v^2*d^2;

%% Atalet kuvveti
F_atalet(i)=m_et(i)*a(i);

%% Aerodinamik direnç kuvveti
F_aero(i)=0.5*ro*c_d*a_f*(v(i)/3.6)^2;

%% Yuvarlanma direnci
a1=a_*(K1-K2*p/pr);
a_front=a1*(K1-K2*(400/(Wf/2)));
fr_front(i)=a_front+b*(v(i)/3.6);
a_rear=a1*(K1-K2*(400/(Wr/2)));
fr_rear(i)=a_rear+b*(v(i)/3.6);
Fyuv_top(i)=fr_front(i)*Wf*g+fr_rear(i)*Wr*g;
if v(i)==0
Fyuv_top(i)=0;
end

%% Eğim direnci
F_egim(i)=m_t*g*sin(0);

%% Direnç kuvveti
F_direnc(i)=F0+F1*v(i)+F2*v(i)^2;
%% Tahrik kuvveti
F_tah(i)=F_direnc(i)+m_et(i)*a(i);

%% Motor momenti
if w(i)==0
F_tah(i)=0;
M_m(i)=0;
P_req(i)=Pow_acc;
eta_m(i)=0;
elseif w(i)>0
M_m(i)=R_t*(F_tah(i))/(eta_a*i_v);

```

```

end
    %Motor verimi (-)

    eta_m(i)=interp2(em_w,em_tork,eta_m_map,n(i),M_m(i));

P_tekerlek(i)=F_tah(i)*v(i)*1000/3600;
%Çekiş gücü ve yakıt pilinden talep edilen güç
if F_tah(i)==0
    P_t(i)=0;
    P_req(i)=Pow_acc;
else
    P_t(i)=M_m(i)*w(i);
    if P_t(i)>0
        P_req(i)=(P_t(i)/eta_m(i))+Pow_acc;
    elseif P_t(i)<=0
        P_req(i)=Pow_acc;
    end
end
if P_tekerlek(i)>0
    P_pos(i)=P_tekerlek(i);
else
    P_pos(i)=0;
end
if P_tekerlek(i)<0
    P_neg(i)=P_tekerlek(i);
    eta_gen(i)=eta_m(i);
else
    P_neg(i)=0;
    eta_gen(i)=0;
end
%% Yakıt Pili verimi
eta_fc(i)=interp1(P_fc_map,eta_fc_map,P_req(i));
%Yakıt pilinden talep edilen güç
P_reqFC(i)=P_req(i)/eta_fc(i);

%% Çekiş enerjisi ve Frenleme Enerjisi
if i==1
    E_cekis(i)=P_pos(i)*(t(i)-0);
    E_fren(i)=P_neg(i)*(t(i)-0);
else
    E_cekis(i)=P_pos(i)*(t(i)-t(i-1));
    E_fren(i)=P_neg(i)*(t(i)-t(i-1));
end

%% Frenleme Kuvveti ve Rejeneratif enerji
if F_tah(i)<0
    F_fren(i)=F_tah(i);
    F_pos(i)=0;
elseif F_tah(i)>=0
    F_fren(i)=0;
    F_pos(i)=F_tah(i);
end

if i==1
    E_rejen=E_rejen+P_neg(i)*(t(i)-0)*(-1);
else

```

```

        E_rejen=E_rejen+P_neg(i)*(t(i)-t(i-1))*(-1);
    end

    P_rej(i)=P_neg(i)*k;
    P_battin(i)=P_neg(i)*eta_gen(i)*eta_sarj*eta_DCDC*eta_a*k;

    if i==1
        E_battin=E_battin+P_battin(i)*(t(i)-0)*(-1);

    else
        E_battin=E_battin+P_battin(i)*(t(i)-t(i-1))*(-1);

    end

end
%Her saniyede tüketilen hidrojen miktarı
for i=1:780
    if i==1
        m_UDC(i)=(P_reqFC(i)/H_u)*1000*(t(i)-0);
    else
        m_UDC(i)=(P_reqFC(i)/H_u)*1000*(t(i)-t(i-1));
    end
end
for i=781:1180
    m_EUUDC(i)=(P_reqFC(i)/H_u)*1000*(t(i)-t(i-1));
end
for i=1:1180
    if i==1
        m(i)=(P_reqFC(i)/H_u)*1000*(t(i)-0);
    else
        m(i)=(P_reqFC(i)/H_u)*1000*(t(i)-t(i-1));

    end

end

end

for i=1:780

    if i==1
        km_UDC=km_UDC+v(i)*(t(i)-0)/3600;
    else
        km_UDC=km_UDC+v(i)*(t(i)-t(i-1))/3600;
    end
end
for i=781:1180
    km_EUUDC=km_EUUDC+v(i)*(t(i)-t(i-1))/3600;
end
for i=1:length(t)
    if i==1
        km_tot=km_tot+v(i)*(t(i)-0)/3600;
    else
        km_tot=km_tot+v(i)*(t(i)-t(i-1))/3600;
    end
end
end
end

```



```
% tüketilen yakıt miktarı
m_UDC_toplam=sum(m_UDC);
m_EUDC_toplam=sum(m_EUDC);
m_toplam=sum(m);
% kümülatif yakıt tüketimi
m_cum=cumsum(m);
%1 km tüketilen yakıt miktarı
fc_base=m_toplam/km_tot
fc_UDC=m_UDC_toplam/km_UDC
fc_EUDC=m_EUDC_toplam/km_EUDC
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve TEKİN
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 29.10.1995
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Atatürk Anadolu Lisesi
Lisans : Bursa Uludağ Ün. Mühendislik Fakültesi Makine Müh. /
Otomotiv Müh. (2017)
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv
Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Uludağ Üniversitesi (2018-..)

İletişim (e-posta) : mervetekin@uludag.edu.tr