

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARACIN FİZİKSEL ENERJİ TÜKETİM TESTİ
SONUÇLARININ SİMÜLASYON SONUÇLARI İLE
KARŞILAŞTIRILMASI VE DOĞRULANMASI

OĞUZKAAN DELİGÖZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARACIN FİZİKSEL ENERJİ
TÜKETİM TESTİ SONUÇLARININ
SİMÜLASYON SONUÇLARI İLE
KARŞILAŞTIRILMASI VE
DOĞRULANMASI

OĞUZKAAN DELİGÖZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ.DR. FUAD ALİEW

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**COMPARISON AND VERIFICATION OF
THE PHYSICAL ENERGY CONSUMPTION
TEST RESULTS OF THE ELECTRIC
VEHICLE WITH THE SIMULATION
RESULTS**

OĞUZKAAN DELİGÖZ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. FUAD ALİEW

GEBZE
2023

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/01/2023 tarih ve 2023/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/02/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Oğuzkaan DELİGÖZ'ün tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç:Dr. Fuad ALİEW

ÜYE

: Dr.Öğr.Üyesi Kutluk Bilge ARIKAN

ÜYE

: Dr.Öğr.Üyesi Atilla UYGUR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Günümüzde artan enerji talebine yönelik sınırlı akaryakıt kaynakları nedeniyle ulaşımda ve birçok farklı sektörde alternatif enerji kaynakları arayışları hızla devam etmektedir. Karbondioksit salınımına ve küresel ısınmaya etkisi nedeniyle gelecekte yakıt kullanımının sınırlandırılarak bunun yerine daha temiz enerji olan elektrik enerjisinin yaygın olarak kullanılması hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, şehir içi ulaşımda günlük hayatta kullanılan bir elektrikli minibüsün UITP Project E-SORT Prosedürü'ne göre fiziksel testi yapılmıştır. Test öncesinde elektrikli minibüs; veri kaydedici, gerçek hızölçer ve diğer test ekipmanı ile donatılmış ve bu prosedüre göre uygun bir rota bulunmuştur. Bulunan bu rotada UITP Projesi E-SORT Prosedürü'ne göre Standartlaştırılmış Yol Test Döngüleri-1 (SORT-1), SORT-2 ve SORT-3 yol koşulları hesaplanarak test yolu oluşturulmuştur. Ardından prosedüre göre araç, uygun hava koşullarının olduğu zaman diliminde bu koşullarda fiziksel olarak sürülerek test edilmiştir. Fiziksel test sonucunda, aracın CAN iletişim hattından alınan verilere göre enerji tüketimi ve aracın kat edebileceği maksimum mesafe hesaplanmıştır. Daha sonra bu elektrikli minibüsün MATLAB/Simulink ortamında matematiksel modellemesi yapılmıştır. Modellemede aracın teknik ve dinamik özellikleri kullanılmıştır. UITP Projesi E-SORT prosedürüne göre simülasyon ortamında modellenen araca SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 yol koşulları uygulanmış ve aracın bu koşullarda sürülmesi sağlanmıştır. Aracın tam şarj ile gidebileceği maksimum mesafe oranları ve enerji tüketimi 3 farklı yol koşulunda hesaplanmıştır.

Çalışmanın sonunda simülasyon ortamından elde edilen veriler ile fiziksel test sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan veriler sonucunda elde edilen doğruluk oranına göre, tasarım aşamasındaki bir aracın fiziksel enerji tüketim testi öncesi alabileceği maksimum menzilin yaklaşık olarak daha düşük maliyetle bu simülasyon yardımıyla elde edilmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araç, Enerji Tüketimi Hesaplaması, Matematiksel Modelleme, Fiziksel Enerji Tüketim Testi.

SUMMARY

Today, search for alternative energy sources in transportation sectors continues rapidly.

It is aimed to limit the use of fuel in the future and to use electrical energy, which is cleaner energy, widely. In this study, a physical test of an electric minibus used in daily life was carried out according to the UITP Project E-SORT procedure. Before the test, vehicle was instrumented and a suitable route was found. The test road was created by calculating the Standardized On-Road Test Cycles-1 (SORT-1), SORT-2 and SORT-3 conditions according to the E-SORT procedure. Then, the vehicle was tested by physically driving during the time period. As a result of the physical test, the energy consumption and the maximum distance that the vehicle can communication were calculated. After that, mathematical modeling of this vehicle was done in MATLAB/Simulink environment. The technical and dynamic features of the vehicle were used in the modeling. According to the E-SORT procedure, all SORT road conditions were applied to the vehicle modeled in the simulation. Energy consumption and maximum distance rates that the vehicle can travel with a full charge were calculated in all road conditions.

End of the study, simulation results and the physical test results were compared. According to the accuracy rate, it is aimed to obtain approximately the maximum range that the vehicle can take while in the design phase before the physical test, with the help of this simulation, at a lower cost.

Key words: Electric Vehicle, Energy Consumption Calculation, Mathematical Modeling, Physical Energy Consumption Test.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve bu çalışmanın oluşmasında hiçbir desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç.Dr. Fuad ALİEW'e,

Bilgi ve tecrübesini esirgemeyerek, çalışmalarına destek olan yöneticim Hexagon Studio Araç Mühendisliği Müdürü Cüneyt ÜZÜM'e,

Süreç boyunca tüm çalışmalarına maddi ve manevi anlamda destek veren başta Hexagon Studio İnsan Kaynakları Ekip Lideri Yasemin BAYRAK olmak üzere Hexagon Studio İnsan Kaynakları Ekibi'ne,

Tezimde emeği geçen ve güzel bir çalışma ve dayanışma ortamı oluşturdukları için başta Mustafa Salim AÇIKGÖZ ve Kaan AZAK olmak üzere tüm Hexagon Studio Test ve Doğrulama Ekibi'ne,

Tüm destek ve anlayışlarıyla her zaman yanımda olan değerli eşime ve başta aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	4
2. LİTERATÜR TARAMA BİLGİLERİ	6
2.1. Elektrikli Araçlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar	6
2.2. Elektrikli Araçlar	8
2.2.1. Tümü Elektrikli Araçlar	11
2.2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar	12
2.2.2.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar	13
2.2.2.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar	14
2.2.2.3. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar	14
2.2.3. Karmaşık Hibrit Elektrikli Araçlar	15
2.3. Elektrikli Aracı Oluşturan Birimler	15
2.3.1. Güç Üretim Birimleri	16
2.3.1.1. DC Motor	17
2.3.1.2. Asenkron Motor	18
2.3.1.3. Sürekli Mıknatıslı Motorlar	18
2.3.1.4. Anahtarlama Relüktans Motorları	18
2.3.2. Enerji Depolama Birimleri	19
2.3.2.1. Kurşun-Asit Bataryalar	20
2.3.2.2. Lityum-İyon Bataryalar	20
2.3.2.3. Nikel-Metal Hibrit Bataryalar	21
2.3.2.4. Metal-Hava Bataryalar	22

2.3.2.5. Süper Kapasitörler	22
2.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Haberleşme Sistemleri	23
2.4.1. CAN Bus Haberleşme Sistemi	23
3. MATERYAL ve METOD	24
3.1. Enerji Tüketim Testi	24
3.1.1. SORT Döngüsü Parametrelerinin Belirlenmesi	25
3.1.2. Ticari Hız Bazında Karakterize Edilmiş Sürüş Çevrimleri	26
3.1.3. Pratik SORT Sürüş Çevrimlerinin Oluşturulması	27
3.1.4. SORT Döngüsü Uygulamalarında Dikkat Edilecek Hususlar	31
3.2. Elektrikli Araçlarda Yapılan Enerji Tüketim Testi	32
3.2.1. EV SORT Döngüsünde Ölçüm Metodu	32
3.2.2. EV SORT Protokolünde Test Koşulları	33
3.2.2.1. Test Parkuru/Yolu Fiziksel Şartları	33
3.2.2.2. Test için Hava Şartları,	33
3.2.3. Elektrikli Aracın Test için Hazırlanması	34
3.2.4. Elektrikli SORT Döngüsü Öncesinde ve Test Sırasında Dikkat Edilecek Hususlar	35
3.3. Elektrikli Minibüste Yapılan Enerji Tüketim Testi	36
3.3.1. Test Hazırlık Aşaması	36
3.3.2. Test Aracının Belirlenmesi ve Özellikleri	36
3.3.3. Test Aracının Yük Hesabı ve Yüklenmesi	37
3.3.4. Test Aracının Ölçüm Cihazları İle Enstrümente Edilmesi	39
3.3.5. Test İçin Uygun Yolun ve Rotanın Belirlenmesi	41
3.3.6. Test İçin Hava Şartlarının Ölçülmesi	42
3.3.7. Aracın Sürülmesi ve SORT Çevriminin Gerçekleştirilmesi	44
3.3.8. Test Sonrasında Tüketim Verilerinin Elde Edilmesi	45
3.4. Elektrikli Aracın Modellenmesi	48
3.4.1. Sürüş ve Yol Modeli	49
3.4.2. PID Modeli	51
3.4.3. Dinamik Model	51
3.4.4. Sürüş Modları	57
3.4.5. Transmisyon modeli	58
3.4.6. Motor Modeli	62
3.4.7. Akü Sistemi Matematiksel Modeli	63

3.4.8. SoC Modeli	64
3.5. Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi	69
4. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE DOĞRULANMASI	71
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	73
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	76
EKLER	77



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	: Elektrikli Araç Projeksiyon Alanı (6,4764 m ²)
C	: Batarya Kapasitesi (44 Kwh)
C _d	: Aerodinamik Sürtünme Katsayısı (0.37)
C _F	: Akaryakıt Ağırlığının Yük Faktörü
C _L	: Yüklenmesi Gereken Yük Faktörü
C _S	: Koltukların Yük Faktörü
E _{BR}	: Bataryadan Çekilmesi Gereken Enerji (Wh)
E _{BRG}	: Bataryaya Sağlanan Rejeneratif Enerji (Wh)
E _C	: Elektrikli Minibüsün Tükettiği Enerji (Wh)
E _{Ckm}	: Km Başına Tüketilen Enerji (kWh/km)
F	: Yakıt Deposu Kapasitesi
f	: Yuvarlanma Direnci Katsayısı (0.01)
F _{aero}	: Aerodinamik Direnç Kuvveti (N)
F _{acceleration}	: Elektrikli Minibüsün İvmelenme Kuvveti (N)
F _{rolling}	: Elektrikli Minibüsün Yuvarlanma Direnci Kuvveti (N)
F _{traction}	: Elektrikli Minibüsün Tahrik Kuvveti (N)
G	: Yerçekimi Sabiti (9.81 m/s ²)
H	: Yükseklik
I _b	: Batarya Verimliliği (0.97)
I _M	: Motor Verimlilik Oranı
I _n	: Elektrikli Minibüsün Tranmisyon Oranı (17.945)
L	: Uzunluk
N	: Koltuk Sayısı
m	: Elektrikli Minibüsün SORT Ağırlığı (4244 kg)
m _e	: Efektif Atalet Kütlesi (1,02*m)
M _W	: Tekerlek Torku (Nm)
M _M	: Motor Torku (Nm)
n _W	: Tekerlek Dönme Hızı (rpm)
n _M	: Motor Dönme Hızı (rpm)

N_M	: Motor Gücü (watt)
N_{MR}	: Motor için Gerekli Elektrik Gücü (watt)
N_{ME}	: Motor Mekanik Gücü (watt)
N_{MRG}	: Motorun Rejeneratif Sistemden Elde Ettiği Elektrik Gücü (watt)
N_{MC}	: Motorun Tükettiği Elektrik Gücü (watt)
N_L	: Elektrikli Minibüsün Tükettiği Güç (watt)
N_A	: Elektrikli Minibüsün Aksesuarlarının Tükettiği Güç (650 watt)
N_{BT}	: Bataryanın Toplam Gücü (watt)
N_{BL}	: Bataryadan Yük Altında Çekilen Güç (watt)
N_{BLO}	: Bataryanın İç Direnci Nedeniyle Kayıp Gücü (watt)
N_{BR}	: Bataryadan Çekilmesi Gereken Güç (watt)
N_{BRG}	: Bataryaya Sağlanan Rejeneratif Güç (watt)
R_{int}	: Batarya İç Direnci (0.1 ohm)
r_w	: Elektrikli Minibüsün Tekerlek Yarıçapı (0.3645 m ²)
S	: Sürücü Kompartmanı
W_C	: Her Çevrimde Alınan Toplam Mesafe (km)
W_R	: En Fazla Alınabilecek Toplam Mesafe (km)
V	: Araç Hızı (km/h)
V_{ocv}	: Batarya Açık Devre Gerilimi (360 V)
W	: Genişlik
σ_{air}	: Ortam Hava Yoğunluğu (1.2 kg/m ³)
EA	: Elektrikli Araçlar
EM	: Elektrik Motoru
HA	: Hibrit Araçlar
HEA	: Hibrit Elektrikli Araçlar
$\dot{I}YM$	: İçten Yanmalı Motorlu
SRM	: Anahtarlama Relüktans Motorları
$SORT$	: Standartlaştırılmış Yol Testi
SOC	: Aracın Şarj Durumu
TEA	: Tümü-Elektrikli Araçlar
$UITP$	: Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Robert Anderson tarafından üretilen ilk elektrikli araç.	9
2.2: Gustave Trouvé tarafından üretilen elektrikli araç.	9
2.3: Thomas Parker tarafından üretilen elektrikli araç.	10
2.4: TEA araç konfigürasyonları.	12
2.5: HEA konfigürasyonları.	13
2.6: EA konfigürasyonu.	15
2.7: Motor türleri.	16
2.8: Motor türleri.	17
3.1: Şehir içi otobüs kullanımı.	26
3.2: Temel SORT döngüsünün yapısı.	27
3.3: SORT döngüsüne ait bir trapez.	28
3.4: SORT-1 Yoğun şehir trafiği döngüsü.	29
3.5: SORT-2 Kolay şehir trafiği döngüsü.	29
3.6: SORT-3 Kolay banliyö trafiği döngüsü.	30
3.7: Racelogic VBOX 2 data logger.	36
3.8: Test aracı yükleme görüntüsü.	38
3.9: Araç enstrümantasyon bağlantı şeması.	39
3.10: Ölçüm cihazlarının araca bağlantısı.	40
3.11: CAN haberleşme sistemi veri kaydedici bağlantısı.	41
3.12: Test rotasının uydu görüntüsü ve eğimi.	41
3.13: Test rotasının görüntüsü.	42
3.14: Test yolunun ölçülmesi ve işaretlenmesi.	42
3.15: Hava istasyonu ölçüm sonuç grafiği.	43
3.16: Hava ölçüm istasyonu.	43
3.17: SORT çevriminin gerçekleştirilmesi.	44
3.18: SORT çevriminin gerçekleştirilmesi.	45
3.19: SORT-1 döngüsü hız-zaman grafiği.	46
3.20: SORT-2 döngüsü hız-zaman grafiği.	47
3.21: SORT-3 döngüsü hız-zaman grafiği.	48
3.22: Simulink ortamında SORT-1-2-3.	49

3.23: Simulink ortamında SORT-1.	50
3.24: Simulink ortamında SORT-2.	50
3.25: Simulink ortamında SORT-3.	51
3.26: Simulink ortamına eklenen PID kontrolcüsü.	51
3.27: Elektrikli minibüs üzerindeki kuvvetler.	52
3.28: Elektrikli minübüsün dinamik modeli.	53
3.29: EA'nın SORT-1 çevriminde hız grafiği.	53
3.30: EA'nın hızının SORT-1 referans çevrimine göre davranışı.	54
3.31: SORT-1 referans çevrimine göre PID davranışı.	54
3.32: EA'nın SORT-2 çevriminde hız grafiği.	55
3.33: EA'nın hızının SORT-2 referans çevrimine göre davranışı.	55
3.34: SORT-2 referans çevrimine göre PID davranışı.	56
3.35: EA'nın SORT-3 çevriminde hız grafiği.	56
3.36: EA'nın hızının SORT-3 referans çevrimine göre davranışı.	57
3.37: SORT-3 referans çevrimine göre PID davranışı.	57
3.38: Simulink ortamında transmisyon modelinin tasarımı.	58
3.39: SORT-1'de EA'nın hız, motor torku, hızlanma ve motor gücünün davranışları.	59
3.40: SORT-2'de EA'nın hız, motor torku, hızlanma ve motor gücünün davranışları.	60
3.41: SORT-3'de EA'nın hız, motor torku, hızlanma ve motor gücünün davranışları.	61
3.42: E-Motor verimlilik grafiği.	62
3.43: E-Motor simulink tasarımı.	63
3.44: Batarya modeli tasarımı için kullanılan rint modeli.	63
3.45: Simulink ortamında tasarlanan batarya modeli.	64
3.46: Simulink ortamında tasarlanan SoC modeli.	65
3.47: SORT-1 döngüsünde motor gücü, motor elektrik tüketimi, batarya tüketimi referans hız ve SoC değişimi.	66
3.48: SORT-2 döngüsünde motor gücü, motor elektrik tüketimi, batarya tüketimi referans hız ve SoC değişimi.	67
3.49: SORT-3 döngüsünde motor gücü, motor elektrik tüketimi, batarya tüketimi referans hız ve SoC değişimi.	68
3.50: Elektrikli minibüsün simulink modeli.	69

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: SORT trapezi verileri.	28
3.2: 3 SORT döngüsünün karşılaştırılması.	30
3.3: Test aracı özellikleri.	37
3.4: Opsiyonel ekipman ağırlığı hesaplama tablosu.	37
3.5: Diğer ağırlıkları hesaplama tablosu.	38
3.6: Test sırasında ölçülen hava şartları.	43
3.7: SORT döngüleri ölçüm sonuçları.	46
3.8: SORT-1 ölçüm sonuçları.	47
3.9: SORT-2 ölçüm sonuçları.	47
3.10: SORT-3 ölçüm sonuçları.	48
3.11: Simülasyon sonuçları.	70

1. GİRİŞ

Günümüzde araçlara yönelik artan talep nedeni ile küresel çapta araç üretimi sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Araç sayılarının artması ile birlikte artan akaryakıt tüketimi ve sınırlı akaryakıt kaynakları zaman ilerledikçe insanoğlunu farklı alternatif enerji kaynaklarını araştırmaya sevk etmiştir. Her ne kadar 1859 yılında Gaston Plante tarafından kurşun-asit batarya ilk defa üretilmiş olsa da Thomas Parker ilk elektrikli aracın üretimi 1884 yılında batarya üretiminden 25 yıl sonra başarmıştır. Fakat dönemin teknolojisinin batarya ömrünü geliştirmek adına yetersiz kalması nedeni ile petrol kaynaklarının ömrüne bağlı olarak küresel çapta araç üretimi için üreticiler içten yanmalı motorlara yönelmiştir. Fakat devam eden süreçte 1970 ve 1980 yıllarına gelindiğinde küresel çapta yaşanan enerji krizi her ne kadar elektrik enerjisine olan ihtiyacı ön plana çıkarsa da dönemin teknolojisi şarj süresi ve elektrikli araçların menzili için gerekli ihtiyacı karşılayacak seviyeye ulaşamamıştır. Fakat birçok firma tarafından elektrikli ve hibrit araçlara yönelik araştırma ve geliştirme faaliyetleri günümüze kadar hız kesmeden sürekli olarak devam etmiştir [1].

Günümüz teknolojisi ile birlikte petrol kaynaklarının ömrünün azalması, artan CO₂ salınımının küresel ısınmaya olan zararlı etkisi ve her ülkenin kendi enerji ihtiyacını kendisinin karşılayacağı teknolojiye yönelik çalışmaları, elektrik enerjisinin önemini bir kere daha ortaya çıkarmıştır. Buna paralel olarak içten yanmalı motorlu araçlarının üretiminin sınırlandırılması, elektrikli araçlarının kullanımının yaygınlaştırılması gelişmiş ülkeler tarafından teşvik edilmekte ve desteklenmektedir [2].

Batarya teknolojisinin gelişimi ile birlikte hibrit araçların üretimi ve kullanımı tüm dünyada yaygınlaşmıştır. Fakat hibrit araçların henüz bir noktada akaryakıt kullanımına bağlı olması nedeni ile birçok otomotiv üreticisi aynı zamanda elektrikli araç üretimine yönelmiş ve bugün birçok farklı markadaki elektrikli aracı piyasaya sürmüştür. Artan rekabet ortamı ve küresel çapta ilerleyen ticari anlaşmalar kapsamında birçok bölgede enerji ve şarj istasyonu altyapılarının gelişimi ile birlikte üretilen elektrikli araçların kullanım sayıları gün geçtikçe artmakta ve otomotiv sektöründe her bir firma öncü ve tercih edilen konuma ulaşmaya çalışmaktadır [3].

Üretilen elektrikli araçların birbirlerine göre rekabetlerini etkileyen ana faktörler sırası ile tam şarj durumunda aracın alabileceği mesafeyi, şarj süresi, performansı, güvenilirliği, dayanıklılığı ve konforu olarak sıralanabilir. Bu ana faktörler araçların üretim aşamasında üretici firmalar tarafından tüketicinin ihtiyaçlarına göre oluşturulan bir plan çerçevesinde değerlendirilir. Daha sonra araçlar tasarlanarak örnek model üretimine geçilir. Üretilen örnek modeller fiziksel testlere tabi tutulur. Test sonuçlarına göre örnek modelin tasarım aşamasındaki gerekli şartları karşılayıp karşılamadığına bakılır. Değerlendirmeler sonucunda gerekirse araç yeniden tasarlanarak tüm ihtiyaçları karşılayacak şekilde son aşamaya kadar yeniden testlere tabi tutulur. Prototip bir aracın tasarım aşamasından sonra tabi tutulduğu tüm fiziksel test süreci projenin toplam maliyetinin yaklaşık %25’lik bir bölümünü oluşturur. Bu nedenle tekrarlı fiziksel testler nedeni ile oluşan ek maliyetlerden kaçınmak için tasarım firmaları birçok ana faktörü sanal analizler ile ortaya çıkarmaya çalışır. Sanal analizler her ne kadar örnek model üretimi öncesinde tasarım aşamasında yaklaşık bir fikir oluştursa da model üretimi sonrası fiziksel testler sonucunda elde edilen veriler örnek model araç için nihai kriter olarak kabul edilir. Model aracın seri üretimi sonrası kullanılacağı bölgenin regülatif isteklerine bağlı olarak uygun hava, yol ve yük koşulları oluşturularak ya da bu koşulları sağlayabilecek bir laboratuvar ortamında fiziksel testler gerçekleştirilir. Testler kapsamında talep edilen gerekli şartları sağlayıp sağlamadığına göre ya fiziksel yol testi ya da laboratuvar testi seçilir. Bu nedenle her türlü fiziksel test için dünyada bir test laboratuvarı bulunsa da tüm fiziksel testler için belirli bir bütçenin oluşturulması gerekmektedir. Gerek laboratuvar ortamında yapılan testler olsun gerekse fiziksel testler olsun sonucunda istenilen değerler elde edilmez ise yeniden yapılan tekrarlı testler kapsamında ortaya ek maliyetler çıkabilmektedir. Bunun yanında fiziksel test laboratuvarlarının sayısal olarak az olması ve yüksel maliyetleri nedeni ile birçok fiziksel test öncesinde bir dizi sanal analiz işlemi gerçekleştirilir. Bu analizlerin amacı aracın fiziksel test öncesinde nihai halde olmasını sağlamaktır. Tüm üretici ve ar-ge firmaları tarafından tekrarlı fiziksel testlerden kaçınılması ve ek maliyetlerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır [4].

Üretilen elektrikli örnek model araçların bir dizi fiziksel testleri bulunmaktadır. Enerji tüketim testi de bu testlerden biridir. Bu çalışmada Elektrikli Minibüs’ün fiziksel olarak UITP Advancing Public Transport E-SORT Addendum [5] ve UITP Project SORT [6] prosedürlerine göre enerji tüketim testi yapıp enerji tüketim

sonuçları elde edilmiştir. Aynı Elektrikli Minibüs'ün, fiziksel özellikleri kullanılarak matematiksel araç modellemesi yapılmıştır. Matlab/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon programında bu aracın enerji tüketim analizi ve maksimum alınabilecek menzil hesaplaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda alınan veriler fiziksel test sonucu ile karşılaştırılmıştır.

Ali Boyalı ve Levent Güvenç; simülasyon ortamında oluşturdukları Hibrit Elektrikli Araç (HEA) modelleri üzerinde çeşitli kontrol uygulamalarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada boyuna araç dinamiği modeli oluşturulmuştur. Kural tabanlı kontrol uygulamaları sonucunda HEA modellerde diğer konvansiyonel araçlarda olduğu gibi yanal dinamiklerin de hesaplara dâhil edilmesi gerekmediği ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca optimizasyon çalışmalarına yönelik hâlihazırda kullanılan hesaplama tekniklerinin gerekli sonuçları sağlaması noktasında yetersiz kalacağı anlaşıldığından, istenilen detaylı sonuçları elde etmemizi sağlayacak daha basit modellerin kurulmasının daha faydalı olacağı değerlendirilmiştir [7].

Jiquan Wang, Igo Besselink ve Henk Nijmeijer elektrikli araçların alabileceği menzilin daha önceden tahmin edilebilmesi için elektrikli araç modeli oluşturarak algoritma geliştirmişlerdir. Gerçek hayatta dinamometre verileri ile doğrulanmış bir sürüş çevrimi verilerine göre aracın hızlı ve ekonomik olarak oluşturulan 2 ayrı sürüş tarzındaki sürüşleri için menzil tahminini sürücüye yansıtan bir algoritma geliştirmişler ve doğrulamışlardır. Elde edilen sonuçlarda hata payının %5 olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Olası yapılacak yeni bir sürüş için çevrim dışı çalışan bir algoritma geliştirerek sürücünün olası menzili doğru öngörmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır [8].

Tolga Kocakulak ve Hamit Solmaz; yaptıkları çalışma kapsamında bulanık mantık kontrol stratejisi ile rejeneratif fren sistemi modellemişlerdir. Rejeneratif fren bulanık mantık kontrol stratejisinde giriş fonksiyonları olarak araç hızı, batarya şarj doluluk oranı (SOC), fren pedal konumu ve batarya paketi akım değerlerinin girdisini sağlamışlardır. Modeli oluşturulan kontrol sisteminin çıkışı olarak ise araç güvenliği ön planda tutularak aracın kullanımı boyunca yaptığı frenlemenin maksimum seviyede rejeneratif frenleme ile yapması sağlanmıştır. Önden çekişli olan elektrikli aracın dinamik modeli çıkarılarak, toplam fren kuvvetinin ön ve arka akslara dağılımının etkisi incelenmiştir. Rejeneratif frenlemenin etkisinin incelenebilmesi için elektrikli bir aracın modeli oluşturulmuştur [9].

Muhammed Sefa Çetin, Barış Karakaya ve Muhsin Tunay Gençoğlu; yaptıkları çalışmada HA'lar ve EA'larda kullanılan batarya sistemlerinin davranışlarını incelemiştir. Bataryalı EA'ların çalışma prensipleri ve türleri araştırılmıştır. EA'larda kullanılan lityum iyon bataryaların MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi yapılarak benzetim sonuçları elde edilmiş ve bataryanın boşalma süresinin bataryaya bağlı yüke göre değişimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda daha büyük bataryaların modellenmesine fayda sağlayacak veriler elde edilmiştir [10].

Ilyès Miri, Abbas Fotouhi, Nathan Ewin; EA modellerde kesin bir menzil tahmini elde edebilmek için güç tabanlı enerji tüketim modeli oluşturdular. Bu amaçla gerçek bir EA olan BMW i3'ü temel alan MATLAB/Simulink yazılımı kullanarak araç modeli elde edilmiştir. Aynı zamanda bir sürüş modeli de gerçekleştirmiştir. Çalışmada; enerji tüketimi tahmini doğruluğunu iyileştirmek için yardımcı ve geliştirici diğer etkenleri de EA modeline dahil edilmiştir. Simülasyon ve deneysel ortamda araç modelini NEDC sürüş çevrimi koşuna göre test ederek enerji tüketim sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçlar arasında %2 ila %6 arasındaki hata oranında değer elde edilmiştir [11].

T.A.T. Mohd, M.K. Hassan ve WMK. A. Aziz; EA modellerinde motor çalışması ve fren rejenerasyonu sırasında güç akışını incelemek için Matlab/Simulink ortamında bir araç modeli geliştirmiştir. Bu çalışma ile simülasyon sonucunda tork ve hız koşulları, enerji akışı ve sürücü performansı incelenmiştir. Çalışmada sonraki analizlere ışık tutmak amaçlanmıştır [12].

Burhan Özece yapmış olduğu çalışmada, MATLAB ortamında konvansiyonel araçların ve farklı ultrakapasitörlere sahip HEA modellerin matematiksel modelini oluşturmuş ve yakıt tüketimini incelemiştir. Rejeneratif frenleme enerjisinin hepsini toplayabilecek kapasitede yüksek enerji yoğunluklu ultrakapasitöre sahip HEA modellerin, konvansiyonel araçlara göre daha az yakıt tükettiği ortaya çıkarılmıştır [13].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı; EA modellerinin tasarım aşamasındaki teknik isterleri doğrultusunda; tasarımı tamamlanıp prototip aşamasına geçtiğinde, araç üzerine gerçekleştirilen fiziksel testler sonucunda aracın teknik isterlerini karşılayıp karşılamadığının tespit edilmesi için harcanan efor ve zamanın minimize edilmesine

yönelik yapılan çalışmanın sonucunu analiz etmektir. Elektrikli araçlar belirli bir teknik ister doğrultusunda imal edilmektedir. Teknik özellikler belirlendikten sonra tasarım aşamasına geçilir ve tüm komponentleri belirli bir hesap doğrultusunda tasarlanır ve analiz edilir. Sanal hesaplamalar, çizimler ve analizler yardımı ile prototip araç ortaya çıkmadan önce aracın teknik gereklilikleri karşılayıp karşılamadığı tespit edilmeye çalışılır. Her ne kadar analiz ortamında çalışmalar gerçekleştirilse de bir takım isterler; araç üzerinde gerçekleştirilen gerçek fiziksel testler sonucunda kontrol edilir. Fiziksel test sonucunda elde edilen veriler tasarım aşamasındaki teknik gereksinimlerini karşılamaz ise aracın tasarım aşamasına geri dönülür ve birtakım değişiklikler yapılır ve gerekirse prototip araç yeniden üretilir. Bu durum bir araç projesi için oldukça fazla zaman ve maliyet kaybına sebep olmaktadır. Birçok değişkenin matematiksel olarak hesaplanabildiği gibi üretilen aracın enerji tüketim performansı da her ne kadar basit hesaplamalar ile ölçülmeye çalışılsa da gerçek performans sonuçları yine gerçek hayatta gerçekleştirilen fiziksel test ile elde edilmektedir. Bu çalışmada gerçek hayatta gerçekleştirilen fiziksel enerji tüketim testi prosedürünün ve koşullarının tamamı matematiksel bir eşitliğe dönüştürülmüş, aracın tüm fiziksel özellikleri kullanılarak oluşturulan matematiksel eşitlikler ile birlikte Matlab/Simulink ortamına aktarılmış ve aracın enerji tüketim performansı hesaplanmıştır. Aynı araç gerçek hayatta uygun test koşullarında fiziksel olarak test edilmiş ve gerçek fiziksel test sonuçları elde edilmiş ve her iki test sonucu karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma ile proje kapsamında karşılaşılan tekrarlı enerji tüketim performansı testlerinin azaltılmasına yönelik simülasyon tasarlanması ve bu simülasyon sayesinde zaman ve maliyet açısından kazanım elde etmek amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMA BİLGİLERİ

Yapılan literatür taramasına göre EA'lar için yurt içinde ve yurt dışında bir çok farklı sektörde ve alanda çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında mevcutta kullanılan EA ve HEA araçların dinamik davranışları incelenmiş ve oluşturulan parametrelere göre farklı analiz programlarında simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Başka bir yöntem ile de istenilen yol koşulunda sürülmeye uygun EA'lar üretilmesi için simülasyon ortamında araçların; batarya modellemeleri, E-motor modellemeleri, fren ve rejeneratif frenleme modelleri, mekanik modellemeleri, çekiş kontrol tasarımları, viraj kontrol modelleri, kayma ya da kızaklama durumları ve hız sabitleyici tasarımları gibi hususlar modellenerek simülasyon ortamı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu tez kapsamında yine oluşturulan modelde ise elektrikli bir aracın hareketine yönelik tüm kuvvet bileşenleri ve elektrikli aracın sahip olduğu parametreler çerçevesinde elektrikli araç modeli oluşturulmuştur. Aracın sürüleceği yol koşulu ise UITP Project E-SORT Prosedürü'ne [5] göre belirlenerek simülasyon ortamına aktarılmıştır.

2.1. Elektrikli Araçlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Ali ÖZEK yapmış olduğu çalışmada araçlarda kullanılan tahrik sistemlerine yönelik inceleme ve simülasyon işlemi gerçekleştirmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre üretilmek istenen EA'nın parametreleri ortaya çıkmış ve sonuçlar doğrultusunda EA üretilmiştir. Yine aynı simülasyon sonuçlarına göre; kullanılan motorların gerçek hayatta NEDC koşullarında istenilen hız değerlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiş, araçta kullanılan motorların ürettiği oldukları tork ve güç değerleri incelenmiş, farklı tahrik sistemlerinde meydana gelen hız ve güç durumları ortaya çıkarılmış ve EA'nın nihaide hangi parçalar ile üretilmesi gerektiği belirlenmiştir [14].

Abdulhamit SAN yapmış olduğu çalışmada yalnızca elektrik motoru ile tahriklenen elektrikli bir aracın dinamik olarak modellenmiş ve ortaya çıkan modeli kullanarak PLC ile simülasyon işlemini gerçekleştirmiştir. Simülasyon işlemi sırasında aracın temel parçaları ve sistemi olan dinamik, motor, batarya, ve fren sistemi modellerini kullanmıştır. Bu modellere göre oluşturulan eşitlikler ve

denklemler çerçevesinde SCL dili kullanılarak PLC ortamında simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyonun amacı ise EA’larda en önemli komponentlerden biri olan batarya sistemine yönelik oluşturulan modeller arasındaki farklılıkları analiz etmek, en güvenli ve en verimli batarya modelini ortaya çıkarmaktır [15].

Burhan ÖZECE yapmış olduğu çalışmada, MATLAB ortamında farklı ultrakapasitörlere sahip konvansiyonel araçlar ve hibrit elektrikli araçların modelleri oluşturulmuş ve yakıt tüketimleri incelenmiştir. Sonuç olarak, rejeneratif frenleme enerjisinin tamamını toplayabilen yüksek enerji yoğunluklu ultrakapasitörlere sahip hibrit elektrikli araçların, geleneksel araçlara göre daha az yakıt tükettiği ortaya çıkarılmıştır [13].

Cenk GÜNER yapmış olduğu çalışmada farklı hibrit tahrik sistemleri ile çalışan Toyota Prius Plug-in Hybrid ve Chevrolet Volt binek araçlarının araç konsepti analizini ve karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. Yapılan bu mukayese işlemi sırasından AVL Cruise programını kullanarak her iki aracın modelini oluşturarak NEDC sürüş çevriminde performans ve ekonomi değerlendirmelerinin analizlerini gerçekleştirmiştir [16].

Can GÖKÇE yapmış olduğu çalışmada modellemiş olduğu HEA’da tasarlamış olduğu mantıksal kontrol sistemi sonucunda uluslararası standartlarda kabul edilen bir çok farklı sürüş çevriminde simülasyonu çalıştırmış ve sonuçları incelemiştir. Sonuçları enerji tasarrufu açısından değerlendirmiş, şehir içi ve şehir dışı sürüşlere yönelik aracın mekaniksel ve dinamiksel davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında bu farklı sürüş çevrimlerinde nasıl bir tasarruf sağlanabileceğini araştırmıştır [17].

Enes UĞUR yapmış olduğu çalışmada ultrakapasitör ve akümülatör arasında yük dağılımını karşılayan bir DC-DC evirici, voltaj düzenleyici PI kontrolör vasıtası ile denetlenmiş ve oluşturulan sistem prototip bir aracın üzerinde test edilmiştir. Aracın en yüksek güç ihtiyacına uyumlu akümülatör boyutlandırmasının zorunlu olduğu alışlagelmiş tasarım ile karşılaştırıldığında bu sistemde, araçtan aynı performansı elde etmek için daha küçük akümülatör boyutları kullanılabilmektedir. Belirli bir yol koşulunda sürülen araçta yük paylaşımı ve dinamik sonuç araştırması yapılmıştır [18].

2.2. Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar, akülü elektrikli araçlar veya tamamen elektrikli araçlar, yalnızca pillerde depolanan enerjiyi kullanarak bir veya daha fazla elektrik motoruyla çalışan araçlar olarak tanımlanırlar. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu (İYM) araçlarla karşılaştırıldığında daha sessiz çalışmaktadır. Ayrıca egzoz emisyonu bulunmamaktadır ve genel olarak daha düşük emisyonu sahiptir.[19] Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği'nde, 2020 itibarıyla, daha düşük yakıt ve bakım maliyetleri nedeniyle yapmış olduğu araştırmada elektrikli araçların toplam sahip olma maliyetinin eşdeğer İYM araçlarından daha ucuz olduğunu tespit etmiştir.[23] Dolayısı ile bir elektrikli aracın şarj edilmesi, çeşitli şarj istasyonlarında yapılabildiği gibi; bu şarj istasyonları hem evlere hem de halka açık alanlara kurulabiliyor olunması gelecekte insanlar tarafından EA'ların kullanımının daha da yaygınlaşmasına ve tercih edilir olmasına sebep vermektedir [19].

2021'de dünya çapında 6,6 milyon şarjlı elektrikli otomobil satılmıştır. Bu rakam 2020'deki satışlardan iki kat fazladır ve küresel yeni otomobil pazarının %9'luk pazar payına ulaşmıştır. Tamamen elektrikli otomobiller, 2021'de şarjlı otomobil satışlarının %71'ini temsil ederken Aralık 2021 itibarıyla, 16 milyon şarj edilebilir elektrikli otomobil dünya yollarında yerini almaya başlamıştır. Pek çok ülke EA'ların kullanılması için parasal ve kredisel olarak teşvikler sağlanması amacıyla hükümet programları yaparken, birkaç ülke hava kirliliğini azaltmak ve iklim değişikliğinin sınırlanması için bu tür çalışmalara öncülük etmektedir [19].

Günümüzde kullanımına örnek vermek gerekirse Tesla Model 3, 2020'nin başlarında dünyanın tüm zamanların en çok satan elektrikli otomobili olmuştur ve Haziran 2021'de küresel satışı 1 milyonu geçen ilk elektrikli otomobil olma ünvanına sahiptir. Yaygın olarak benimsenen önceki modeller arasında Japon Mitsubishi i-MiEV ve Nissan Leaf yer almaktadır.

Elektrikli araçların tarihçesi yaklaşık 1800'lü yıllara dayanmaktadır. Bu yıllardan sonra özellikle Robert Anderson 1832 ve 1839 yılları arasında ilk elektrikli arabayı icat etmesiyle tanınır [19].



Şekil 2.1: Robert Anderson tarafından üretilen ilk elektrikli araç.

1881'de Gustave Trouvé, Exposition internationale d'Electricité de Paris'te bir elektrikli araba sundu [19].



Şekil 2.2: Gustave Trouvé tarafından üretilen elektrikli araç.

1884'te, Ford Model T'den 20 yılı aşkın bir süre önce Thomas Parker, Wolverhampton'da kendi özel olarak tasarlamış olduğu yüksek kapasiteli şarj edilebilir pillerini kullanarak bir elektrikli araba yapmıştır [19].



Şekil 2.3: Thomar Parker tarafından üretilen elektrikli araç.

1888'de Alman Andreas Flocken, bazıları tarafından ilk "gerçek" elektrikli araba olarak kabul edilen Flocken Elektrowagen'i tasarladı. Elektrik, 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında otomobil tahriki için tercih edilen yöntemler arasında olmuş ve zamanın benzinli arabalarının elde edemediği bir konfor düzeyi ve kullanım kolaylığı sağlamıştır. Elektrikli araç filosu, 20. yüzyılın başında yaklaşık 30.000 araçla zirve yapmıştır [19].

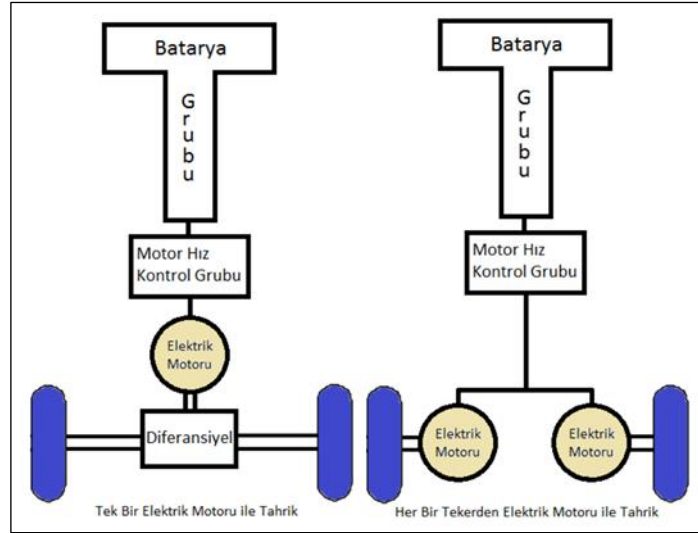
1897'de elektrikli arabalar ilk olarak İngiltere'de ve Amerika Birleşik Devletleri'nde taksi olarak ticari alanlarda kullanılmıştır. Londra'da, Walter Bersey'in elektrikli taksileri, taksilerin atlarla çekildiği bir dönemde ilk kendinden tahrikli kiralık elektrikli araçlardı [34]. New York City'de, Electrobat II'nin tasarımına dayanan on iki fayton ve bir arabadan oluşan bir filo, kısmen Philadelphia'daki Electric Storage Battery Company tarafından finanse edilen bir projenin parçasını oluşturmuştur.[35] 20. yüzyılda, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ana elektrikli araç üreticileri arasında Anthony Electric, Baker, Columbia, Anderson, Edison, Riker, Milburn, Bailey Electric ve Detroit Electric gibi isimler yer almaktadır.

Elektrikli arabalar, içten yanmalı motorlu (İYM) arabalardaki gelişmeler ve daha ucuz benzinli ve dizel motorlu araçların seri üretimi düşüşe yol açana kadar popülerliğini korudu. İYM arabalarının çok daha hızlı yakıt doldurma süreleri ve

daha ucuz üretim maliyetleri onları daha popüler hale getirdi. Bununla birlikte, 1912'de elektrikli marş motorunun piyasaya sürülmesiyle belirleyici bir an geldi ve bu motor, elle döndürme gibi genellikle zahmetli olan İYM'yi çalıştırma yöntemlerinin yerini aldı [19].

2.2.1. Tümü Elektrikli Araçlar

Tümü-Elektrikli araçlar (TEA) çekiş veya itiş için yalnızca tek ya da birkaç tane elektrik motoru kullanan ve enerji ihtiyaçlarını kimyasal batarya, akaryakıt akümülatörleri, ultrakapasitör veya volanlardan sağlayan taşıtlara Tümü-Elektrikli Araçlar (TEA) adı verilir. TEA'larda emisyon problemleri yoktur. Yüksek verimliliğe sahiplerdir. TEA'lar akaryakıt ve benzeri yapılardan bağımsızlardır. Oldukça sessiz ve güvenilirlerdir. Bu nedenle birçok farklı açıdan değerlendirildiğinde İYM araçlara göre oldukça fazla avantajları vardır. Bütün bu avantajları ile birlikte günümüzde hali hazırda TEA'ların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Satın alım bedellerinin oldukça yüksek veya maksimum alabileceği mesafe sorunları TEA'ların sahip olduğu dezavantajlarıdır. TEA'lar açısından elektrik enerjisinin kontrol edilebilir olması araç imaltında fazlaca kolaylık sağlamaktadır. Tahrik konfigürasyonunun haricinde yardımcı alt fonksiyonlarda da destekleyici enerji ya da güç kaynağına ihtiyaç bulunmamaktadır. Örnek vermek gerekirse fren sisteminde ya da direksiyon kontrol sisteminde hidrolik ya da diğer alt konfigürasyonların kullanılmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yanında rejeneratif fonksiyonlar vasıtası ile kaybedilen enerjinin belirli bir kısmını da dönüştürülebilmektedir. Diğer bir taraftan yaklaşık %95 verimlilikle çalışabilen bu konfigürasyonlar araç verimliliğine de kayda değer oranda katkı sağlamıştır. Günümüzde kullanılan TEA'ların tahrik sistemleri konvansiyonel araçlara göre oldukça benzer durumdadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte farklı sistemler de geliştirilmeye devam etmektedir. Örnek bir TEA'da kullanılan batarya ve motor özelliklerine göre hazırlanmış sistem Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4: TEA araç konfigürasyonları.

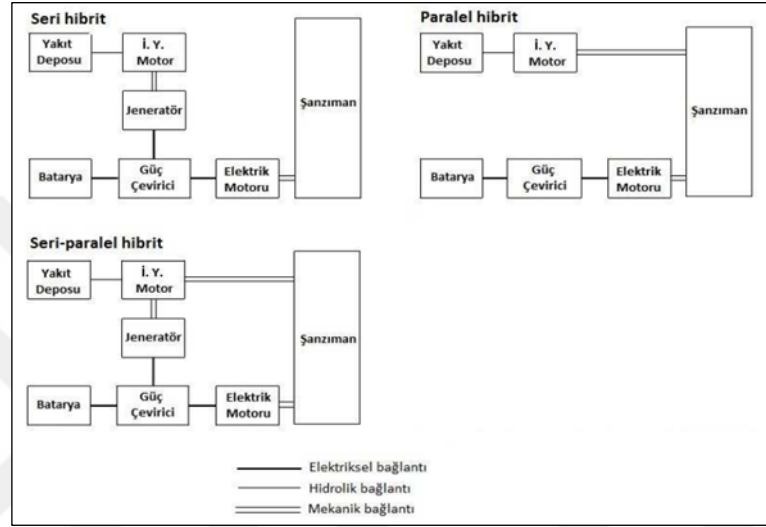
Yukarıdaki Şekil 2.1 incelendiğinde soldaki bölümde genellikle piyasada kullanılan EA sistemlerinde bulunan tahrik sistemini temsil etmektedir. Aks üzerinde aktarma organları toparlanmıştır.

2.2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar

Menzil her zaman elektrikli araçların en büyük dezavantajlarından biridir. Pil paketleri genellikle büyük hacme ve ağırlığa sahiptir. En yüksek güçleri sağlama yetenekleri sınırlıdır ve yeniden şarj edilmeleri için uzun zamana ihtiyaçları vardır. Regeneratif frenlemelerdeki ilerlemelere rağmen, jeneratör eylemi için etkili bir bölge vardır fakat verimlilik mükemmel değildir. Bu nedenle her zaman bir kayıp vardır. Ultra kapasitörler, pillerin en yüksek güçleri sağlamasına yardımcı olabilir, ancak elektrikli bir araçla daha uzun mesafeler elde etmek için; elektrik, aracın içindeki başka bir kaynaktan üretilmelidir.

Bir araçta elektrikli makinenin yanında bir veya daha fazla hareket kaynağı varsa o araca Hibrit Elektrikli Araç (HEA) denir. En basit örnek bir elektrikli bisiklettir. Elektrikli bisikletler, insan gücü artı elektrik motoruyla çalışır. Hibridizasyon, harici elektrikli şarj cihazlarına bağımlılığı ortadan kaldırmanın çok önemli ve etkili bir yoludur. Otomobil üreticileri tarafından yıllardır süre gelen araştırmalar sonucunda hibrit otomobiller üzerinde kayda değer bir başarıya ulaşılmıştır.

Geleneksel arabalar, bir elektrikli makineden faydalanmak için hibritleştirilir. Hibridizasyon derecesine bağlı olarak, elektrikli makine; ekstra bir tork kaynağı, bağımsız bir sürüş kaynağı, rejeneratif frenlemede bir jeneratör, ani marş için gelişmiş marş motoru, içten yanmalı motor (İYM) için tork dalgalanma kompensatörü vb. olarak kullanılabilir. HEA'ların verimliliğini optimize etmek için farklı hibrit konfigürasyonlar geliştirilmiştir. Şirketler, yeni ve gelişmiş hibrit konfigürasyonlar geliştirmek ve ticarileştirmek için rekabet halindedir. [14]



Şekil 2.5: HEA konfigürasyonları.

2.2.2.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar

Şekil 2.2’de Seri Hibrit Elektrikli Araçların konfigürasyonunu gösterilmektedir. Bu HEA'larda bulunan İYM’ler asıl enerjiyi mekanik güce dönüştüren ana enerji dönüştürücüsü görevini almaktadır. İYM'nin mekanik çıktısı daha sonra bir jeneratör kullanılarak elektriğe dönüştürülür. Elektrik motoru, jeneratör tarafından üretilen elektriği veya pilde depolanan elektriği kullanarak nihai tahrik sistemini hareket ettirir. Elektrik motoru, doğrudan motordan ya da aküden veya her ikisinden de elektrik alabilir. Motor tekerleklerden ayrıldığı için motor devri araç hızından bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu sistem sadece motorun ve aracın kontrolünü basitleştirmekle kalmaz daha da önemlisi, en iyi yakıt ekonomisini elde etmek için motorun optimum hızında çalışmasına izin verilmesini sağlar. Ayrıca motorun araç üzerine yerleştirilmesinde de esneklik sağlar. HEV serisinde geleneksel

mekanik şanzımana gerek yoktur. Aracın 3 farklı çalışma koşuluna bağlı olarak, bir HEV serisindeki tahrik bileşenleri farklı kombinasyonlarla çalışabilir.

Tekerlek içi göbekli motorlar (HUB) gibi başka seçenekli HEA'lar da mevcuttur. Bu durumda her tekerleğin içine bir tane takılı dört elektrik motoru vardır. Şanzıman ve nihai tahrikin ortadan kaldırılması nedeniyle, araç sisteminin verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. Araç ayrıca dört tekerlekten çekiş (AWD) özelliğine sahip olmaktadır. Ancak, dört elektrik motorunu bağımsız olarak kontrol etmek diğer tür HEA'lara göre zordur [20].

2.2.2.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

Şekil 2.5'de Paralel Hibrit Araç konfigürasyonu gösterilmektedir. Bu konfigürasyonda, İçten Yanmalı Motor (İYM) ve Elektrik Motoru (EM), kavramalar, kayışlar, kasnaklar ve dişliler gibi bir mekanizma aracılığıyla nihai tahrik sistemine bağlanır. Hem İYM hem de EM, kombine modda veya her biri ayrı ayrı nihai sürücüye güç sağlayabilir. Elektrik motoru, frenleme sırasında kinetik enerjiyi geri kazanmak için jeneratör görevi görebilmektedir. Ayrıca içten yanmalı motordan gelen gücün bir kısmını da kullanarak bir jeneratör gibi çalışabilmektedir [20].

2.2.2.3. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

Şekil 2.5'de gösterilen Seri-Paralel HEA, hem seri hem de paralel HEA'nın özelliklerinin bir araya gelmesi sonucu oluşmuştur. Bu nedenle seri veya paralel HEA olarak çalıştırılabilirler. Bir seri HEA'ya kıyasla, Seri-Paralel HEA'larda, motor ile nihai tahrik arasında mekanik bir bağlantı eklenmiştir. Böylece motor tekerlekleri doğrudan tahrik edebilmektedir. Paralel bir HEA ile karşılaştırıldığında, Seri-Paralel HEA, esas olarak bir jeneratör görevi gören ikinci bir elektrik makinesini eklenmesi sonucu meydana gelmiştir.

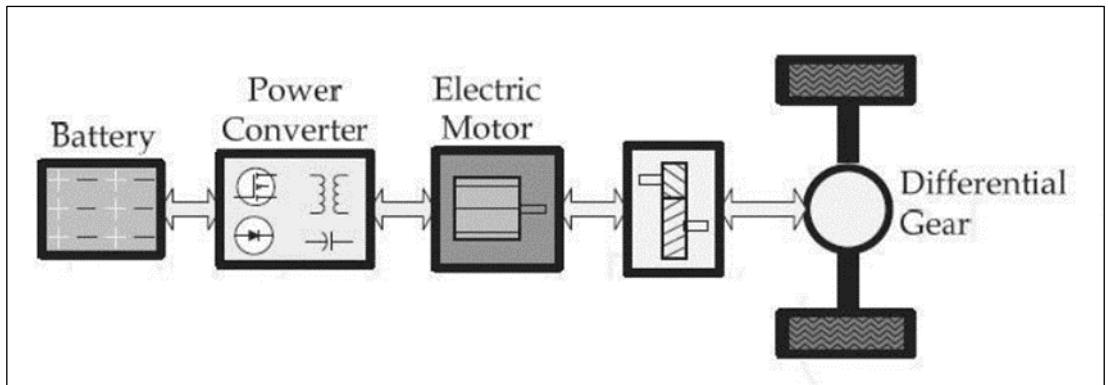
Seri-Paralel bir HEA hem paralel hem de seri modlarda çalışabildiğinden, yakıt verimliliği ve sürülebilirlik aracın çalışma durumuna göre optimize edilebilir. Kontrolde artan serbestlik derecesi, Seri-Paralel HEA'yı popüler bir seçim haline getirmiştir. Bununla birlikte, artan bileşenler ve karmaşıklık nedeniyle, Seri-Paralel bir HEA genellikle bir seri veya paralel HEA'den daha pahalıdır. [20]

2.2.3. Karmaşık Hibrit Elektrikli Araçlar

Karmaşık HEA'lar genellikle planet dişli sistemlerinin ve çoklu elektrik motorlarının (4x4 tekerlekten çekiş durumunda) kullanımını içermektedir. Tipik bir örnek vermek gerekirse, ayrı tahrik akslarının kullanılmasıyla gerçekleştirilen dört tekerlekten çekişli bir sistemdir. Bu sistemdeki jeneratör, maksimum verim için motor çalışma durumunu kontrol etmenin yanı sıra seri çalışmayı gerçekleştirmek için kullanılır. İki elektrik motoru, dört tekerlekten çekişi gerçekleştirmek ve rejeneratif frenlemede daha iyi performans sağlamak için kullanılır. Ayrıca kullanımları sayesinde araç denge kontrolünü ve kilitlenmeyen fren kontrolünü geliştirebilirler [20].

2.3. Elektrikli Aracı Oluşturan Birimler

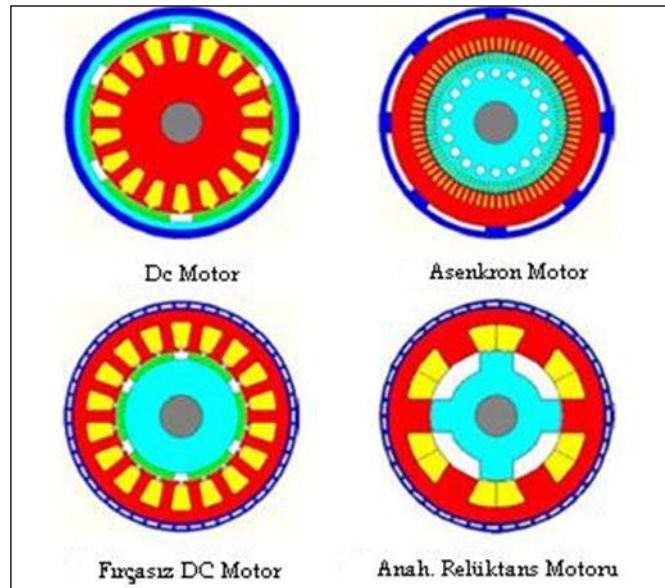
Elektrik tahrikli araçlar, biriktirilen veya ortaya çıkarılan tüm tahrik gücünü elektrik olarak kullanan ve tüm güç ihtiyaçlarını elektrik şeklinde karşılayan araçlardır. Elektrikli araçlar enerji depolama birimleri, güç üretim birimleri, tahrik mekanizmaları, güç kontrol birimleri ve motor hız kontrol birimlerinden meydana gelmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, elektrikli araçları oluşturan ana birimler incelenmiştir. Örnek olarak bir EA konfigürasyonu Şekil 2.6'de verilmiştir [14].



Şekil 2.6: EA konfigürasyonu.

2.3.1. Güç Üretim Birimleri

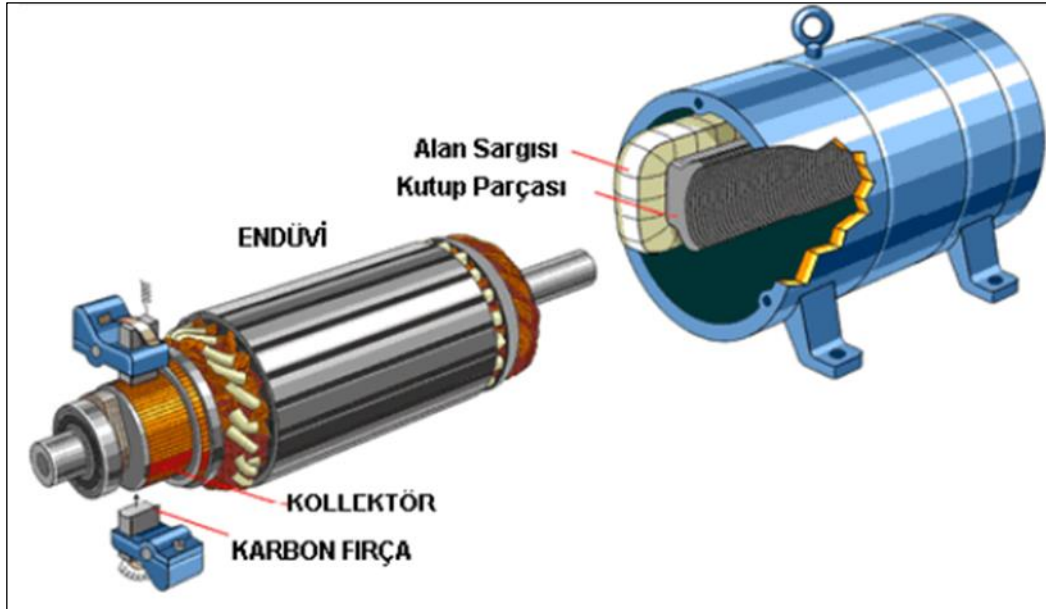
EA'larda güç üretim birimini oluşturan en önemli parça Elektrik Motoru(EM)'dur. EA'larda yaygın olarak kullanılmakta olan temel motor tipleri; DC motorlar (şönt ve seri), Asenkron Motorlar, Fırçalı DC motorlar (sabit mıknatıslı versiyonlar) ve Anahtarlama Relüktans Motorlar'dır. Bu bahse konu motorlar MOSFET ya da IGBT kullanılarak elde edilen anahtarlama sistemi ile çalışan PWM(Pulse With Modulation) prensibine göre çalıştırılmaktadırlar. EA'larda kullanılmakta olan bu tip motorların neredeyse birçoğu EA'ların enerji ve performans ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Fakat bu motorların herbiri kendine özgü bir karaktersitiğe sahip olması nedeni ile EA'lar üzerindeki uygulamalarına en müsait modeli tespit etmek zorunludur. AC motorlar kısaca basit, ucuz ve yüksek verimli olmalarına rağmen karmaşık bir kontrol mekanizması ve konfigürasyonu gerektirmektedir. DC motorlar ise basitçe kontrol edilebilmelerinin yanı sıra diğer motorlar ile karşılaştırıldığında biraz daha ağır, maliyetli ve azda olsa verimlilikleri düşüktür. DC fırçalı motorlar ise yaklaşık olarak AC motorlar kadar başarılı olmalarına rağmen diğer motorlar ile karşılaştırıldığında oldukça maliyetlidir. Bahsedilen motorların iç yapılarının birbirlerine göre farkları Şekil 2.7'de gösterilmiştir [14].



Şekil 2.7: Motor türleri.

2.3.1.1. DC Motor

DC motorlar, diğ er bir adlandırma ile Doğru Akım motorları, yapılarında bulunan armat rlerindeki sarımlarından, bobin setinden ya da stator şeklinde adlandırılan seri bir mıknatıstan meydana gelmektedir. Bobinlere yapılan voltaj uygulanması, armat rdeki sarımlarda hareket enerjisini oluşturulan bir tork üretmektedir. DC motorlar, armat rlerindeki sargı türlerine göre değerlendirildiklerinde yaygın olarak Fırçasız DC Motorlar,   nt Motor, Seri Motor, Kompunt Motor, Fırçalı DC motorlar olmak üzere dört ayrı kısıma ayrılırlar. DC motorlar, geçmişten beri devam eden ilgi odaklılığı olma özelliğine rağmen yapılarında oluşan akı ve torkun ayrı tırılmasının yanı sıra fırça ve halkalara sahip olmaları bakım sorunlarını meydana getirmektedir. Bu sebeple, DC motorların EA’larda zamanla kullanımı azalmıştır. DC motorlar d    k güç gereksinimi olan alanlarda az maliyetlidirler. Bunun yanı sıra kolay kontrol edilebildikleri sebebi ile kullanımı günümüzde halen devam etmektedir. Örneğin silecek motorları, klima ve fanlarda kullanılmalarının yanı sıra k    k ev aletlerinden yapı malzemelerine kadar çok farklı alanlarda h    kullanılmaya devam edilmektedir.  rnek bir DC motorun yapısı  ekil 2.8’de gösterilmiştir [15].



Şekil 2.8: Motor türleri.

2.3.1.2. Asenkron Motor

Sincap kafesli olan asenkron motorların EA’larda tercih edilme sebepleri sırası ile elektrik tahrik yapısındaki kolaylık ve güvenilirlik oranının yüksek olması, bakım gerektirmemesi, dayanıklı olması, onarımı ve bakımındaki maliyetin düşük olması ve zor koşullarda çalışabilme yetenekleridir. Zorlu ortam şartlarına sahip alanlarda ve elektrikli araç tahrik sistemlerinde kullanılan bu Asenkron motorlar, kontrolü ve sürüş konfigürasyonları açısından diğer komütatörsüz motor türleri ile kıyaslandığında en olgunlaşmış ve gelişmiş motor teknolojisidir denilebilmektedir. Asenkron motorlar EA’ların tahrik sistemlerinde kullanılması sayesinde voltaj ve frekans kontrollü bir sürücü yardımı ile kontrol edilebilir hale gelmiştir. Asenkron motorların frekansları ve gerilim genliği değiştirilerek DC motor gibi tork-hız karakteristikleri elde edilmiştir. Asenkron motorlarda sabit güçte motor daha hızlı çalıştırılarak araç yükü karşılanmaktadır. Alan zayıflatma sistemi ile benzer güçteki bir motor ile araç daha hızlı sürülebilmektedir [15].

2.3.1.3. Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Sürekli Mıknatıslı Motorlar’da rotorun dönmesi için bir manyetik alan oluşturulması zorunludur. Manyetik alan için Sürekli Mıknatıslı Motorlar’da, bakır sargı kullanmak yerine mıknatıs kullanılmaktadır. Bu durum bakım gereksinimlerini önemli oranda azaltmaktadır. Sürekli Mıknatıslı Motorlar genel olarak Senkron ve Kare Dalga (Fırçasız DC motor) olmak üzere iki gruba ayrılır. Mıknatıs teknolojisi kullanıldığından dolayı ihtiyaca göre yüksek performans elde etmek için farklı özelliklerde motorlar geliştirilebilir. Sürekli Mıknatıslı Motorlar’ın kontrolü için hem vektör kontrolü hem de alan kontrolü yöntemleri uygulanmaktadır. Sürekli Mıknatıslı Motorlar’ın başlangıç akımı asenkron motorlara göre daha düşüktür bu da batarya ömrünün uzatır. Ayrıca motor kontrolü daha kolaydır [15].

2.3.1.4. Anahtarlama Relüktans Motorları

Anahtarlama relüktans motorları kısaca (SRM) olarak adlandırılırlar. Basit yapıları, kontrol konusundaki esneklikleri, yüksek verimlilikleri, düşük bedelleri ve

arıza durumlarındaki avantajları nedeniyle diğer EM'lere nazaran daha avantajlıdırlar. Bu motorların rotlarında yüksek hızlı tahrik sistemleri için uygun olan herhangi bir sargı veya sabit mıknatıs bulunmamaktadır. Bunların yerine aynı işlevi görmek için ince çelik manyetik alan tabakaları üst üste yerleştirilmiş ve ihtiyaç karşılanmıştır. SRM'ler, DC ve AC motor sürücülerinden daha gelişmiş kontrol teknolojilerine ihtiyaç duymaktadırlar. Yüksek tork dalgalanması, yüksek gürültü ve titreşimler SRM'nin en önemli dezavantajları arasında yer almaktadır [16].

2.3.2. Enerji Depolama Birimleri

EA'lar tıpkı diğer İYM'li araçlar gibi aynı kasadan ve temel tahrik aksamından oluşmaktadır. Fakat EA'ların enerji gereksinimini sağlayan birimler diğer sistemlerden oldukça farklıdır. Bu sistemler ise önemli bir alt yapıyı gerektirmektedir. Sürekli çalışma koşulunda ısıtma, soğutma, iklimlendirme, direksiyon kontrolü, fren sistemleri ve diğer EM'lerin tahrik gereksinimlerini karşılamak için depolama biriminden gelen enerji kaynağı kullanılmaktadır. EM'lerde temel enerji depolama birimi pildir ya da diğer bir adıyla bataryadır. Genellikle yaygın olarak kullanılan uygulamalarda bataryaların özgül güçleri ve sahip oldukları enerjilerinin fazla olması beklendiği gibi ayrıca uzun çevrim ömürleri konusunda da yetkin olmaları beklenir.

Özgül enerji, enerji kaynağının birim kütlede depolanan miktarı olarak tanımlanabilir. Fakat özgül güç ise birim enerji kaynağı kütlelerinin verebildiği ya da sağlayabildiği güç olarak tanımlanabilir. Bataryalar kendi iç yapılarına göre birbirinden farklı tasarıma sahip olabilirler. Günümüzde kullanılan en bilinen batarya tipleri arasında; Kurşun-Asit, Nikel-Kadmiyum, Nikel-Metal Hibrit ve Lityum-İyon bataryalar bulunmaktadır. Tablo 2.1'de farklı tipteki bu bataryalar için özellikler gösterilmiştir [21].

Tablo 2.1: Farklı tiplerdeki bataryaların özellikleri.

Batarya Teknolojisi	Enerji yoğunluğu Wh/Kg	Güç Yoğunluğu W/Kg	Çevrim Sayısı	Maliyet \$/kWh
Kurşun-Asit	40	180	600	60
Nikel-Kadmiyum	50	120	1500	300
Nikel-Metal Hidrür	70	200	1000	250
Lityum-İyon	130	430	1200	150

EA'ların yükleri dikkate alındığında, araç kütlesinin sebep olacağı enerji miktarı büyük rakamlara ulaşmaktadır. Günümüzde prototipleri üretilen EA'ların ortalama batarya ağırlıkları yaklaşık 400-500 kg'dır. Tablo 2.1'de verilen batarya teknolojileri içerisinde ağırlık başına düşen güç değerleri açısından Lityum-İyon bataryalar diğer bataryalara göre daha verimlidir. Neredeyse tüm EA'ların prototip modellerinde Lityum-İyon piller kullanılmaktadır.

2.3.2.1. Kurşun-Asit Bataryalar

Günümüzde tartışılan konular arasında yer aldığı gibi çeşitli tipler arasında kurşun asitli batarya, çoğu araçta en eski ve yaygın olarak kullanılan batarya türüdür. Ancak kurşun asitli bataryaya göre belirli avantajları olan başka bazı gelişmiş batarya teknolojileri de vardır.

Kurşun asit bataryalar yüksek güçlü olacak şekilde tasarlanabilirler. Ayrıca ucuz ve güvenilirlerdir. Bununla birlikte, düşük özgül enerji, zayıf soğuk sıcaklık performansı uzun süre bu bataryaların kullanımlarını engeller. Gelişmiş yüksek güçlü kurşun-asit bataryalar geliştirilmektedir fakat bu bataryalar piyasada bulunan EA'lar için yalnızca yardımcı yük kaynağı olarak kullanılmaktadır.[22]

2.3.2.2. Lityum-İyon Bataryalar

Li-İyon bataryalar, hem yüksek enerji yoğunluğu hem de kütesel batarya birimi başına artan güç sayesinde günümüzde EA'larda en çok kullanılan teknolojiyi temsil ediyor ve bazı pil türlerinin rekabetçi koşullarda azaltılmış ağırlık ve boyutlarda geliştirilmesine olanak sağlıyor. Elektrikli araç endüstrisinde kullanılan

Li-Ion piller ile yapılan dip çalışmaları incelenmiş ve yapılan araştırmalara göre bu teknoloji, elektrikli araç endüstrisinde kullanılan bir batarya için en önemli koşullardan birini yerine getiren ve pillerin kolayca değiştirilmesini sağlayan en iyi "ağırlığa göre şarj" çözümünü temsil eder. Diğer bir avantaj ise, hafıza etkisinin olmaması (tamamen boşalmadan tekrar tekrar şarj etme durumunda maksimum enerji kapasitesini kademeli olarak kaybetmesi), bu da kullanım ömrünün artmasına neden olmaktadır. Li-İyon pillerin dezavantajı olarak kullanım ömrü ve kullanım güvenliği ile enerjik performansları etkileyebilecek yüksek gelişmiş çalışma sıcaklığı gösterilebilir. Bu teknoloji, dahili hücre sıcaklığını kontrol etmek ve izlemek için bir pil izleme sistemi gerektirir. Kullanım sıcaklığından kaynaklanan dezavantajların yanı sıra yüksek üretim maliyetleri, kullanım dışı kalan pillerin geri dönüşüm kapasitesi ve şarj altyapısı ile ilgili sorunlar da bulunmaktadır. [23]

2.3.2.3. Nikel-Metal Hibrit Bataryalar

2000'li yılların başında hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılan en ileri teknolojiyi temsil eden Ni-MH piller, günümüzde kullanılan teknolojiye ulaşmanın ilk adımı sayılıyor. O günlerde kullanılan piller olan Nikel-Kadmiyum ve Kurşun-Asit pillere kıyasla Ni-MH teknolojisi, otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilen pillere getirilen gereksinimleri karşılıyordu. Avantajları şunlardır: 70 Wh/kg özgül enerjiye sahip piller kullanılırken 300 km'nin üzerinde menzil alımına izin veren yüksek enerji yoğunluğu ve gücü en önemli avantajı sayılmaktadır. Ayrıca bu bataryalar, 320 V AC veya 180 V DC elektrik motorları ile donatılmış sevk sistemlerinde başarı ile kullanılabilir ve daha uzun kullanım ömrü sağlamaktadırlar. Diğer avantajlar: frenlemeden geri kazanılan rejeneratif enerjiyi kullanma kabiliyetleri, geliştirmelerinde geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılmış olmaları, mükemmel termal özellikler (-30 °C'den + 70 °C'ye kadar çalışma sıcaklığı), akü şarj etme ve boşaltma güvenliği vb. özellikleri şeklinde sıralanabilir. Li-Ion ve NiMH piller arasındaki bir karşılaştırmada, hücre açısından bakıldığında, Li-Ion pillerin %20 oranında artan bir özgül enerji sunduğu gösterilmiştir. Ancak tüm pil sistemi dikkate alındığında, Li-Ion teknolojisindeki pil yönetim sisteminin eklenen kütlesi ile Ni-MH pil yönetim sisteminin daha basit, daha düşük ağırlıkta olduğu söylenebilir. Ni-MH pillerin dezavantajları, artan ağırlık ve eskimiş teknolojidir. Elektrikli araç pil

teknolojisi alanında son yıllarda yapılan araştırmalar, klasik Ni-MH piller arasından diğer pil türlerini geliştirerek ilerleme kaydetmiştir [23].

2.3.2.4. Metal-Hava Bataryalar

Günümüz teknolojisi ile birlikte bataryalar ters akım verilerek şarj edilmektedir. Ancak metal-hava bataryalar ise ters akımla şarj olmadıkları gibi aksine elektrotları yenileriyle değiştirilmeleri gerekmektedir. Yapıları açısından bataryalara benzeseler de özellikleri yönüyle yakıt hücreleriyle karşılaştırılabilirler. Genellikle günümüzde mevcut olarak kullanılan sadece çinko hava bataryaları bulunmaktadır. Birkaç yeni hava pili için ayrıca çalışmalar yapılmaktadır. Çinko hava pili, örneğin işitme cihazlarında yıllardır kullanılmaktadır. Bataryanın büyük enerji yoğunluğu sayesinde uzun süre dayanan bir pile ihtiyaç duyulan küçük cihazlarda daha çok kullanılması sağlanmaktadır. Bataryadaki çinko, hava ile reaksiyona girerek çinko oksit oluşturur. Günümüz teknolojisinde bu pil türlerinin EA'da kullanımı söz konusu değildir. Ancak gelecek yıllarda özellikle lityum- hava pilleri EA'da kullanılabilir [23].

2.3.2.5. Süper Kapasitörler

Süper kapasitörler diğer kimyasal bataryalarla karşılaştırıldığında onlardan oldukça farklıdır. Bataryalar enerjilerini bir süper kapasitörün fiziksel olarak biriktirdiği yerde kimyasal olarak depolamaktadır. Bir süper kapasitör hücresinin içinde bir elektrolitte ayrıcı ile ayrılmış iki plaka bulunur. Kondansatör, elektronları toplayıcılarda statik olarak depolar. Kolektörler yüksek yüzey alanına sahip bir malzemeden imal edilmiştir. Süper kapasitörler akülerden çok daha hızlı şarj ve deşarj edilebilir ve EA'larda rejeneratif frenlemeden enerji depolamak, yüksek yerlere tırmanmak veya ani hızlanma için çok uygundur. Süper kapasitör, 5000 W / kg'ye kadar yüksek özgül güce ve 300.000 devirden fazla çevrim ömrüne sahiptirler. Fakat 5 Wh / kg'lik düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu nedenle süper kapasitör yalnızca bir EA için enerji depolama olarak kullanılamazlar [23].

2.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Haberleşme Sistemleri

EA’larda bulunan taşıt kontrol konfigürasyonları, konvansiyonel araçlardaki motor kontrol ünitesine benzeri bir yapıdadır. EM’nin, bataryanın ve diğer yardımcı birimlerin (inverter, soğutma sistemi vb.) kontrol edilmesi için üst düzeyde bir kontrol sistemine ihtiyaç vardır. EA’ların alt konfigürasyonlarındaki sensörlerden olan CAN Bus, kendisine gelen sinyalleri, kendi alt sistemlerinde gömülü algoritmalarıyla değerlendirerek beklenilene en uygun şekilde ayarlayan ve haberleşmeyi sağlayan bir genel yönetici sistemdir.

2.4.1. CAN Bus Haberleşme Sistemi

Alman firma olan Bosch tarafından 1986 yılında tanıtılan “Control Area Network Bus” yani “Kontrol Ağı Veri Yolu” adındaki CAN Bus sistemi yalnızca araç içindeki yerleşik kablo demetlerinden kurtulma amacını taşıyan bir veri haberleşme sistemidir. Bu haberleşme sistemi, CAN Bus protokolleri üzerinden gönderilen iletilerin CAN Bus standartlarına sahip cihazlar tarafından güvenli ve seri bir şekilde tespit edilip verisel haberleşme yapılması mantığı ile çalışmaktadır. Performansının ve güvenilirliğinin yüksek seviyede olması nedeni ile bugün otomotiv uygulamaları haricinde robot kontrolü, makine kontrol birimleri, akıllı binalar ve laboratuvar otomasyonu gibi uygulama alanlarında da veri iletişimi sağlamak için kullanılmaktadır [24].

CAN Bus haberleşme sistemi vasıtasıyla bir EA’daki hız, yakıt miktarı, yakıt tüketimi, sıcaklık gibi pek çok durum bilgisi anlık olarak görülebilir ve izlenebilir. Yapılan araştırmalara göre bu veri alışverişindeki bir küçük hatanın yalnızca yüzyılda bir oluşabilme ihtimalinin olması bu sistemin ne kadar güvenli bir sistem olduğunu açıkça göstermektedir. EA’lardaki veri aktarımlarında böyle güvenli ve hızlı bir sistemi kullanmak kablo demeti karmaşıklığını ve buna bağlı olarak kablo ağırlığını da azaltmaktadır. Tüm bunlarla birlikte veri alışverişi konfigürasyonunda herhangi bir bileşenin bozulması ya da kaybolması diğer bileşenlerin ve sistemlerin çalışmasını etkilemez ve diğer bileşenler çalışmaya devam eder. Bu durum sistemin genel çalışma güvenliğini daha da arttırmaktadır. [24].

3. MATERİYAL ve METOD

Bu bölümde, giriş bölümünde değinilen Elektrikli bir prototip minibüsün fiziksel performans testleri kapsamında yer alan Enerji Tüketim testinin nasıl yapıldığından ve tüketim sonuçlarının nasıl elde edildiğinden bahsedilmiştir. Ardından bahse konu minibüs üzerinde gerçekleştirilen fiziksel enerji tüketim testinin detaylarından bahsedilmiş ve sonuçlar gösterilmiştir. Son bölümde ise bu elektrikli aracın fiziksel ve dinamiksel özellikleri kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında matematiksel olarak modellenmesinden ve aynı Enerji Tüketim Testi'nin simülasyon ortamında araca uygulanmasından bahsedilmiştir. Simülasyon sonuçları analiz edilerek gerçek hayatta yapılan fiziksel test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Enerji Tüketim Testi

Ticari ve binek olarak kullanılmak üzere üretilen tüm araçların proje aşamasında ve sonunda bir dizi fiziksel testi gerçekleştirilir. Artan rekabet ortamında üreticilerin farklılıklarını ve otomotiv piyasasında öncü olmalarını sağlayabilecek en önemli faktörlerinden biri de enerji tüketim verileridir. Dizel, benzin, CNG, LNG, hibrit ve elektrikli olmak üzere birçok farklı yakıt kaynağı ile çalışan bu araçların fiziksel enerji tüketim verilerinin hesaplanabilmesi için Uluslar Arası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP) tarafından Standartlaştırılmış Yol Testi (SORT) Prosedürü belirlenmiş ve tüm akaryakıtlı araçların enerji tüketim testi bu UITP SORT 2014 prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir. Günümüzde hali hazırda kullanılan bu prosedüre ek olarak elektrikli ve hibrit araçlarında kullanımın dünya çapında yaygınlaşması ile birlikte yalnızca akaryakıtlı araçların değil elektrik ve hibrit olarak çalışan araçlar içinde bir enerji tüketim testi prosedürün ortaya çıkartılmasına ihtiyaç duyulduğundan 2017 yılında ana prosedüre ek olarak UITP Advancing Public Transport E-SORT Addendum Prosedürü geliştirilmiş ve yayınlamıştır. Hâlihazırda üretilen tüm elektrikli toplu taşıma araçlarının enerji tüketim testleri bu prosedürlere göre gerçekleştirilmektedir [5],[6].

3.1.1. SORT Döngüsü Parametrelerinin Belirlenmesi

Her üretici ürettiği aracın enerji tüketimini hesaplamak için kendi operasyon modelini yansıtan bir hız çevrimi döngüsüne sahip olmak ister. Fakat bu durum mümkün değildir. Eğer mümkün olsaydı otobüs güzergâhları kadar döngüye ihtiyaç duyulacaktır. Ayrıca bazı şehirlerde aynı araçların her birinin kendine has özellikleri olan farklı rotalarda çalışması gerekmektedir. Bu durumdan dolayı temel SORT felsefesi ortaya çıkmıştır. Şirketlerin operasyonlarını bir bütün olarak değerlendirebilecekleri şekilde belirli sayıda sürüş döngüsü tasarlanan bu prosedür farklı kombinasyonlardaki temel birkaç döngüden (trapezlerden) oluşur. Döngüler temsili olamasalar da bunların kombinasyonları mevcuttur. Bu nedenle, her bir üreticinin kendisini önerilen döngülere göre konumlandırması ve kendi ağırlıklandırma katsayılarını (yerel durumun gerektirdiği kadar çok olabilir) tanımlaması gerekmektedir. Bu prosedür üzerindeki şartlar da gerçekleştirilen deneyimle ve üretimlerinde doğru enerji tüketimine ulaşmalarındaki yardım için geçmiş istatistikleri kullanarak, her üretici her bir rotanın özelliklerini tanımlayabilmekte ve böylece rotalarındaki farklı araç türlerinin tüketimini doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Prosedürde belirtilen ağırlıklandırma katsayıları, ideal olarak ihale aşamasında şartnamelerde belirtilecek ve imalatçılar tarafından ilan edilen münferit çevrim sonuçlarına göre teorik tüketimin hesaplanmasına temel teşkil edecektir. Standartlaştırılmış bir yol testi sayesinde her üreticinin elde ettiği ortak verileri birbirlerine karşı rekabet olarak da kullanılabilir. Standartlaştırılmış yol testinde bir takım durma noktaları bulunmaktadır. Bu noktaların her biri bir hızlanma, sabit bir hız esnemesi (bölüm hedef hızı) ve bir frenleme aşaması ile tanımlanan trapezlerden oluşmaktadır. Her bir trapezin sonunda, trafiğe bağlı durakları (kapı açılmadan) yansıtan bir durma süresi sağlanmaktadır. Her bir trapez, yolcu binış ve inişini temsil eden bir durma süresi sağlanmasıyla sona ermektedir. Dolayısıyla test sırasında kapı açma ve kapama işlemleri gerçekleştirilir. Basit ve tekrarlanabilir testlere ihtiyaç duyulması nedeniyle, uzun döngüler önerilmiştir. Bununla birlikte, test sürücüsünün dengeli bir sürüş modelini benimseyebilmesi için aynı trapezlerden temel döngüler oluşturulmuştur. Bu koşullar altında, profesyonel sürücüler ile gerçek hayattaki sürüş koşullarına daha yakın, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Belirli sayıdaki trapezlerden oluşan modüllerin tekrarlanması,

sonuçların kalitesinin iki kez kontrol edilmesine ve hatta çok fazla olan sonuçların numuneden çıkarılmasına olanak sağlama avantajına da sahiptir.

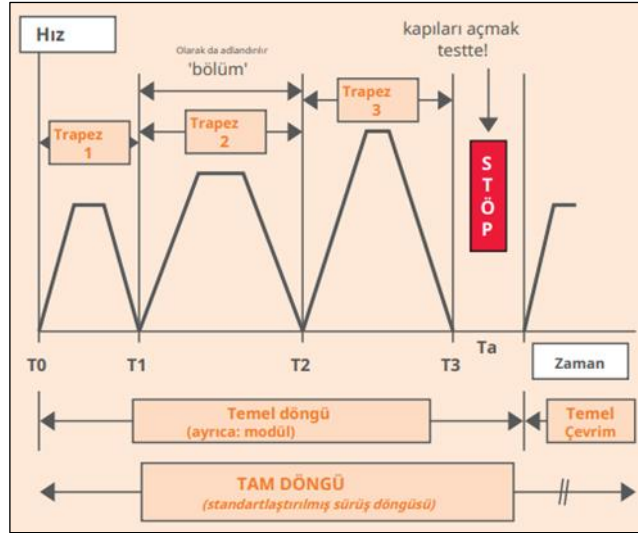
3.1.2. Ticari Hız Bazında Karakterize Edilmiş Sürüş Çevrimleri

Her şehirdeki yerleşme durumu ve trafik seviyeleri, her otobüs servisinin her kullanıcıya özgü çalışma ortamı, genellikle gerçek bir çeşitlendirmeyi gerekli kılmaktadır.



Şekil 3.1: Şehir içi otobüs kullanımı.

Yalnızca bir kentsel trafik döngüsü üzerine test yapılması çok sade ve karşılaştırma için yetersiz kalacağından dolayı SORT projesinin altında yatan temel basitleştirme ihtiyacını ve her şeyden önce sonuçların kullanıcılar tarafından öngörülen en yaygın kullanımını göz önünde bulundurarak, her biri otobüs güzergahındaki ortalama hız ile karakterize edilen üç temel döngü ortaya çıkarılmıştır. Bu da her toplu taşıma şirketinin yıllık raporlarında belirtilen ticari araç hız limitlerine eşittir. Döngülerin yapısı aşağıda verilmiştir.



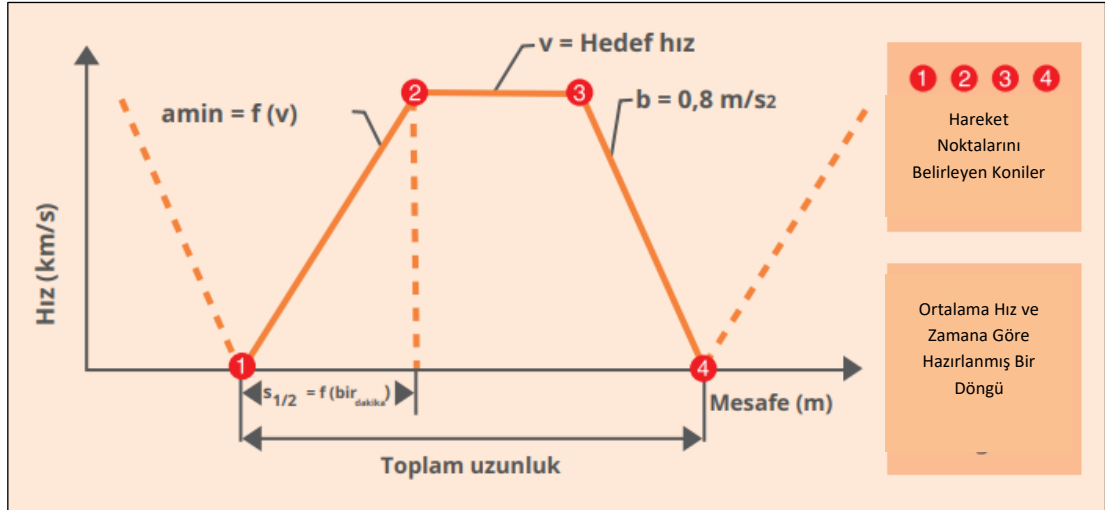
Şekil 3.2: Temel SORT döngüsünün yapısı.

3.1.3. Pratik SORT Sürüş Çevrimlerinin Oluşturulması

Herhangi bir test döngüsü için kolayca tekrarlanabilir olması mutlak bir zorunluluktur. Bu nedenle, temel döngü tasarımı her biri 3 bölümden oluşan 3 trapez kombinasyonu olarak tanımlanmıştır. Bahsedilen trapezlerdeki 3 bölüm ise hızlanma, sabit (hedef) hız ve yavaşlama şeklinde oluşmaktadır.

Şekil 3.2'deki grafikten görüleceği üzere sürüşler sırasındaki ivmeler, 2 numaralı trafik konisinde hedef hıza ulaşacak şekilde olmalıdır. İvmeler, Tablo 3.1'deki değerlerden düşük olmamalıdır. Ulaşılan hedef hız ise en az 3 numaralı trafik konisine kadar korunmalıdır.

Frenleme aşaması 3 numaralı konide başlamakta ve 4 numaralı trafik konisinde bitmektedir. Frenleme aşaması mümkün olduğu kadar tek tip olmalıdır.

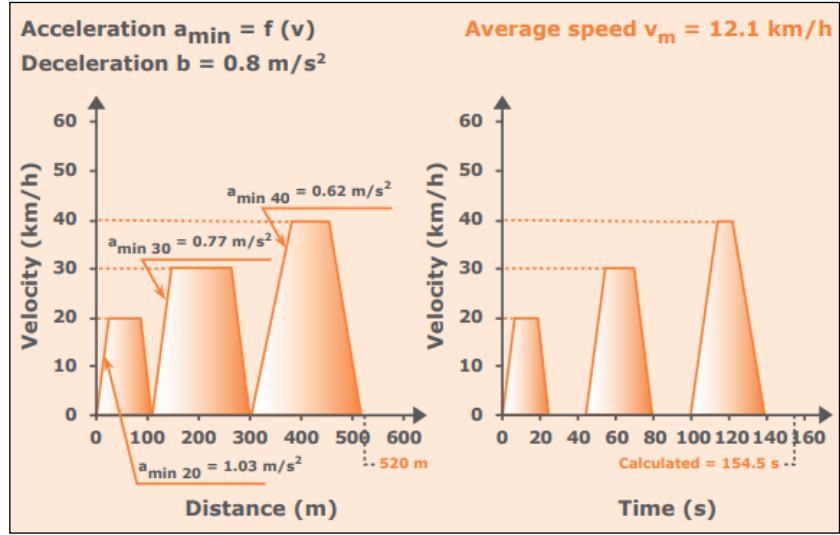


Şekil 3.3: SORT döngüsüne ait bir trapez.

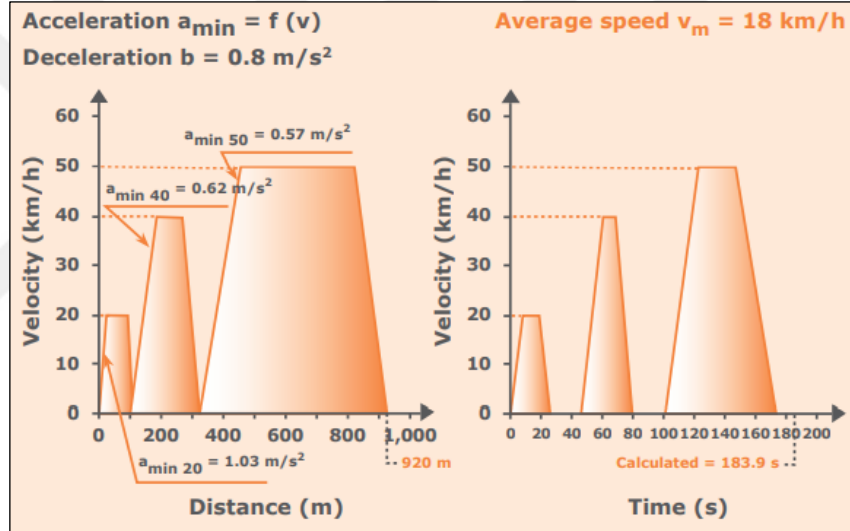
Tablo 3.1: SORT trapezi verileri.

V sabit (km/s)	Toplam Uzunluk (m) Mesafe Koni 1-4	Durum Koni 2 (m) [bir SORT = v * v/2 sn]	Durum Koni 3 (m) Frenleme Mesafe	Mesafe Sabit Hız (m) Koni 2-3
20	100	15 [1,03 m/s²]	80.7 [19.3]	65.7
30	200	45 [0,77 m/s²]	156.6 [43.4]	111.6
40	220	100 [0,62 m/s²]	142,8 [77,2]	42.8
50	600	170 [0,57 m/s²]	479,4 [120,6]	309.4
60	650	300 [0,46 m/s²]	476.4 [173.6]	176.4

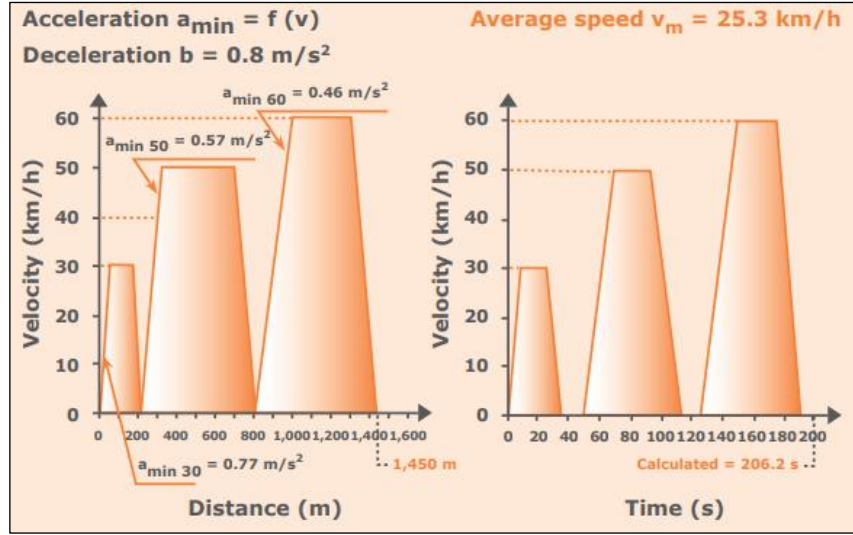
Yoğun Şehir Trafikini (SORT 1), karışık trafik olarak da adlandırılan Kolay Şehir Trafikini (SORT 2) ve Kolay Banliyö Trafikini (SORT 3) temsil etmek üzere 3 farklı temel döngü tanımlanmıştır. Her döngü, farklı duraklar arasında bölünmüş belirli bir durma süresi içermektedir. Durma süresi, her çevrimin ortalama hızına uyarlanmıştır. Durma yüzdesi, çoğunlukla pratik deneyimler sonucunda oluşturulmuştur. SORT-1 döngüsü Şekil 3.4'te, SORT-2 döngüsü Şekil 3.5'de, SORT-3 döngüsü ise Şekil 3.6'de verilmiştir. Her üç döngünün de sahip olduğu özellikler ve birbirine göre kıyaslamalı durumları Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.4: SORT-1 Yoğun şehir trafiği döngüsü.



Şekil 3.5: SORT-2 Kolay şehir trafiği döngüsü.



Şekil 3.6: SORT-3 Kolay banliyö trafiği döngüsü.

Tablo 3.2: 3 SORT döngüsünün karşılaştırılması.

	SORT-1	SORT-2	SORT-3
Nominal ortalama hız (km/s)	12.1	18	25.3
Duraklar/km	5.8	3.3	2.1
Durma zamanı (%)	39.7	33.4	20.1
Trapez 1 v-sabit. (km/s)/uzunluk (m)	20/100	20/100	30/200
Hızlanma (m/s ²)	1.03	1.03	0,77
Trapez 2 v-sabit. (km/s)/uzunluk (m)	30/200	40/220	50/600
Hızlanma (m/s ²)	0.77	0.62	0,57
Trapez 3 v-sabit. (km/s)/uzunluk (m)	40/220	50/600	60/650
Hızlanma (m/s ²)	0.62	0.57	0,46
Duraklarda Durma Süreleri (s)	20/20/20	20/20/20	20/10/10
Toplam uzunluk (m)	520	920	1.450
Yavaşlama (m/s ²)	0.8	0.8	0.8

Örnek olarak, SORT-1 (Yoğun Şehir Trafiği) ayrıntılı olarak açıklamak gerekirse bu döngü, 20 km/s, 30 km/s ve 40 km/s sabit hızları içeren 3 trapezden oluşur. Her trapezden sonra 20 saniyelik bir durma süresi bulunmaktadır. Böylece bir döngü toplam 60 saniyelik bir bekleme süresine sahiptir. Bu döngünün ortalama hızı yaklaşık 12 km/s'dir [6].

SORT-1'de olduğu gibi, SORT-2 ve SORT-3 döngülerinde de 3 temel trapez bulunmaktadır. SORT-2'de toplam bekleme süresi 60 saniyedir. SORT-3 döngüsü için 3 trapezin yanı sıra tek fark toplam azaltılmış durma süresidir. Bu süre 40 saniyedir [6].

SORT döngülerinin dünya genelinde hangi ülkelerin trafik durumlarını simüle ettiği incelendiğinde ise SORT-1 döngüsünün Fransa'da Paris şehir merkezi veya İngiltere'den Londra gibi şehirlerin trafik durumlarına yakın olduğu tespit edilmiştir. SORT-2 döngüsünün ise İspanya'dan Madrid veya Almanya'daki Münih şehri gibi belirli rotaların durumuna daha yakın olduğu tespit edilmiştir [6].

Son olarak SORT-3 döngüsünün Avusturya'dan Klagenfurt gibi veya Fransa'nın kırsal bölgeyi gibi küçük şehirlerdeki trafiği temsil ettiği belirlenmiştir [6].

Büyük şehirlerde şehir içi trafikte ortalama hız için tipik değerler 10-14 km/s; küçük şehirler için 16-20 km/s civarındadır; banliyö otobüs hatları ortalama 25-30 km/s hıza ulaşmaktadır [6].

3.1.4. SORT Döngüsü Uygulamalarında Dikkat Edilecek Hususlar

Bireysel SORT döngüleri için hareket noktalarının (1, 2, 3, 4) ölçülmesi ve bu noktaların trafik konileri kullanılarak işaretlenmesi gerekmektedir.

Yalnızca 520 m olan SORT-1 döngüsü, arka arkaya en az iki kez toplamda 1.040 m olacak şekilde sürülmelidir.

SORT-2 (920 m) ve SORT-3 (1.450 m) döngülerinin en az bir kez gerçekleştirilmesi yeterlidir.

İlgili her döngünün testi için birçok tekrarlı ölçümün alınması ve bu tekrarlı ölçüm sürüşleri içinden seçilecek 3 adet ölçüm arasında %2'lik bir benzerlik olması gerekmektedir. Bu gereksinim yakalanana kadar gerekirse döngülerde sürüşler tekrarlanmalıdır. Ölçüm sonucu ise bu 3 değerın ortalaması olarak kabul edilmektedir.

Trapezlerdeki sürüş sırasında hedef hız toleransı ± 1 km/s'dir. Hızlanma aşamasından sabit hızda sürüş aşamasına geçiş sırasında, anlık olarak maksimum + 3 km/h'lık bir sapmaya izin verilir. Her ölçüm arasında en fazla 10 dakikadan fazla zaman geçmemelidir. Yakıt tüketimi ölçüm toleransı, üretici tarafından sağlanan SORT tüketim değerleri ile kontrol edildiğinde sonuçlar arasındaki maksimum sapma %5'i geçmemelidir [6].

3.2. Elektrikli Araçlarda Yapılan Enerji Tüketim Testi

Elektrikli araç üretiminin ve kullanımının hızlıca yaygınlaşması ile birlikte UITP SORT 2014 prosedürünün ek versiyonu geliştirilmiş ve UITP Advancing Public Transport E-SORT Addendum prosedürü yayınlanmıştır. [5] Bu prosedür EA'larda ve HEA'larda uygulanabilmektedir. Bu prosedüre göre test edilmeden önce bir aracın 300 km boyunca sürülmüş olması gerekmektedir. Dahası üretici firma test edilecek aracın testini gerçekleştirdikten sonra pazarlama sırasında aracın testten önce 300km boyunca sürüldüğünü kanıtlaması ve belgelendirmiş olması gerekmektedir.[5]

3.2.1. EV SORT Döngüsünde Ölçüm Metodu

EA'larda yapılan SORT döngüsü kapsamında EA'nın bataryasına giden ve bataryasından alınan enerjinin ölçümü yapılırken, bataryaya mümkün olduğu kadar yakın ölçülme yapılmalıdır. Tüm ölçüm cihazlarının (araçta ve şarj altyapısında) bağımsız bir laboratuvar tarafından kalibre edilmiş olması ve sertifikalarla kanıtlanmış olması gerekmektedir. Kalibrasyonun kanıtlanabilmesi durumunda aracın CAN BUS haberleşme sisteminden alınan verilerinin kullanımına izin verilir.

Yerleşik enerji değerlerini elde ederken, en az $\pm 2\%$ genel doğrulukta ve en az 20 Hz frekansta bir veri toplama sistemi ya da cihazı tarafından ölçülmesi gerekmektedir.

EA'lar State Of Charge (SOC) yani aracın şarj durumu adı verilen bataryaya bağlı bir değişkene sahiptirler. Elektrikli aracın bataryası SOC uyarısı verene kadar yani yetersiz batarya durumu uyarısı verene kadar deşarj edilmektedir. Ardından araç şarj edilmeye başlanır ve şarj süresi kaydedilir. Bahse konu şarj süresinin ise 6 saati geçmemesi beklenmektedir.

3.2.2. EV SORT Protokolünde Test Koşulları

3.2.2.1. Test Parkuru/Yolu Fiziksel Şartları

Test için seçilen parkurun yol yüzeyi çukurlar, tümsekler veya engebelli kısımlardan arındırılmış olması gerekmektedir. Ayrıca test parkurunun yüzey alanı kuru olmalıdır. Sürüşler parkurun bir noktasından diğer noktasına doğru gerçekleştirilirken aynı sayıda ters yönde de test ve ölçüm işlemi gerçekleştirilmelidir. Parkurun yüzey eğimi maksimum %1.5 şeklinde olmalıdır. Test sonucunda her iki yönden alınan ölçümlerin ortalaması alındıktan sonra ölçüm sonucu kabul edilmektedir.

Parkur uzunluğu, en azından bir tam döngü gerçekleştirmeye yetecek kadar uzun olmalıdır. Hem çekiş gücü hem de yenilenebilir enerji etkileneceğinden elektrikli araç, geleneksel bir dizel aktarma organına kıyasla yol eğimlerine karşı daha duyarlı olacaktır. Ölçümün bozulmasını önlemek için, testin başlangıç noktası ile bitiş noktası arasındaki yükseklik farkı 0,50 metreden az olmalıdır.

3.2.2.2. Test için Hava Şartları,

Rüzgar hızı 3 m/s'nin altında olacaktır. 8 m/s'ye kadar olan ani dalgalanmalı kısa rüzgarlar kabul edilebilir. Testlerin başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru ve tam tersine doğru her iki yönde de yapılması gerektiğinden rüzgar yönü önemli değildir. Her iki yöndeki sonuçlar ortalama olarak sunulmaktadır.

Testler sırasında dış ortam sıcaklığı 0 ile 30° C arasında olmalıdır. Nem seviyesi %95'in altında olacaktır. Test ortamındaki kabul edilebilir atmosferik hava basıncı DIN 70030-1 standardına göre ölçülür. Testten önce ve test sırasında ortam sıcaklığı ve basıncı ölçülür. Bu veriler, belirli bir formüle göre hava yoğunluğunun hesaplanmasını sağlar. Sonuç, 1 barlık referans basıncın +/- %7,5'lik marjı içinde olmalıdır.

3.2.3. Elektrikli Aracın Test için Hazırlanması

Bahse konu protokol yalnızca ticari amaçlı ulaşımda kullanılan toplu taşıma araçlarına yönelik yapılacak enerji tüketimi testini kapsamaktadır. Bu nedenle protokolde araç tipleri her zaman otobüstür. Otobüsün tipine göre boyutları değişmektedir. Testten önce elektrikli otobüsün bu protokole göre yüklenmesi gerekmektedir.

Hesaplamalar sırasında otobüsün sırası ile Uzunluk (L), Genişlik (W), Koltuk Sayısı (N), varsa Harici Yakıt Deposu Kapasitesi (F) gibi parametreleri kullanılır. Örnek olarak uzunluğu (L) 12m, genişliği (W) 2,55m, tam yük ağırlığı 3,2 ton, koltuk sayısı (N) 30, harici yakıt deposu kapasitesi 200 litre olan bir otobüsün aşağıdaki formüllere göre sırası ile Yüklenmesi Gereken Yük Faktörü (C_L), Koltukların Yük Faktörü (C_S), Akaryakıt Ağırlığının Yük Faktörü (C_F) değerleri hesaplanabilmektedir.

$$Aracın\ Yüzeyi = (12,00 - 1,20) \times 2,55 = 27,54\ m^2 \quad (3.1)$$

$$Birim\ Yüzeye\ Düşen\ Ağırlık = \frac{3200}{27,54} = 116,19\ kg/m^2 \quad (3.2)$$

$$Koltuk\ Sayısı / Yüzey\ Oranı = \frac{30}{27,54} = 1,09\ koltuk/m^2 \quad (3.3)$$

$$Yakıt\ Hacmi / Yüzey\ Oranı = \frac{200}{27,54} = 7,26\ litre/m^2 \quad (3.4)$$

Hesaplamalarından sonra aşağıdaki denklemler elde edilmektedir. Bu aşamadan sonra prosedüre göre farklı uzunluğa, genişliğe, ağırlığa sahip olan araçlar için aşağıda belirtilen formüller ve katsayılar tek tip kabul edilmiş ve uygulanmıştır. Farklı araçların uzunluk ve genişliklerine göre bu formüller kullanılarak yük faktörü (C_L) hesaplanmaktadır.

$$C_L = 116,19 \times (L - 1,20) \times W \quad (3.5)$$

$$C_S = \{1,09 \times (L - 1,20) \times W\} \quad (3.6)$$

$$C_F = 7,26x(L - 1,20)xW \quad (3.7)$$

Test edilecek araç, yük faktörleri hesaplandıktan sonra şoför ağırlığı da dahil edilerek yüklenmelidir. Bu nedenle sürücünün ağırlığı hesaplanan toplam yük faktöründen çıkarılmalıdır. Eğer araç içinde test sırasında farklı kişilerde bulunacak ise bu kişilerin de ağırlıkları toplam yük faktöründen çıkarılması gerekmektedir. Araçta ölçüm için kullanılan teçhizat ve ölçüm cihazlarının ağırlıkları da aynı şekilde toplam yük faktöründen çıkarılmalıdır. Ayrıca araçta klima, ek çatı ısıtması, kompresör, otomatik araç izleme sistemi, yolcu bilgi sistemleri gibi bulunan ek opsiyonel konfigürasyonların da ağırlıkları yük faktöründen çıkartılmalıdır.

3.2.4. Elektrikli SORT Döngüsü Öncesinde ve Test Sırasında Dikkat Edilecek Hususlar

Test için hazırlanan EA'nın testten önce ısıtma ve havalandırma ekipmanlarının kapalı olması gerekmektedir. Ayrıca aracın yalnızca kısa farları açık olmalı, harici iç aydınlatması da dahil olmak üzere tüm aydınlatma sisteminin kapalı olması gerekmektedir.

Test edilecek EA'nın seri üretime girecek standarttaki bir prototip araç olması gerekmektedir. Testler sırasında kullanılan EA'da lastik yüzeyinin %80 oranında aşınmamış olması gerekmektedir. Ayrıca lastik basınçları üreticinin tavsiye ettiği değere ayarlanması gerekmektedir.

Araçta eğer rejeneratif frenleme sistemi var ise testler sırasında bu özelliğin aktif olması gerekmektedir.

Testler sırasında hava tankı basıncı da minimum seviyenin altına düşmemelidir.

Testler sırasında her SORT döngüsünün tamamlanmasının ardından kapılar tam açılacak ve tam kapatılacaktır. Fakat araçta eğer elektrikli rampa var ise bu özellik de çalıştırılmayacaktır.

Aracın soğutma suyu, cam sileceği suyu ve harici muhtelif tüm sıvı depoları tam dolu olması gerekmektedir.

Aracın aküsü standart bir akü olması gerekmekte ve çalışır durumda olması gerekmektedir.

Aracın Testten en az 7 gün öncesine kadar 300 km yol boyunca sürülmüş olması gerekmektedir.

3.3. Elektrikli Minibüste Yapılan Enerji Tüketim Testi

Bu bölümde elektrikli bir minibüsün SORT prosedürüne göre test edilmesi ve enerji tüketiminin hesaplanması anlatılmıştır.

3.3.1. Test Hazırlık Aşaması

Test edilecek EA testten önce 300km boyunca sürülmüştür. Test öncesinde tüm opsiyonel modülleri (ısıtıcı sistem, klima sistemi, multimedya sistemi, tüm ekranlar, kablosuz iletişim modülleri ve kart okuma sistemleri) kapatılmıştır.

Test boyunca aracın batarya tüketiminin ölçülmesi için %2'lik bir ölçüm belirsizliğine sahip 100 Hz frekansta okuma yapabilen bir data logger cihazı tedarik edilmiş ve kalibre ettirilmiştir. Şekil 3.7'de data logger cihazının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.7: Racelogic VBOX 2 data logger.

3.3.2. Test Aracının Belirlenmesi ve Özellikleri

SORT Prosedürü'ne göre gerçekleştirilecek testte şehir içi kullanım için tasarlanmış bir elektrikli minibüs seçilmiştir. Bu elektrikli minibüsün teknik özellikleri ise Tablo 3.3'te belirtilmiştir.

Tablo 3.3: Test aracı özellikleri.

Parametre	Değer	Birim	Açıklama
Araç Tipi	EV VP3 M2, N2		
Uzunluk (L)	5,845	m	
Genişlik (W)	2,055	m	Ayna olmadan
Yükseklik (H)	2,63	m	Klima olmadan
Boş Ağırlık	3464	kg	Ön ve Arka Aks Toplamı
Sürücü Kompartmanı (S)	1,2	m	
Koltuk Sayısı	10	Adet	

3.3.3. Test Aracının Yük Hesabı ve Yüklenmesi

EV araçların test koşulu için nasıl yüklenmesi gerektiği UITP Advancing Public Transport E-SORT Addendum prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada yük faktörü hesaplanmıştır.

$$C_L = 116,19 \times (5,845 - 1,20) \times 2,055 = 1109 \text{ kg} \quad (3.8)$$

Ardından aracın opsiyonel ekipmanlarının ağırlıkları hesaplanmıştır. İlgili ağırlıklar Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4: Opsiyonel ekipman ağırlığı hesaplama tablosu.

Ekipman Adı	Ağırlığı	Birimi
Klima Sistemi	188	kg
Engelli Rampası	18.7	kg
Otomatik Araç Görüntüleme Sistemi (AVM)	12.8	kg
Bilgi Ekipmanları	4.35	kg
Görüntülü Kamera Ekipmanı	1.812	kg
Sürücü Güvenlik Kabini	32	kg
Egzoz Filtreleri	1.933	kg
Toplam Opsiyonel Ekipman Ağırlığı	259,6	kg

Daha sonra diğer ağırlıklar da hesaplanmıştır. Bu ağırlık bilgileri Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5: Diğer ağırlıkları hesaplama tablosu.

Diğer Ağırlık Adı	Ağırlığı	Birimi
Yakıt Sistemi	-	kg
Sürücü Ağırlığı	70	kg
Diğer Ağırlıklar Toplamı	70	kg

Araca yüklenecek toplam yük miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Araca\ Y\k{u}klenecek\ Y\k{u}k = C_L - Opsiyonel\ Ekipman - Di\k{g}er\ A\k{g}ırlıklar \quad (3.9)$$

$$Araca\ Y\k{u}klenecek\ Y\k{u}k = 1109 - 259,6 - 70 = 779,4\ kg \quad (3.10)$$

$$Aracın\ Toplam\ Y\k{u}k\ De\k{g}eri = Boş\ A\k{g}ırlık + Araca\ Y\k{u}klenecek\ Y\k{u}k \quad (3.11)$$

$$Aracın\ Toplam\ Y\k{u}k\ De\k{g}eri = 3464 + 779,4 = 4243,4\ kg \quad (3.12)$$

Aracın toplam yük değeri hesaplandıktan sonra aracın ön ve arka akslarının boş ağırlıklarının oranına göre uygun bir şekilde dağıtılarak araç yüklenmiştir. Yükleme sırasında her biri 20 kg'den oluşan kum torbaları kullanılmıştır. Araç ağırlık ölçüm cihazına bağlanarak anlık yük miktarı takip edilmiştir. İlgili yüklemeye yönelik görüntü Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Test aracı yükleme görüntüsü.

doğrudan aracın CAN haberleşme hattına bağlanmakta ve VBOX cihazının paralelinde araçtan CAN haberleşme verisi (hız, konum, batarya gerilimi, bataryadan çekilen akım, motor devri, batarya sıcaklığı, motor sıcaklığı vs.) kaydetmektedir. Tüm veri toplama cihazlarının güç ihtiyacını karşılamak için ise 12 Volt özelliğinde bir adet akü kullanılmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 3.10'te araç üzerinde yapılan bağlantıların görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 3.10: Ölçüm cihazlarının araca bağlantısı.

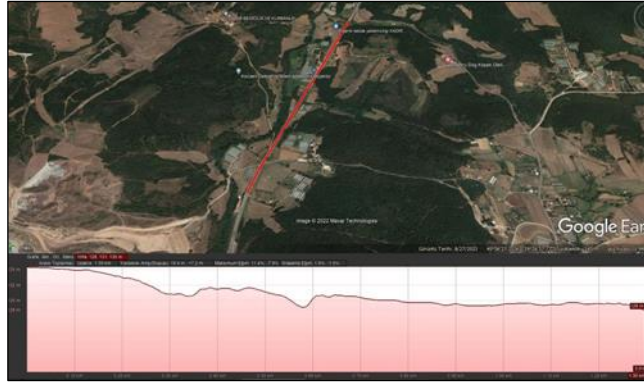
Cihazların EA'ya bağlantısı tamamlandıktan sonra Hem VBOX hem de Neo Fire veri kaydedici cihazlar kendi yazılımları üzerinden Aracın CAN haberleşme hattından sırası ile batarya gerilimi, anlık batarya akımı, batarya SOC değeri, motor devri, batarya sıcaklığı, araç hız bilgisi ve aracın sürüldüğü yol miktarı verileri alınacak şekilde ayarlanmıştır. Her iki cihaz da bu verilerin kaydını gerçekleştirirken yalnızca VBOX cihazı gerçek konum ve hız bilgisini sahip olduğu anten yardımı ile uydudan alarak kaydetmektedir.



Şekil 3.11: CAN haberleşme sistemi veri kaydedici bağlantısı.

3.3.5. Test İçin Uygun Yolun ve Rotanın Belirlenmesi

Bu aşamada testin icra edileceği yol belirlenirken UITP SORT 2014 Prosedürü gereksinimleri dikkate alınmıştır. Seçim kriterlerine göre çukur ve tümseklerin bulunmadığı düz bir parkur seçilmiştir. Parkurun eğimi maksimum %1.5 olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.12: Test rotasının uydu görüntüsü ve eğimi.



Şekil 3.13: Test rotasının görüntüsü.

SORT trapez durma - hızlanma noktaları belirlenmiştir. Bu noktalar 50m’lik metre ile takip edilerek, her SORT için farklı renkte olan püskürtmeli boyalarla yolun işaretlenmesi usulüyle belirlenmiştir. Ayrıca dubalar da SORT yol koşuluna göre hızlanma ve yavaşlama noktalarına konulmuştur ve sürücünün dikkatini çekmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.14: Test yolunun ölçülmesi ve işaretlenmesi.

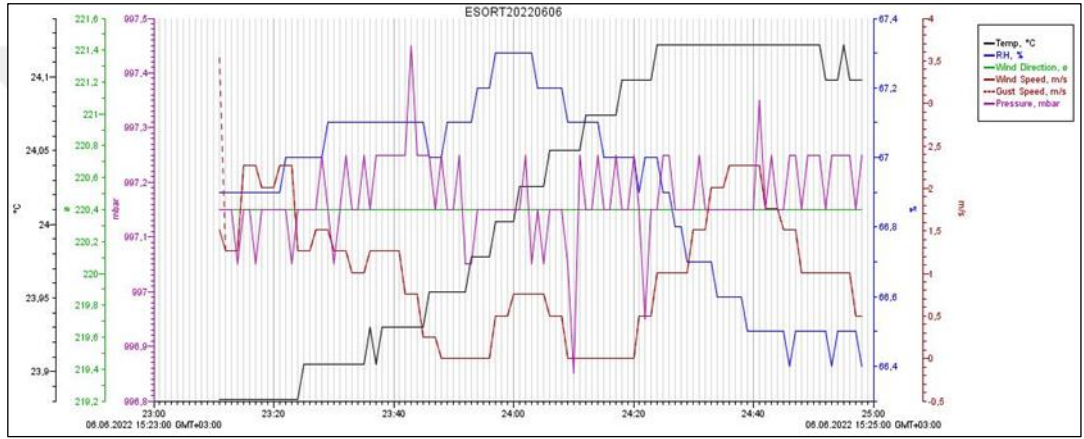
3.3.6. Test İçin Hava Şarlarının Ölçülmesi

UITP SORT 2014 Prosedürü’ne göre rüzgar hızı 3 m/sn’den az olmalıdır. Fakat kısa süreli dalgalanmalarda 8 m/sn hıza kadar izin verilir. Rüzgar yönü, hız sınırları içerisinde önemli değildir. Test sırasında sıcaklık 0-30 °C aralığında olmalıdır. Test sırasında maksimum sıcaklık dalgalanması 5°C’ı geçmemelidir. Test sırasında havanın nem değeri %95’in üzerine çıkmamalıdır. Atmosfer basıncı, referans değer olan 1 Bar’ın +/-%7,5 dışına çıkmamalıdır. Bu isterlere göre testin

gerçekleştirildiği hava şartları aşağıdaki Tablo 3.6’da verilmiştir. Ayrıca Test sırasında kullanılan hava istasyonu cihazı Şekil 3.16’da ve ölçüm grafiği Şekil 3.15’te gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Test sırasında ölçülen hava şartları.

Test Adı	Tarih	Ortam Sıcaklığı	Basınç	Rüzgar Hızı	Rüzgar Yönü	Nem Oranı
SORT 1	06.06.2022	28,75 °C	101,24 kPa	1,54 m/s	206,56°	37,62%
SORT 2	08.06.2022	24,85 °C	105,57 kPa	2,14 m/s	191,69 °	55,01%
SORT 3	10.06.2022	24,83 °C	101,5 kPa	1,92 m/s	176,49 °	66,87%



Şekil 3.15: Hava istasyonu ölçüm sonuç grafiği.



Şekil 3.16: Hava ölçüm istasyonu.

3.3.7. Aracın Sürülmesi ve SORT Çevriminin Gerçekleştirilmesi

Araç test rotasında başlangıç noktasına getirildikten sonra CAN haberleşmesi veri kaydedici cihazından kayıt alınmaya başlanmıştır. Daha sonra başlangıç noktasından bitiş noktasına doğru SORT trapezlerinde araç sürülmüştür. Ardından ters yönde aynı şekilde SORT trapezlerinde araç sürülmüştür. Her iki yönde de yapılan sürüşler; tek yöndeki SORT çevrimi arasında $\pm 2\%$ tüketim benzerliğinde olan 3 sürüş olmak üzere toplamda her iki yön için 6 benzer sürüş yakalanıncaya kadar devam etmiştir. Sonuçta her bir SORT döngüsü için 6 adet ölçümün ortalaması total tüketim değerini vermektedir. Testin yapılışına yönelik hazırlanan resimler Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.17: SORT çevriminin gerçekleştirilmesi.



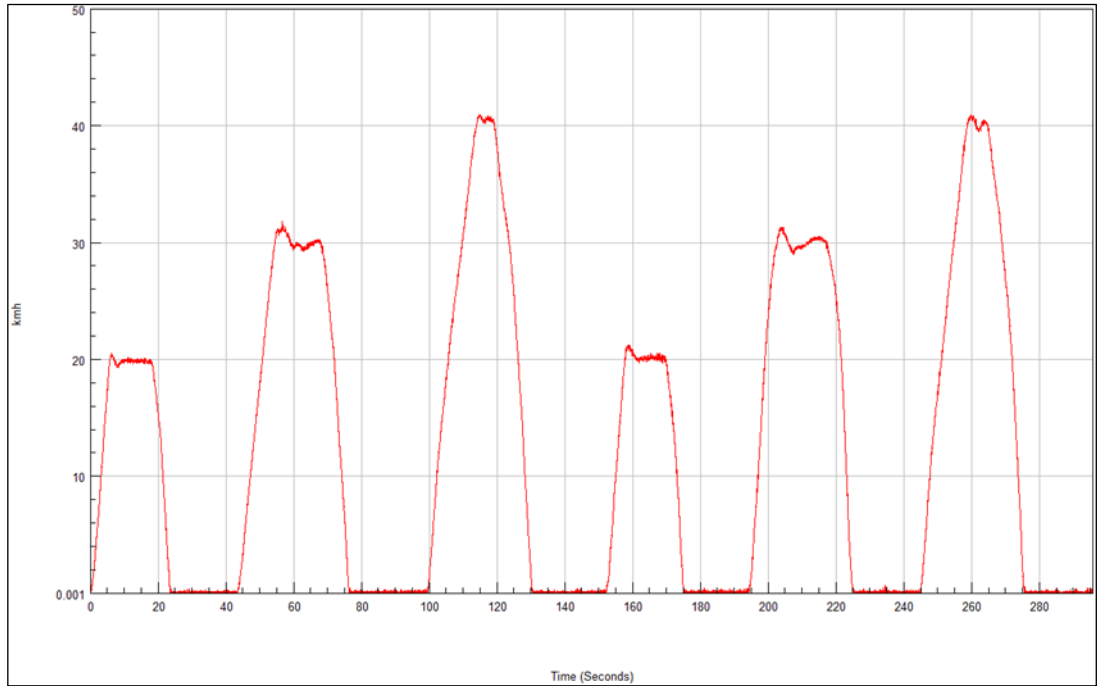
Şekil 3.18: SORT çevriminin gerçekleştirilmesi.

3.3.8. Test Sonrasında Tüketim Verilerinin Elde Edilmesi

Test sonucunda her iki CAN haberleşmesi verisi kaydeden cihazlardan kayıtlar sanal ortamda incelenmiştir. VBOX cihazı aracın hız zaman grafiğini ve enerji tüketim bilgilerini elde etmemizi sağlarken, Neo Fire veri kaydedici cihaz aracın sürüşler boyunca batarya gerilimi, bataryadan çekilen akım bilgisi, batarya sıcaklığı, SOC değeri, motor devri ve araç hız bilgisi verilerini elde etmemizi sağlamıştır. Yapılan incelemeler ile kendi aralarında %2 tüketim benzerliği olan sürüşler çıkartılmış ve her iki yönde benzerlik taşıyan veriler seçilmiş ve aşağıdaki Tablo 3.7’de gösterildiği gibi her bir SORT döngüsü için ortalaması alınarak tüketim değerleri elde edilmiştir. Ayrıca Her bir SORT döngüsüne ait elde edilen hız zaman grafikleri Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de belirtilmiş olup, her bir SORT döngüsüne yönelik detaylı enerji tüketim bilgileri Tablo 3.8, Tablo 3.9 ve Tablo 3.10’da belirtilmiştir.

Tablo 3.7: SORT döngüleri ölçüm sonuçları.

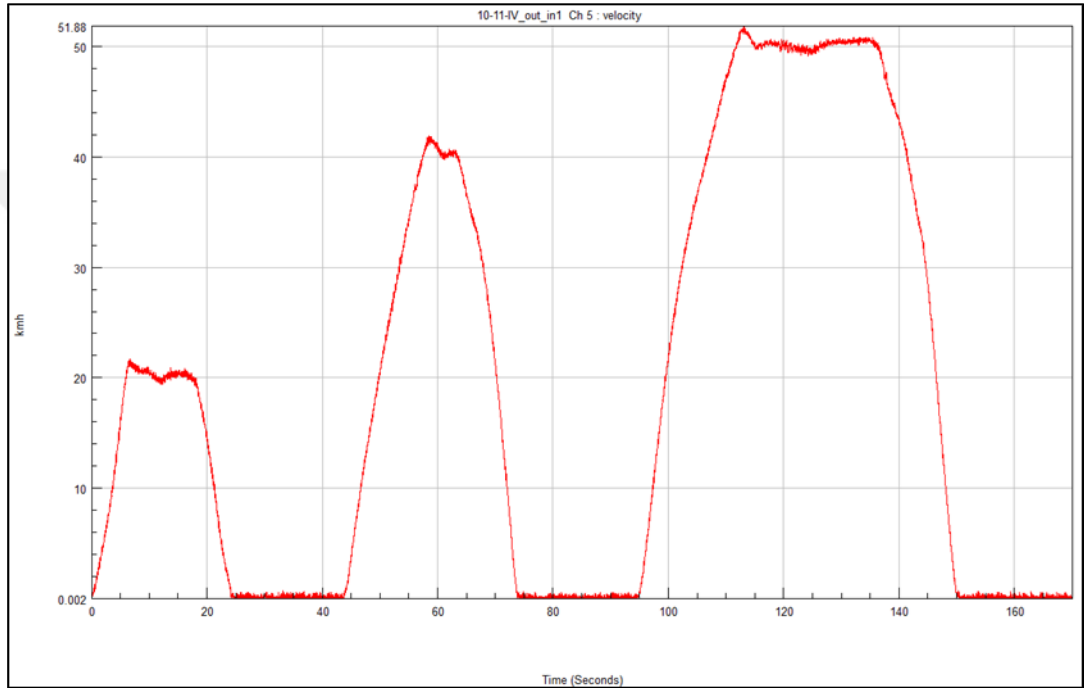
Başlangıç Noktasından Bitiş Noktasına Alınan Ölçümler			
	Test 1	Test 2	Test 3
Toplam Mesafe (m)	1048,04	1047,62	1047,57
Toplam Zaman (s)	296,65	282,21	287,66
Enerji Tüketimi (kW.h/100km)	27,29	27,01	27,2
Ortalama Hız (km/h)	12,72	13,36	13,11
Bitiş Noktasında Başlangıç Noktasına Alınan Ölçümler			
	Test 1	Test 2	Test 3
Toplam Mesafe (m)	1049,1	1047,94	1047,77
Toplam Zaman (s)	294,8	291,46	286,1
Enerji Tüketimi (kW.h/100km)	32,21	32,44	32,54
Ortalama Hız (km/h)	12,81	12,94	1047,77
Ortalama Tüketim Hesaplamaları			
Test 1	Ortalama Hız (km/h)	12,77	
	Enerji Tüketimi (kW.h/100 km)	29,75	
Test 2	Ortalama Hız (km/h)	13,15	
	Enerji Tüketimi (kW.h/100 km)	29,73	
Test 3	Ortalama Hız (km/h)	13,15	
	Enerji Tüketimi (kW.h/100 km)	29,88	



Şekil 3.19: SORT-1 döngüsü hız-zaman grafiği.

Tablo 3.8: SORT-1 ölçüm sonuçları.

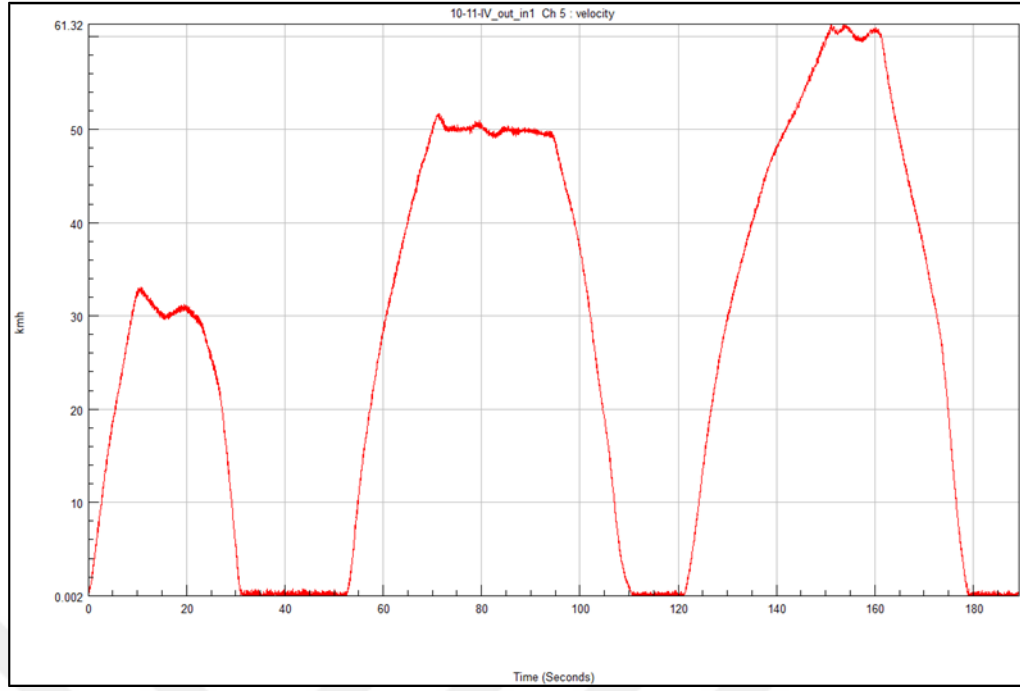
Tanımlama	Değer	Birim
SORT-1’de Alınan Toplam Mesafe	6,29	km
SORT-1’de Tüketilen Toplam Enerji	1,87	kW.h
Test Sırasında Batarya Sıcaklığı	25,9	°C
Test Sonunda Batarya Sıcaklığı	30	°C
SORT-1 Döngüsünde Ortalama Enerji Tüketimi	29,79	kW.h/100 km
SORT-1 Tüketimine Göre Maksimum Menzil	148	km



Şekil 3.20: SORT-2 döngüsü hız-zaman grafiği.

Tablo 3.9: SORT-2 ölçüm sonuçları.

Tanımlama	Değer	Birim
SORT-2’de Alınan Toplam Mesafe	5,52	km
SORT-2’de Tüketilen Toplam Enerji	1,58	kW.h
Test Sırasında Batarya Sıcaklığı	30	°C
Test Sonunda Batarya Sıcaklığı	26	°C
SORT-2 Döngüsünde Ortalama Enerji Tüketimi	28,6	kW.h/100 km
SORT-2 Tüketimine Göre Maksimum Menzil	153,72	km



Şekil 3.21: SORT-3 döngüsü hız-zaman grafiği.

Tablo 3.10: SORT-3 ölçüm sonuçları.

Tanımlama	Değer	Birim
SORT-2’de Alınan Toplam Mesafe	5,52	km
SORT-2’de Tüketilen Toplam Enerji	1,58	kW.h
Test Sırasında Batarya Sıcaklığı	30	°C
Test Sonunda Batarya Sıcaklığı	26	°C
SORT-2 Döngüsünde Ortalama Enerji Tüketimi	28,6	kW.h/100 km
SORT-2 Tüketimine Göre Maksimum Menzil	153,72	km

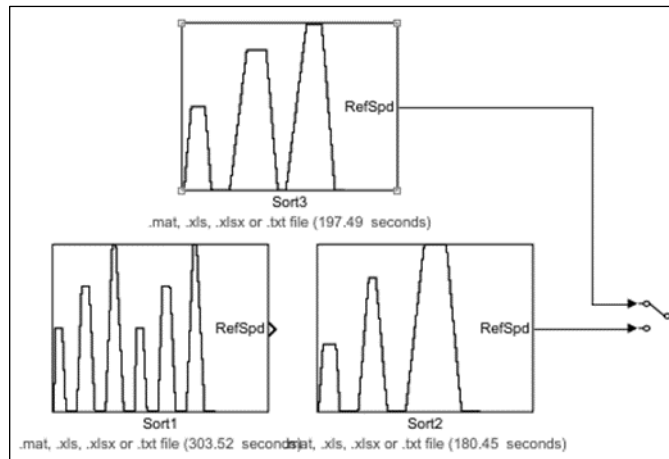
3.4. Elektrikli Aracın Modellenmesi

Bu bölümde fiziksel testi yapılan elektrikli minibüs için MATLAB/Simulink ortamında E-SORT döngüsü için SORT 1-2-3 sürüş çevrimleri oluşturulmuştur. Daha sonra aynı aracın araç dinamik modeli oluşturulmuştur. Aracın belirlenen SORT sürüş çevrimini tamamlaması için sürücüyü temsil eden bir PID denetleyici tasarlanmış ve tekerleğe hangi tork, güç ve hızın iletilmesi gerektiği bulunmuştur. Aracın transmisyon oranı kullanılarak e-motor için gerekli olan mekanik tork, motor dönüş hızı ve motor gücü bulunmuştur. Ardından e-motor modeli oluşturulmuştur. Model oluşturulurken formüller yerine veriler kullanılmıştır. Elde edilen tork ve hız

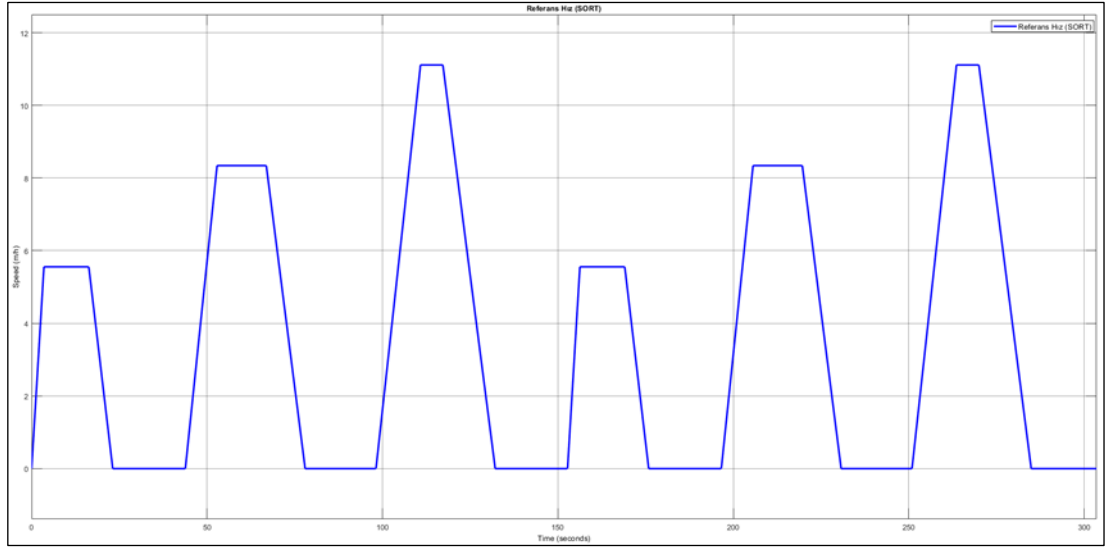
verileri kullanılarak motor verim haritasına göre motorun verim değerleri hesaplanmıştır. E-motorun istenilen mekanik gücü sağlayabilmesi için e-motora verilmesi gereken elektrik gücü bulunmuştur. Daha sonra R_{int} modeli kullanılarak batarya modeli oluşturulmuştur. Akü modelinde motora verilecek güç hesaplanırken aksesuarın direnci ve gücü de hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bataryadan çekilecek gerçek güç hesaplanmıştır. Bataryamızın Şarj Durumu gösteren (SOC) model, bataryadan çekilen güce batarya verimliliği eklenerek oluşturulmuştur. Daha sonra tüketilen enerji analiz edilerek aracın SORT döngüsündeki tüketim değerleri hesaplanmıştır. Matematiksel modelleme için oluşturulan formüller ve araç parametreleri bu bölümde verilmektedir.

3.4.1. Sürüş ve Yol Modeli

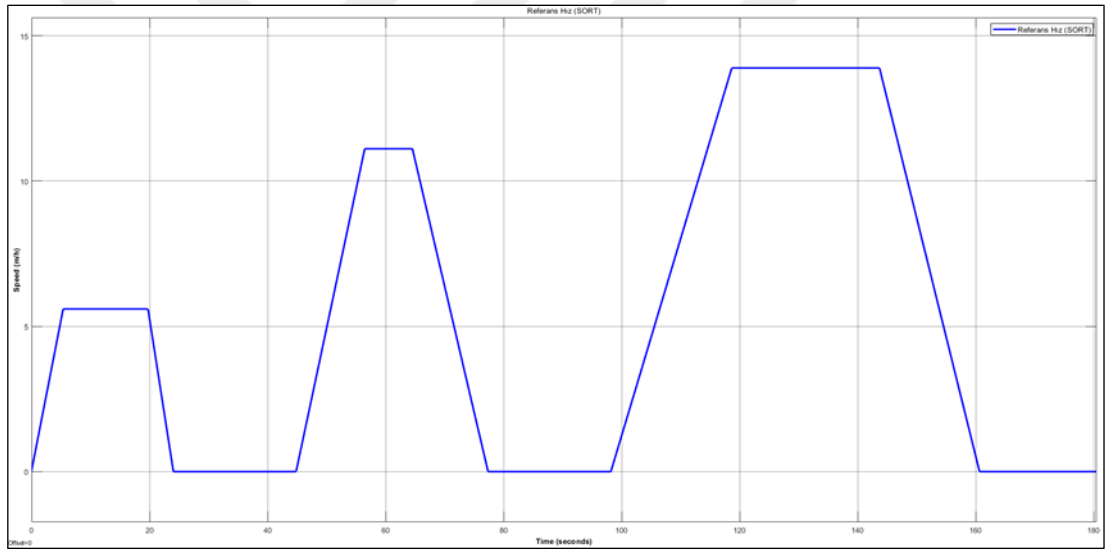
UITP Advancing Public Transport E-SORT Addendum prosedürüne göre fiziksel testi gerçekleştirilen elektrikli aracımızın prosedür içerisinde yeralan SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 sürüş çevrimleri gerekli hızlanma, sabit hızla ilerleme, yavaşlama ve durma noktaları hesaplanarak sürüş çevrimlerinin MATLAB/Simulink ortamına aktarılması sağlanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda sürüş çevrimleri önce Excel ortamına dönüştürülmüş daha sonra Simulink ortamına yüklenmiştir. MATLAB/Simulink ortamına yüklenen yol modeli aşağıdaki Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de verilmiştir.



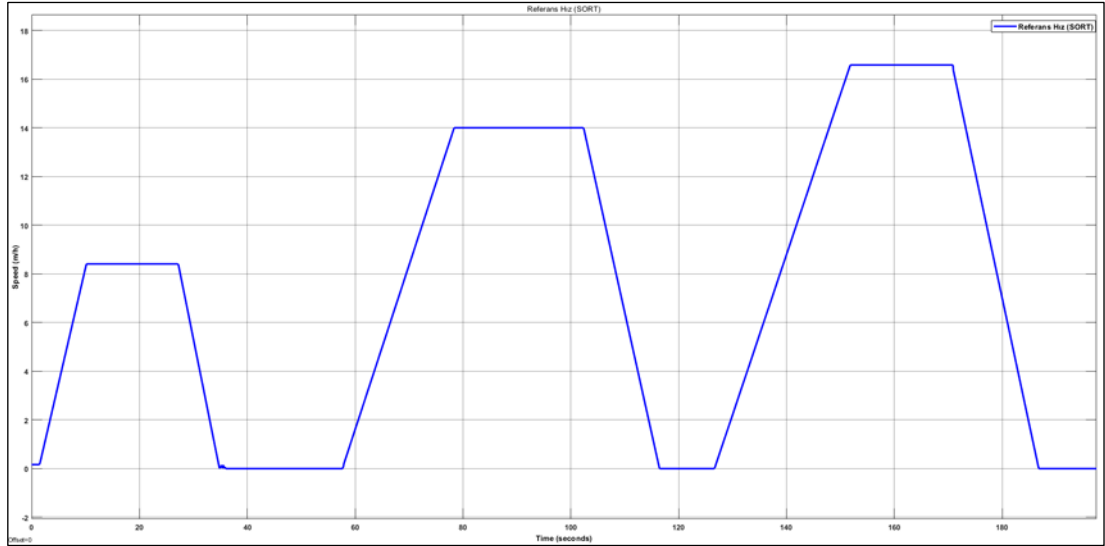
Şekil 3.22: Simulink ortamında SORT-1-2-3.



Şekil 3.23: Simulink ortamında SORT-1.



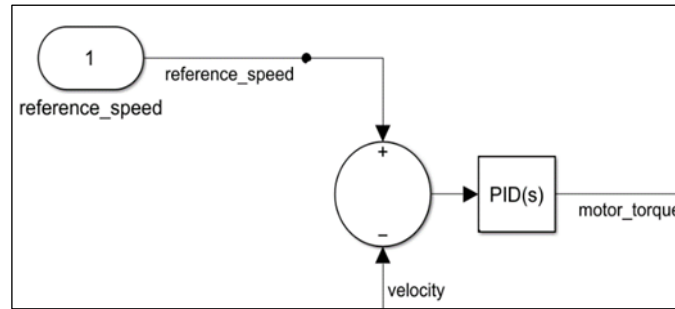
Şekil 3.24: Simulink ortamında SORT-2.



Şekil 3.25: Simulink ortamında SORT-3.

3.4.2. PID Modeli

Simulink ortamında sürüş çevrimleri yüklendikten sonra tasarlan araç modelinin bu sürüş çevrimini takip edebilmesi ve çevrim kurallarına göre hareket edebilmesi için sürücüyü temsil eden bir PID modeli eklenmiştir.

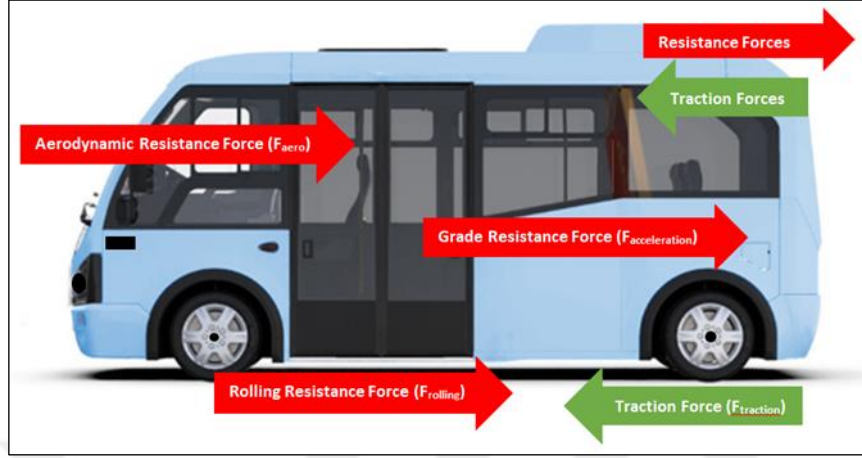


Şekil 3.26: Simulink ortamına eklenen PID kontrolcüsü.

3.4.3. Dinamik Model

Bu bölümde Şekil 3.27’de gösterilen Elektrikli minibüsümüz üzerindeki toplam Direnç Kuvveti ve toplam Tahrik Kuvveti’ne yönelik aşağıdaki formüllere göre modelleme yapılmıştır. Ayrıca Şekil 3.26’te gösterilen bu PID modelinin her

sürüş çevrimini takip ettiği ve sürüş çevrimlerine göre aracın hareketini kontrol ettiği görüntüler Şekil 3.31, Şekil 3.34 ve Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: Elektrikli minibüs üzerindeki kuvvetler.

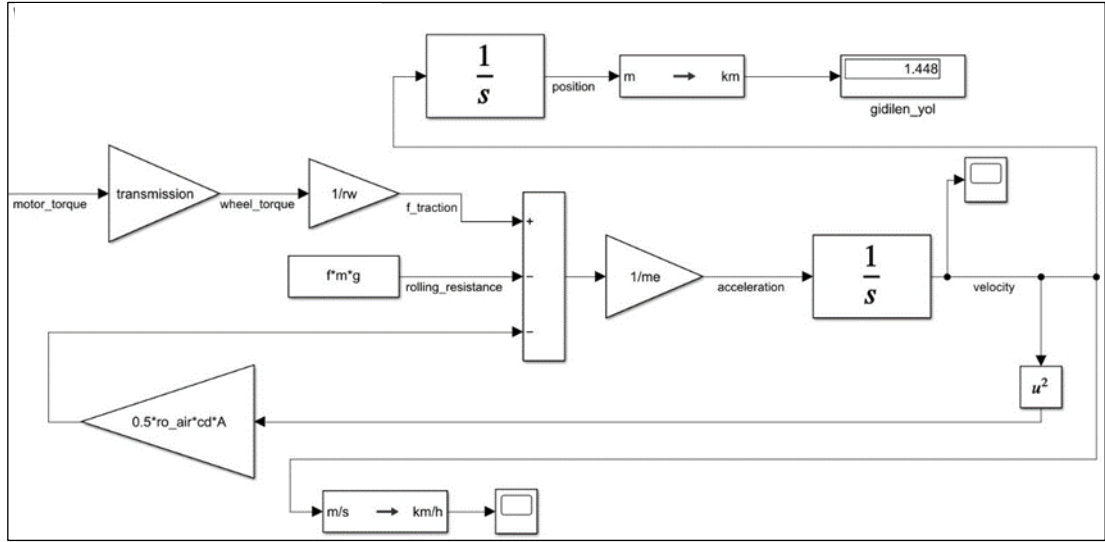
Yukarıdaki şekilden yola çıkılarak aşağıdaki formüller oluşturulmuştur.

$$\sum F = m * a \quad (3.13)$$

$$F_{traction} - F_{rolling} - F_{aero} = F_{acceleration} \quad (3.14)$$

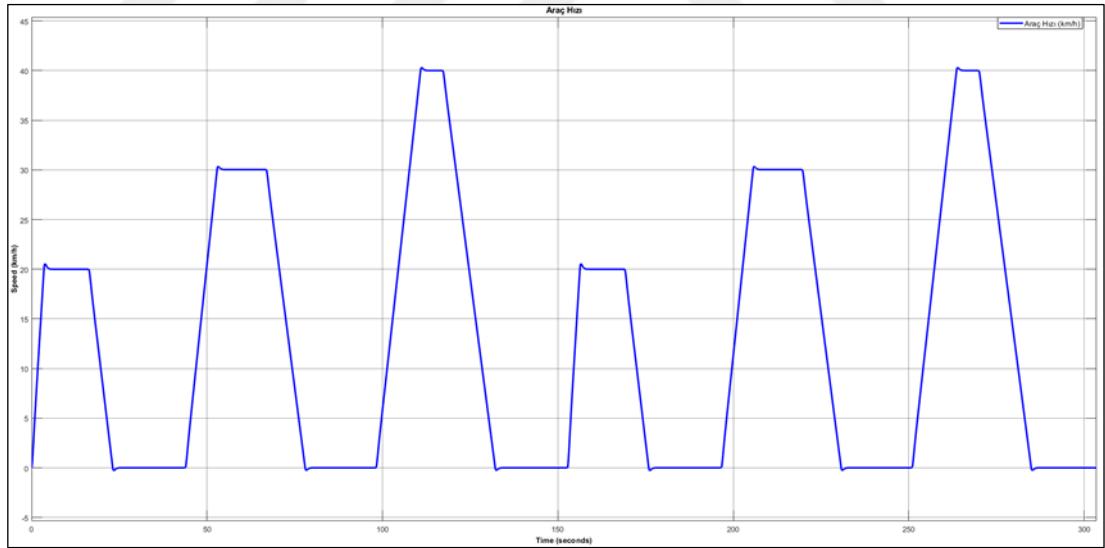
$$F_{traction} - f * m * g - \frac{1}{2} * \sigma_{air} * C_d * A * V^2 = 1.02 * m * \frac{dv}{dt} \quad (3.15)$$

Formüllere göre değişkenler Simulink ortamına eklenmiş ve Şekil 3.28’de gösterilmiştir.

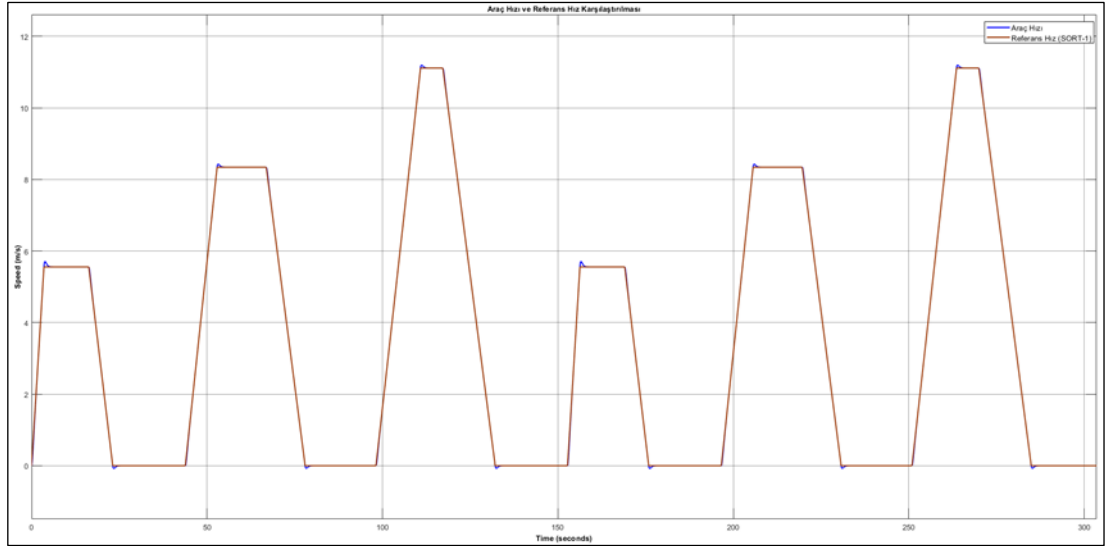


Şekil 3.28: Elektrikli minübüsün dinamik modeli.

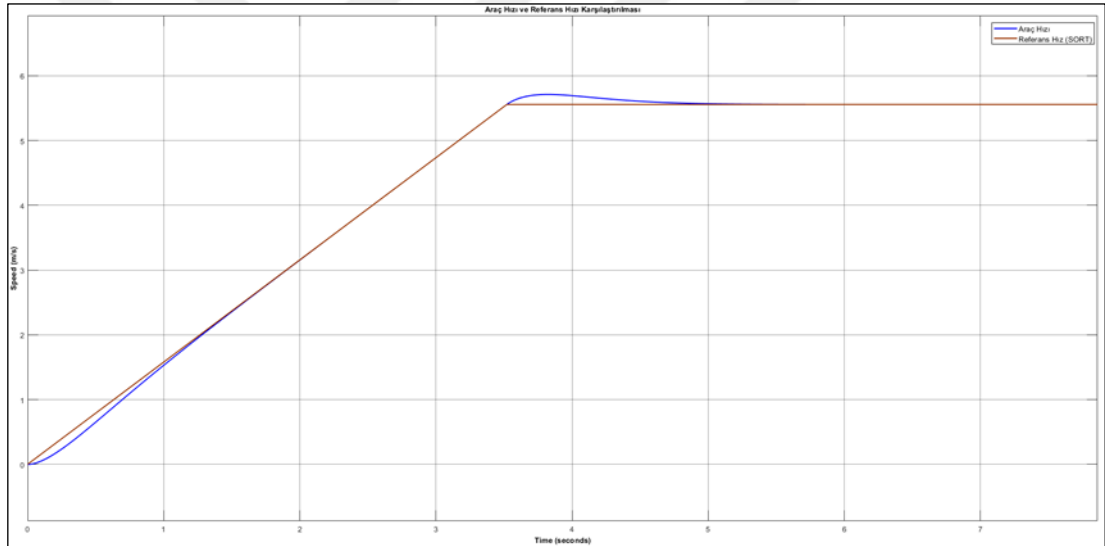
Dinamik modelin kurulmasından ardından simülasyon ortamında SORT-1-2-3 yol çevrimlerine göre aracın hız grafikleri ve sürüş çevrimlerini takip eden PID kontrolcüsünün davranışları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



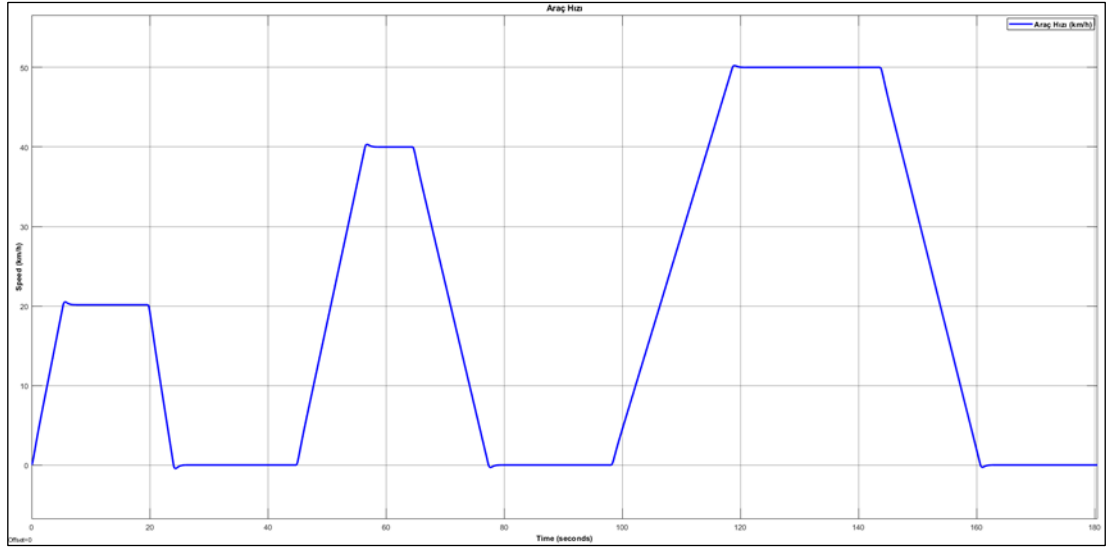
Şekil 3.29: EA'nın SORT-1 çevriminde hız grafiği.



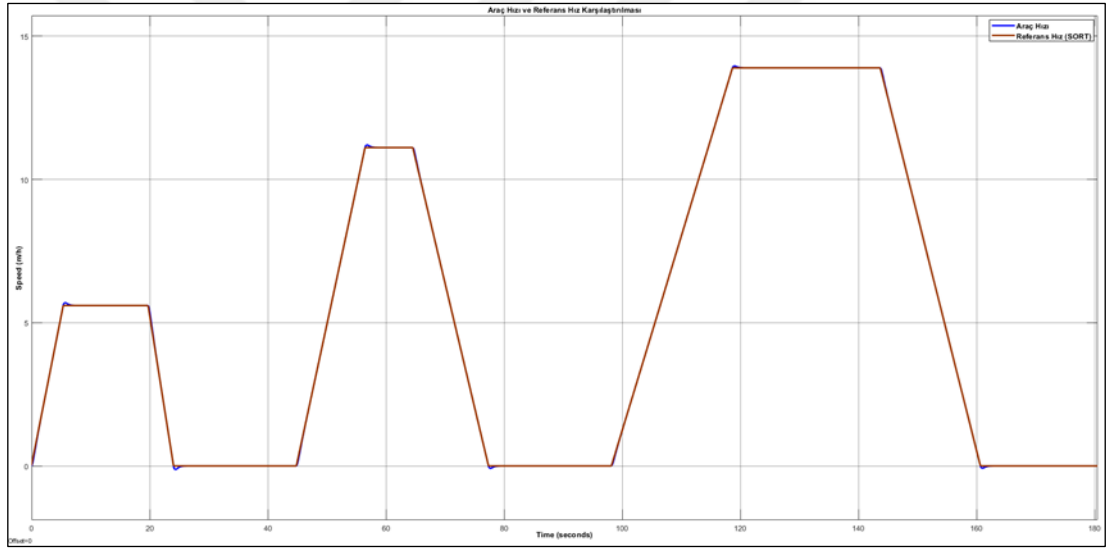
Şekil 3.30: EA'nın hızının SORT-1 referans çevrimine göre davranışı.



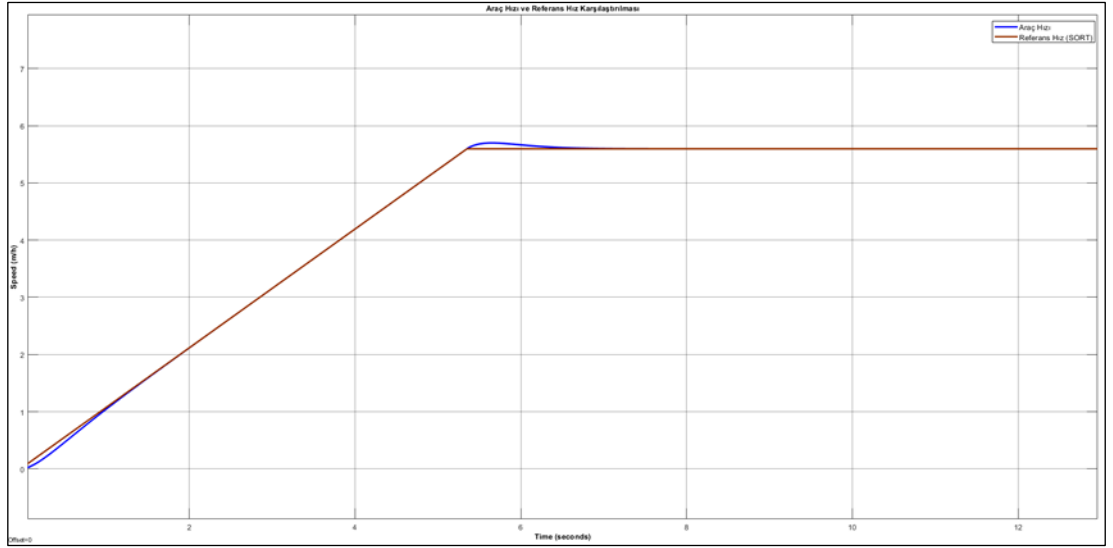
Şekil 3.31: SORT-1 referans çevrimine göre PID davranışı



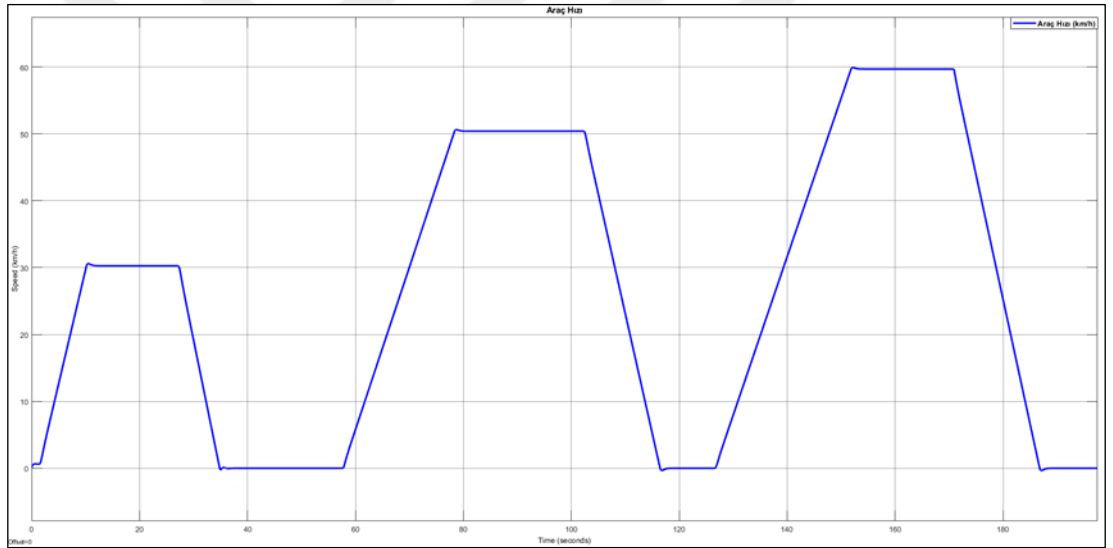
Şekil 3.32: EA'nın SORT-2 çevriminde hız grafiği.



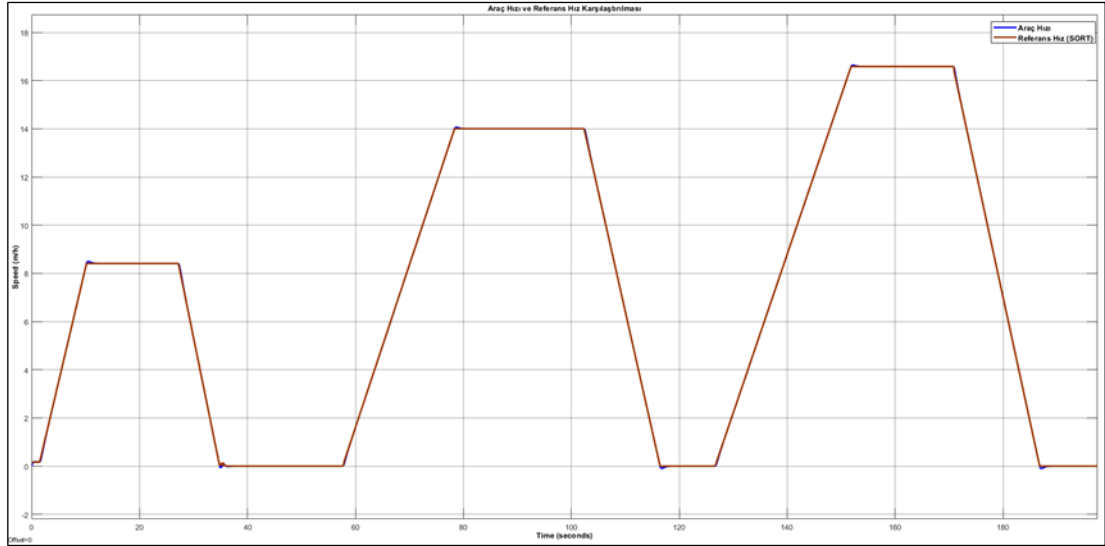
Şekil 3.33: EA'nın hızının SORT-2 referans çevrimine göre davranışı.



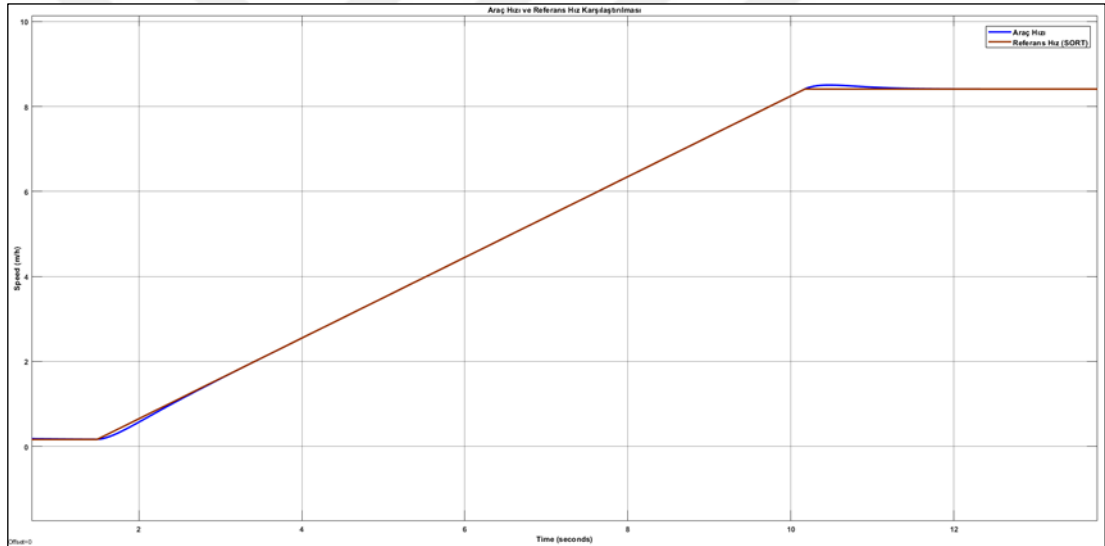
Şekil 3.34: SORT-2 referans çevrimine göre PID davranışı.



Şekil 3.35: EA'nın SORT-3 çevriminde hız grafiği.



Şekil 3.36: EA'nın hızının SORT-3 referans çevrimine göre davranışı.



Şekil 3.37: SORT-3 referans çevrimine göre PID davranışı.

3.4.4. Sürüş Modları

MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan EA'mızın SORT döngülerine göre sürüş yaptığı sırada gerçekleştirilen 3 farklı sürüş modu bulunmaktadır. Bu sürüş modlarına göre sırası ile;

$F_{traction} > 0$ ise aracımız hızlanmakta ya da sabit hızda gitmektedir.

$F_{traction} = 0$ ise aracımız durmaktadır.

$F_{traction} < 0$ ise aracımız yavaşlamakta ve rejeneratif frenleme sistemi devreye girmiş demektir.

3.4.5. Transmisyon modeli

EA'mızın sahip olduğu güç aktarma organlarının parçalarının fiziksel ve dinamiksel özellikleri kullanılarak aşağıdaki formüllere göre simülasyon ortamında SORT döngüsünü tamamlayabilmesi için gerekli olan motor torku, motor dönme hızı ve motor gücü değerleri sırası ile elde edilmiştir.

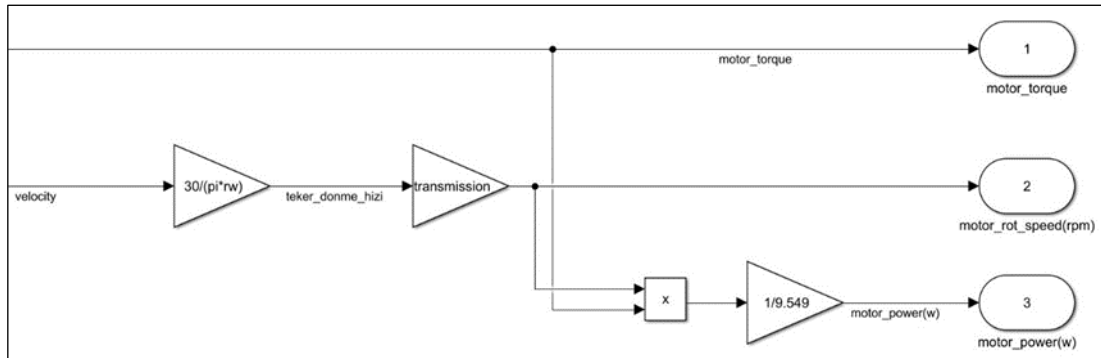
$$F_{traction} * r_w = M_W \quad (3.16)$$

$$M_M = M_W / I_n \quad (3.17)$$

$$n_W = ((\frac{V}{r_W}) / (2 * \frac{\pi}{60})) = ((3 * V) / (\pi * r_W)) \quad (3.18)$$

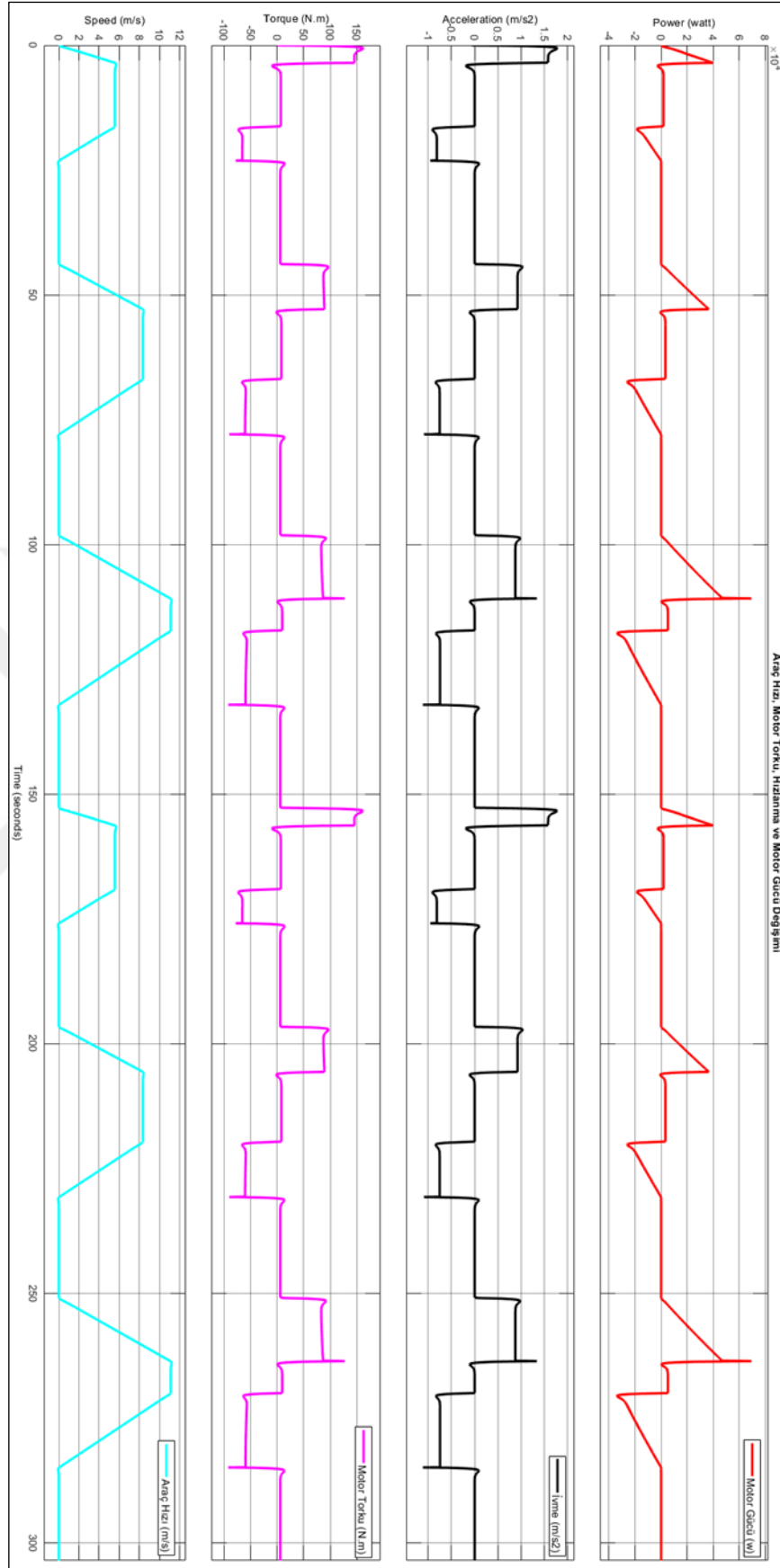
$$n_M = n_W * I_n \quad (3.19)$$

$$N_M = (M_M * n_M) / 9.549 \quad (3.20)$$

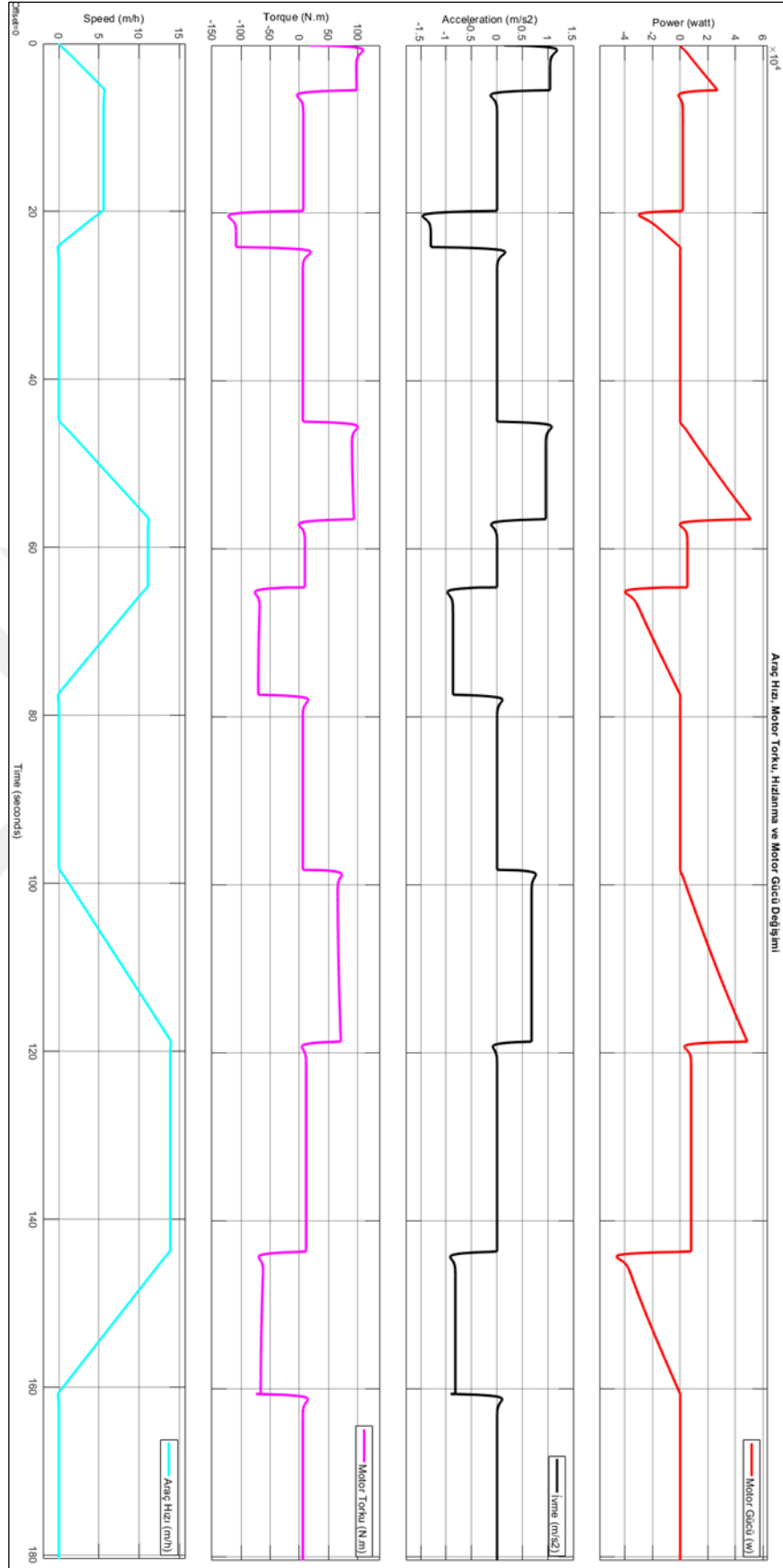


Şekil 3.38: Simulink ortamında transmisyon modelinin tasarımı.

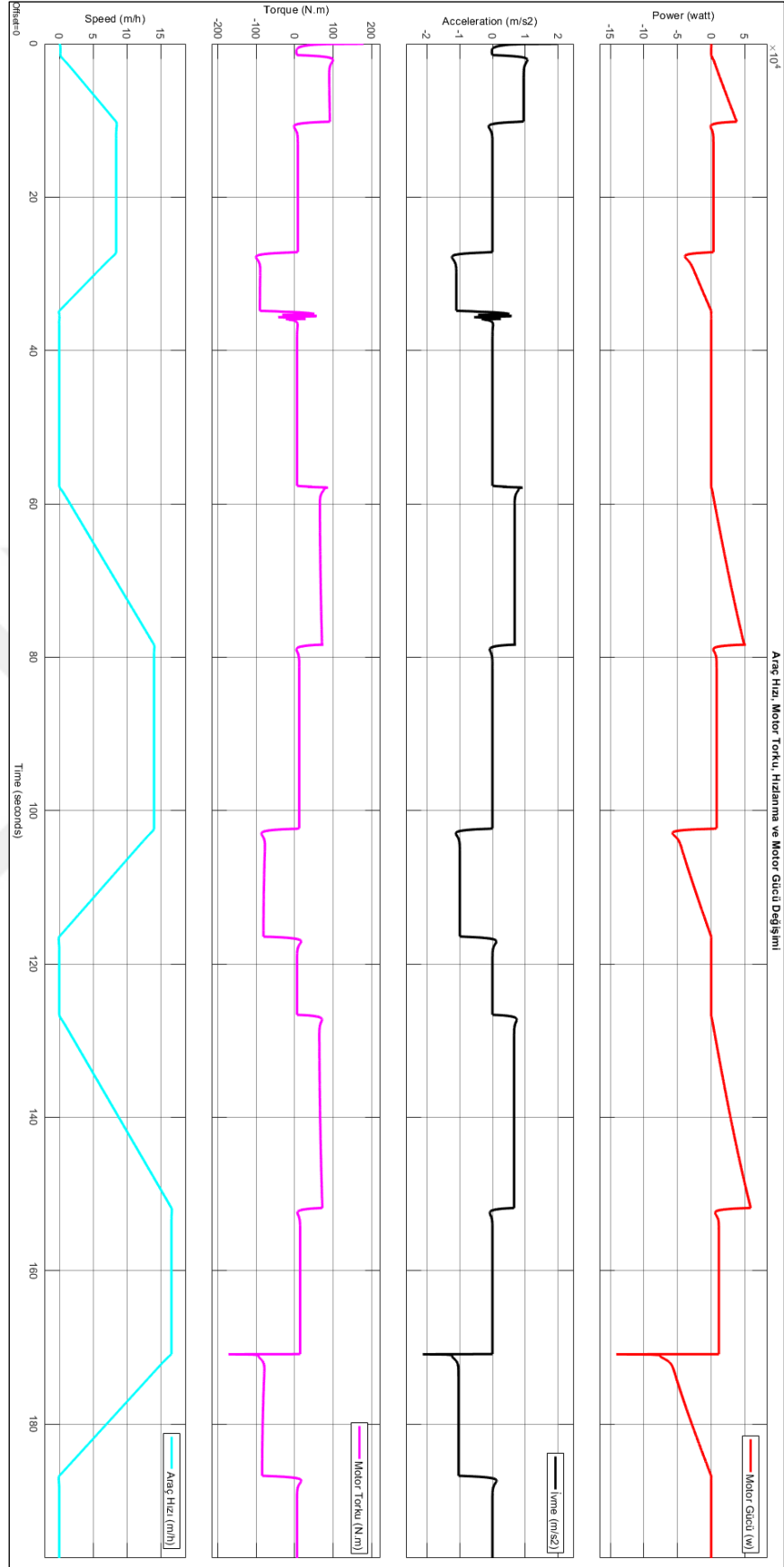
Elde edilen motor torku, motor dönme hızının ve motor mekanik gücünün, aracın sürüldüğü her bir SORT çevrimine göre davranışları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 3.39: SORT-1'de EA'nın hız, motor torku, hızlanma ve motor gücünün davranışları.



Şekil 3.40: SORT-2'de EA'nın hız, motor torku, hızlanma ve motor gücünün davranışları.



Şekil 3.41: SORT-3'de EA'nın hız, motor torku, hızlanma ve motor gücünün davranışları.

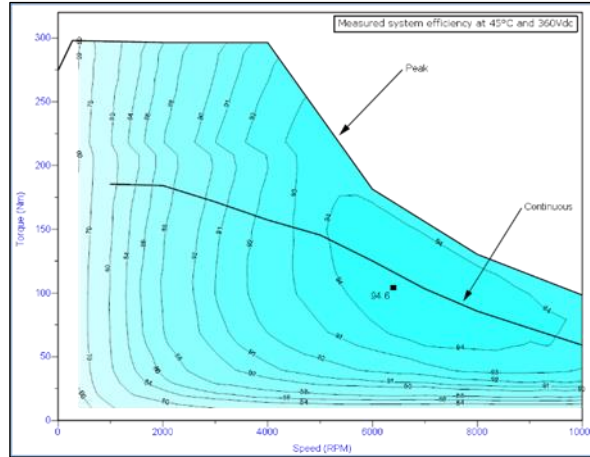
3.4.6. Motor Modeli

Aracın SORT döngülerini tamamlayabilmek için sağlaması gereken motor torku, motor mekanik gücünü ve motor dönme hızını sağlayacak olan motor modelinin Simulink ortamında tasarlanması için aşağıdaki formüller kullanılmıştır. Elektrikli minibüsümüzün elektrik motorunun sahip olduğu verimlilik grafiği ise motor üretici firmasından temin edilmiş ve Excel ortamındaki verimlilik grafiği Simulink ortamında yüklenmiş ve e-motor modeli elde edilmiştir. Model sonucunda e-motorun istenilen motor torku, motor mekanik gücünü ve motor dönme hızını sağlayabilmesi için ihtiyaç duyduğu elektrik güç ve rejeneratif güç toplanmış, sonuçta motorun toplam ihtiyaç duyduğu/tükettiği elektrik gücü hesaplanmıştır. EA'nın motor verimlilik grafiği Şekil 3.42'de ve Simulink ortamında tasarlanan e-motor modeli Şekil 3.43'de gösterilmiştir.

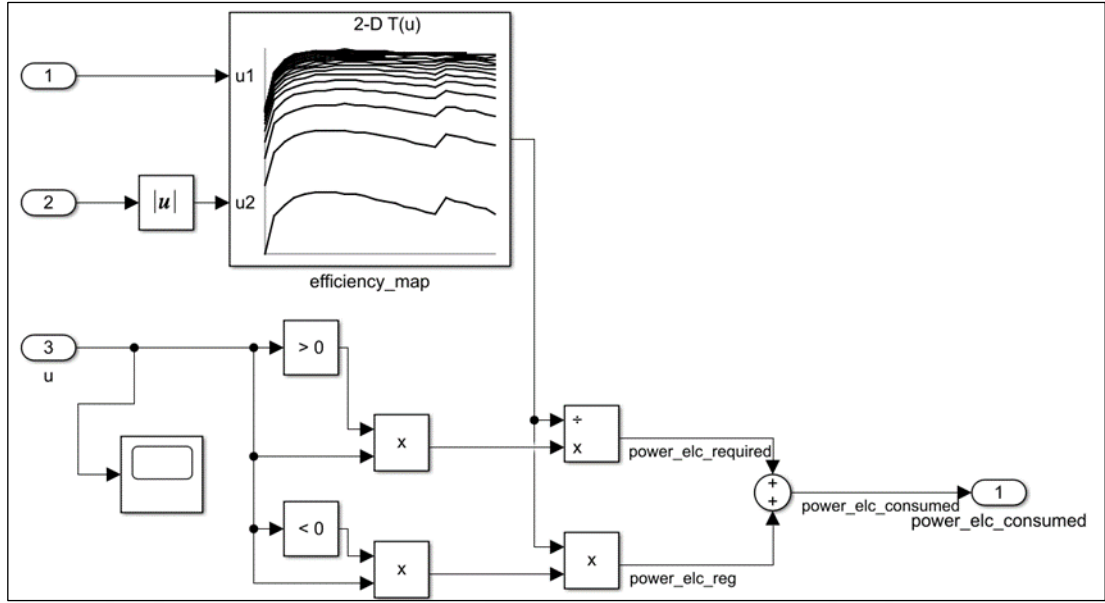
$$N_{MR} = \left(\frac{1}{I_M}\right) * N_{ME} \quad (3.21)$$

$$N_{MRG} = I_M * N_{ME} \quad (3.22)$$

$$N_{MC} = N_{MRG} + N_{MR} \quad (3.23)$$



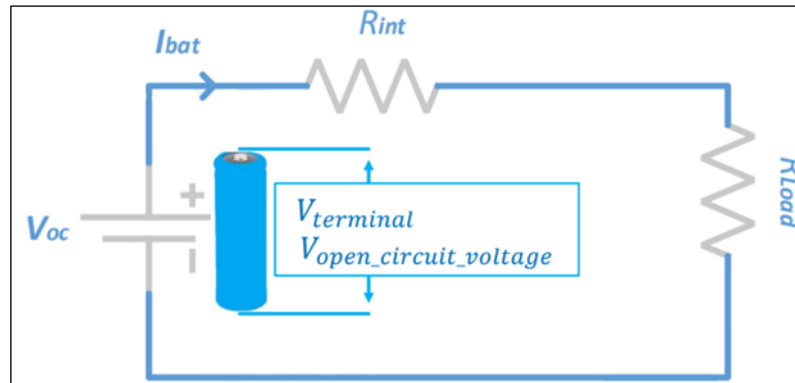
Şekil 3.42: E-Motor verimlilik grafiği.



Şekil 3.43: E-Motor simulink tasarımı.

3.4.7. Akü Sistemi Matematiksel Modeli

E-motor modeli tamamlandıktan sonra SORT çevrimlerini motorun tamamlayabilmesi için gerekli güç değerlerinin (N_{MC}) batarya tarafından sağlanabilmesi için EA'nın sahip olduğu batarya parametreleri de kullanılarak Simulink ortamında batarya modeli oluşturulmuştur. Batarya modeli tasarlanırken aşağıdaki Şekil 3.44'de belirtilen R_{int} modeli kullanılarak formüllere göre batarya modeli elde edilmiştir.



Şekil 3.44: Batarya modeli tasarımı için kullanılan rint modeli.

$$N_L = N_{MC} + N_A \quad (3.24)$$

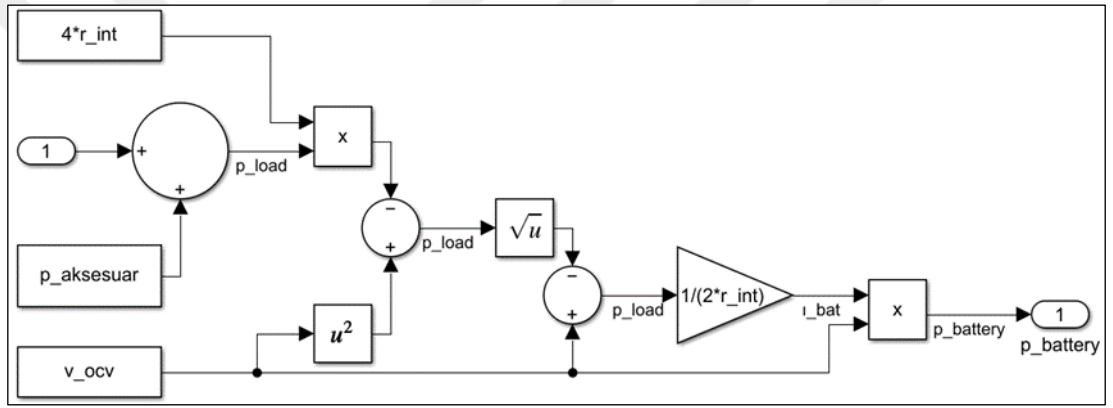
$$N_{BT} = N_{BL} + N_{BLO} \quad (3.25)$$

$$I_{bat} * V_{OCV} = N_L + I_{bat}^2 * R_{int} \quad (3.26)$$

$$0 = I_{bat} * V_{OCV} - N_L - I_{bat}^2 * R_{int} \quad (3.27)$$

$$I_{bat} = \frac{V_{OCV} - \sqrt{V_{OCV}^2 - 4 * R_{int} * N_L}}{2 * R_{int}} \quad (3.28)$$

$$N_{BT} = I_{bat} * V_{OCV} \quad (3.29)$$



Şekil 3.45: Simulink ortamında tasarlanan batarya modeli.

3.4.8. SoC Modeli

Batarya modelinin tasarımı tamamlandıktan sonra EA'nın sürüldüğü yol koşuluna göre tüketmiş olduğu güç ve enerji değerlerinin tespit edilmesi için batarya durumunu gösteren SoC (State of Charge) modeli tasarlanmıştır. SoC modelinin tasarımı ile birlikte bataryadan çekilen toplam güç değeri ve bataryaya rejeneratif sistemden sağlanan toplam güç değerleri kullanılarak, batarya verimliliğinin de hesaba katılması ile birlikte; bir sürüş çevrimi için ihtiyaç duyulan toplam güç ve enerji miktarı ortaya çıkarılmıştır. Bu güç değerlerinin hesaplanması ile birlikte tek bir çevrimde ne kadar enerji tüketildiği, batarya kapasitesine göre EA'nın bu çevrimden toplamda kaç defa gerçekleştirebileceği hesaplanmış ve her SORT çevrimine göre aracın alabileceği maksimum menzil hesaplanmıştır. SoC değerinin

hesaplanmasına yönelik oluşturulan formüller aşağıda belirtilmiştir. Ayrıca Simulink ortamında tasarlanan SoC Modeli Şekil 3.46’da verilmiştir.

$$N_{BR} = \frac{1}{I_b} * I_{bat} * V_{OCV} \quad (3.30)$$

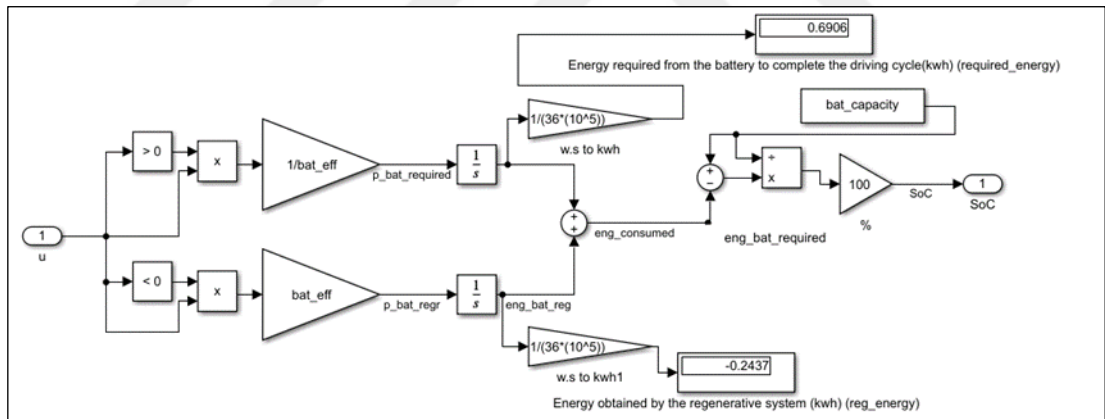
$$N_{BRG} = I_b * I_{bat} * V_{OCV} \quad (3.31)$$

$$E_{BR} = \int_0^t N_{BR} \quad (3.31)$$

$$E_{BRG} = \int_0^t N_{BRG} \quad (3.32)$$

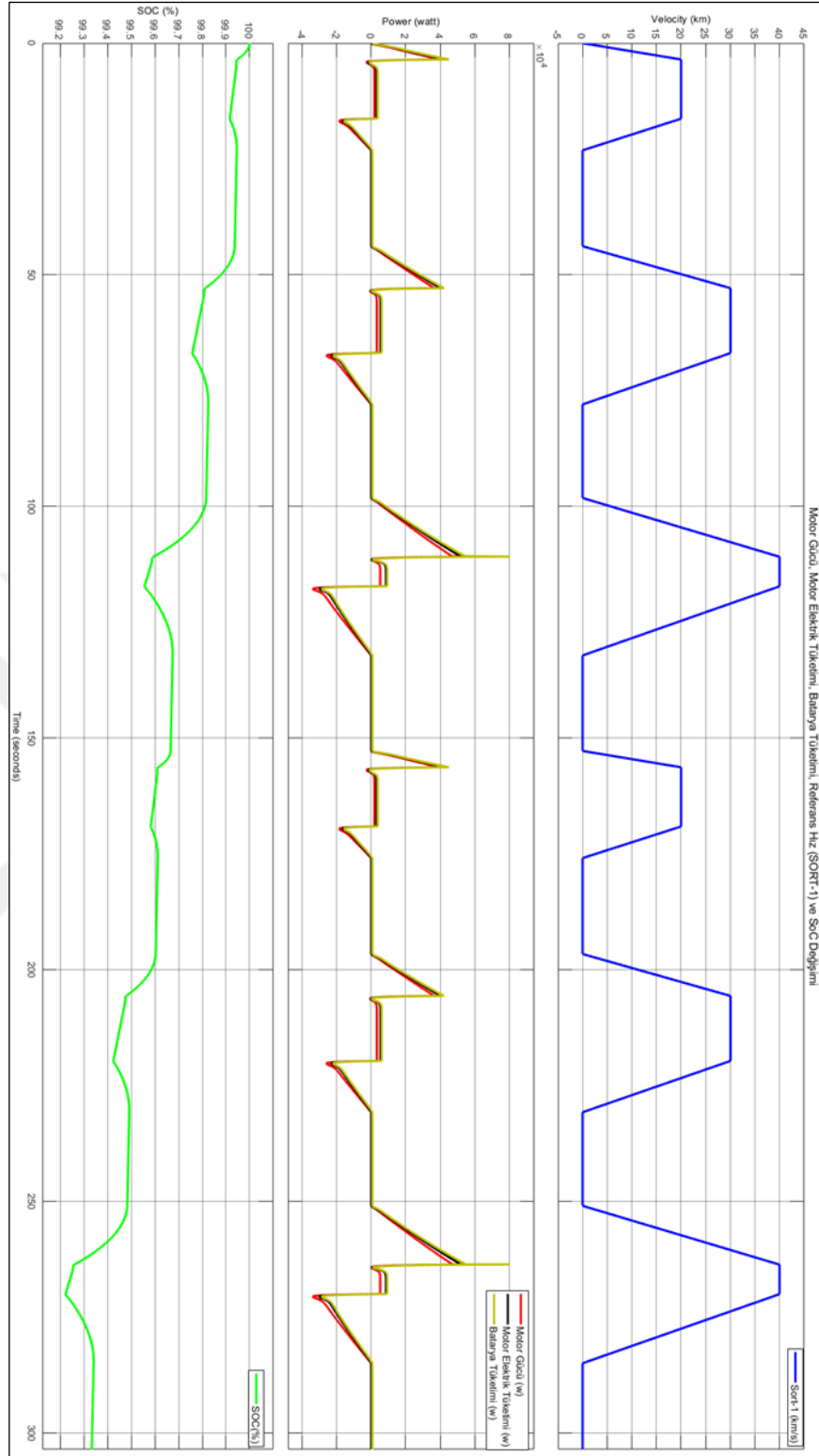
$$E_C = E_{BR} + E_{BRG} \quad (3.33)$$

$$SoC = \frac{C - E_C}{C} * 100 \quad (3.34)$$

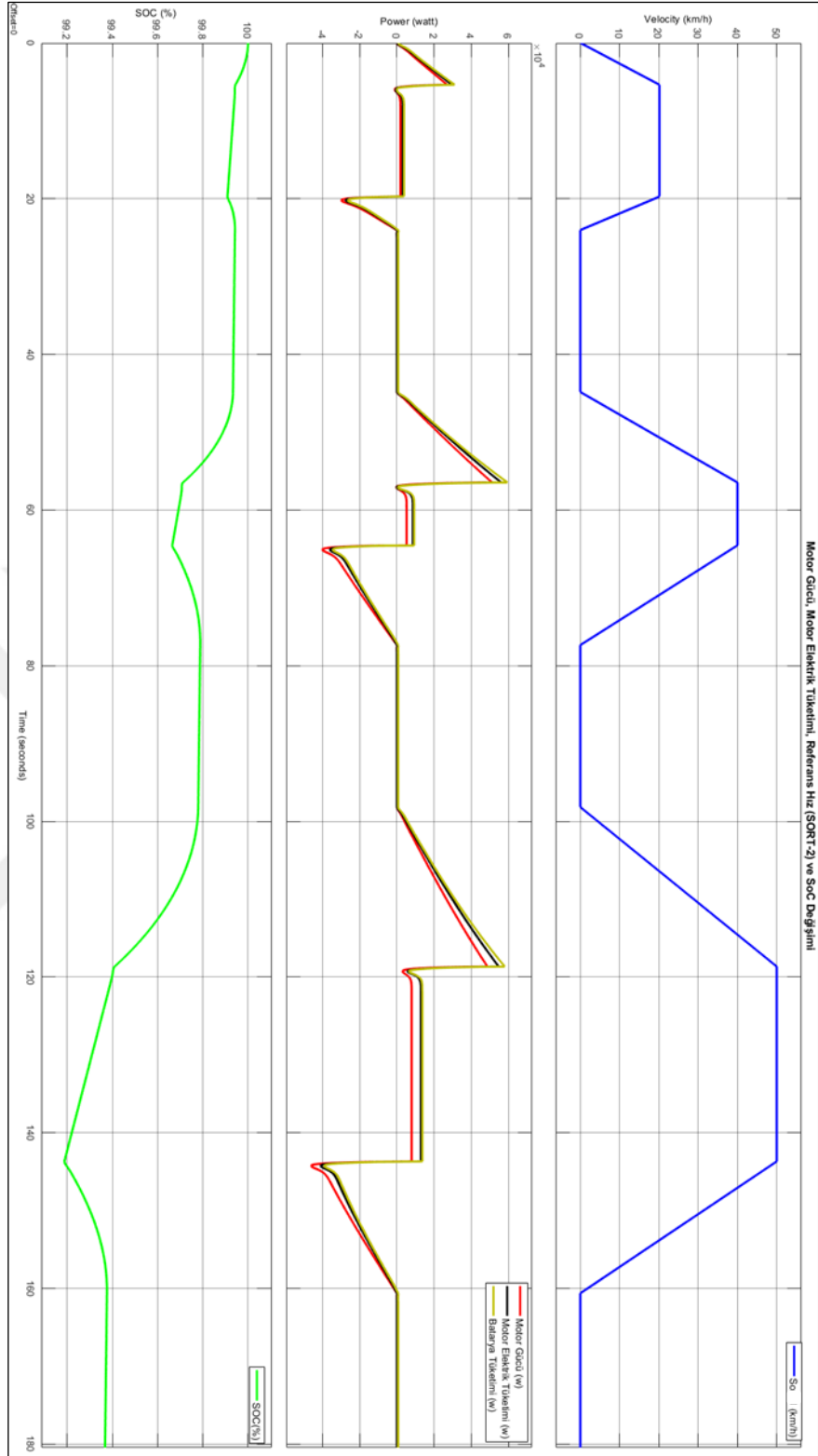


Şekil 3.46: Simulink ortamında tasarlanan SoC modeli.

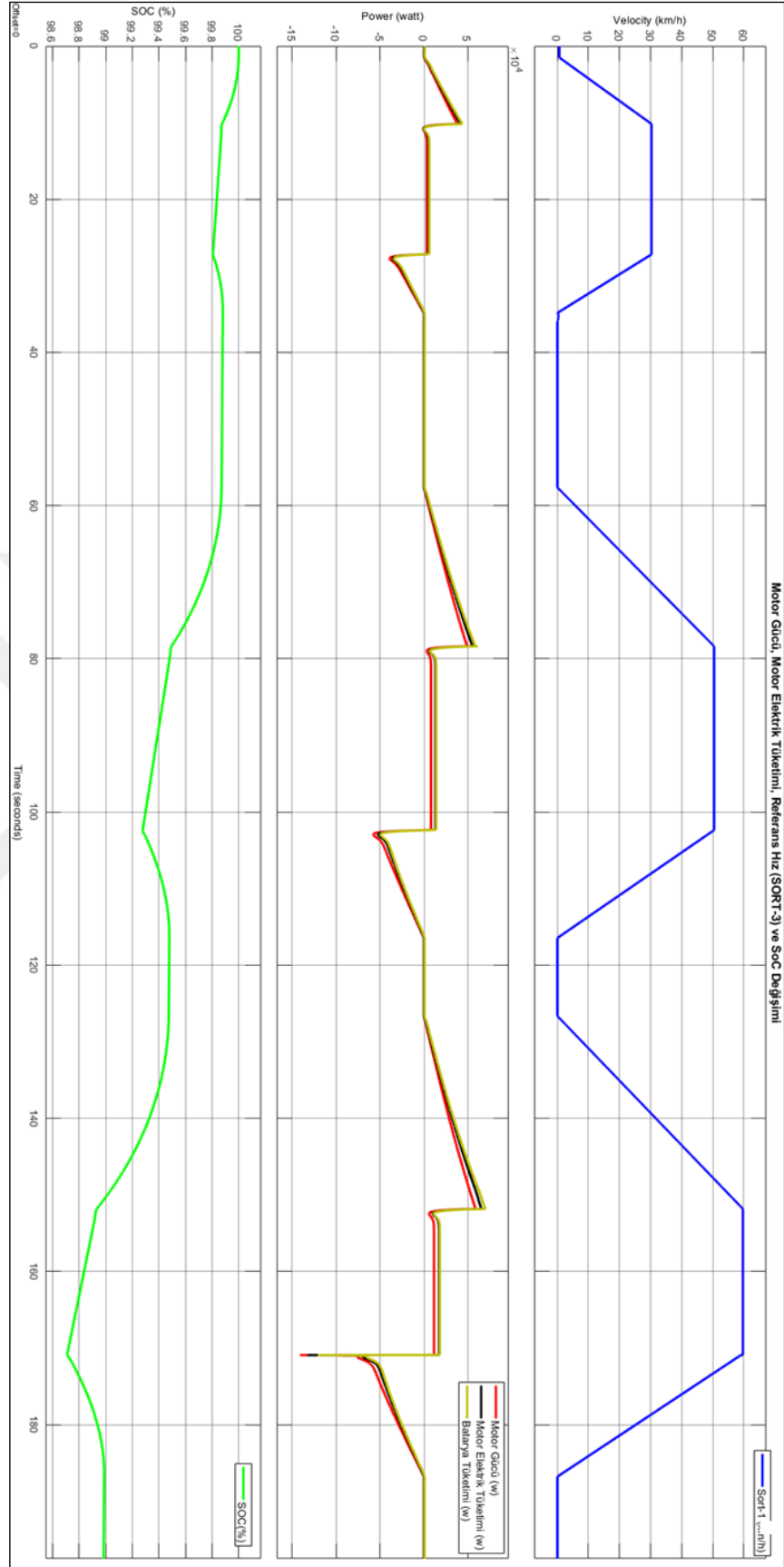
SoC modelinin tasarımının tamamlanmasının ardından simülasyon programı SORT-1, SORT-2 ve SORT-2 döngü yol koşulları sırası ile modellenen araca uygulanmış ve EA'nın her bir döngüde alabileceği maksimum menzil ve enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Her bir SORT döngüsünde simülasyondan elde edilen e-motor gücü, e-motorun elektrik tüketimi, bataryadan çekilen güç miktarı, referans hız ve bataryanın SoC değeri değişimleri aynı grafikler üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.47: SORT-1 döngüsünde motor gücü, motor elektrik tüketimi, batarya tüketimi, referans hız ve SoC değişimi.

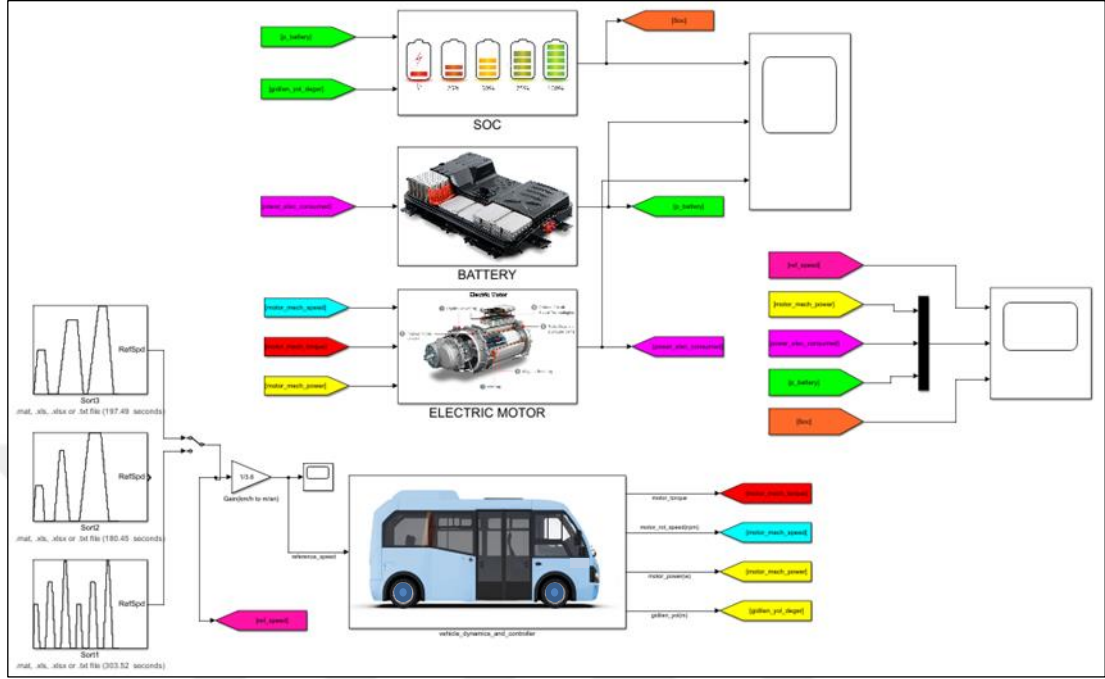


Şekil 3.48: SORT-2 döngüsünde motor gücü, motor elektrik tüketimi, batarya tüketimi, referans hız ve SoC değişimi.



Şekil 3.49: SORT-3 döngüsünde motor gücü, motor elektrik tüketimi, batarya tüketimi, referans hız ve SoC değişimi.

Ayrıca tasarlanan EA'nın simulink model görüntüsü Şekil 3.50'de gösterilmiştir.



Şekil 3.50: Elektrikli minibüsün simulink modeli.

3.5. Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi

MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan matematiksel modele sırası ile SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 yol koşulları uygulandıktan sonra her bir SORT döngüsünde sırası ile alınan mesafe, döngü zamanı, her bir döngüde harcanan enerji, 100 km'de tüketilen toplam enerji ve alınabilecek maksimum menzil hesaplanmış ve aşağıdaki Tablo 3.11'da gösterilmiştir.

Tablo 3.11: Simülasyon sonuçları.

	SORT-1	SORT-2	SORT-3
Alınan Yol (m)	1050	941	1448
Döngüde Geçirilen Zaman (s)	303.52	180.45	197.49
Enerji Tüketimi (kW.h/100km)	27.96	29.57	30.86
Alınabilecek Maksimum Menzil(km)	157.3	148.8	142.6

4. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE DOĞRULANMASI

Gerçek hayatta kullanılan bir elektrikli minibüsün fiziksel enerji tüketim testi sonuçları elde edildikten sonra elektrikli minibüsün MATLAB/Simulink ortamında matematiksel modeli geliştirilmiş ve her bir SORT döngüsünde ayrı ayrı simülasyon çalıştırılmıştır. Simülasyon sonuçları gerçek hayatta gerçekleştirilen fiziksel test sonuçları ile karşılaştırılmış ve simülasyonun doğruluk oranı hesaplanmıştır. Yapılan karşılaştırmaya göre simülasyon sonuçlarının gerçek hayatta gerçekleştirilen test sonuçlarına göre %90'ın üzerinde bir benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Fiziksel test sonuçları Tablo 4.1'de, simülasyon sonuçları Tablo 4.2'de karşılaştırma sonuçları ise Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Fiziksel enerji tüketim sonuçları.

FİZİKSEL TEST SONUÇLARI	SORT-1	SORT-2	SORT-3
Alınan Yol (m)	1048.04	922.74	1454
Döngüde Geçirilen Zaman (s)	296.65	168.49	186.71
Enerji Tüketimi (kW.h/100km)	29.79	28.6	31.68
Alınabilecek Maksimum Menzil(km)	148	153.72	138.85

Tablo 4.2: Simülasyon ortamında enerji tüketim sonuçları.

SİMÜLASYON SONUÇLARI	SORT-1	SORT-2	SORT-3
Alınan Yol (m)	1050	941	1448
Döngüde Geçirilen Zaman (s)	303.52	180.45	197.49
Enerji Tüketimi (kW.h/100km)	27.96	29.57	30.86
Alınabilecek Maksimum Menzil(km)	157.3	148.8	142.6

Tablo 4.3:Fiziksel test sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

DOĞRULUK ORANI	SORT-1	SORT-2	SORT-3
Alınan Yol (m)	%99.84	%98.09	%99.6
Döngüde Geçirilen Zaman (s)	%97.73	%93.37	%94.54
Enerji Tüketimi (kW.h/100km)	%93.85	%96.71	%97.41
Alınabilecek Maksimum Menzil(km)	%94.09	%96.79	%97.39

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Prototip olarak üretilen bir elektrikli aracın fiziksel enerji tüketim testi hem açık havada uygun şartlara göre bulunan bir yolda ya da kiralık bir pistte gerçekleştirilebildiği gibi iklimatik oda koşullarını sağlayan bir dinamometreli laboratuvar da yapılabilmektedir. Ancak dış ortamda uygun hava, yol ve basınç şartlarını yakalamak oldukça zordur. Çünkü trafiğe kapalı ya da trafiğin olmadığı aynı zamanda en uzun SORT döngüsü mesafesini karşılayabilecek kadar uzunluktaki eğimsiz düz bir yolu bulmak ve aynı zamanda tüm hava koşullarını da (rüzgar, sıcaklık, basınç) sağlamak gerekmektedir. Ayrıca dinamometre laboratuvarında bu testleri gerçekleştirmek için belirli bir bütçeye sahip olunması ve maliyetin üretici firma tarafından karşılanması gerekmektedir. Ayrıca yurt içinde üretilen prototip araçların belirli bir ağırlık koşuluna kadar kullanabileceği sınırlı sayıda çevresel koşullu dinamometre laboratuvarı olduğu gibi belirli bir ağırlık koşulunun üstünde kapasite yetersizliğinden dolayı herhangi bir laboratuvar imkanı bulunamamaktadır. Bu durumda ilgili ağırlık koşullarını sağlayabilecek yurt dışındaki laboratuvarlarda fiziksel enerji tüketim testi gerçekleştirilmektedir. Fakat bu durumda prototip aracın yurt dışı sevkiyatı ve harici maliyetleri de söz konusu olacağından dolayı aracın fiziksel enerji tüketim testinin dış ortamda yapılması üretici firmalar tarafından daha çok tercih edilebilmektedir. Ar-Ge çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen tekrarlı enerji tüketim testinin maliyeti oldukça yüksek olduğundan MATLAB\Simulink ortamında geliştirilen bu model sayesinde bir prototip araç üzerinde yapılacak tüm değişikliklerin enerji tüketiminde meydana getirdiği değişimler daha kısa sürede enerji tüketim testleri incelenebildiği gibi sonuçlar sonrasında araç üzerinde yapılacak her türlü parametre değişimi sonrası enerji tüketim sonuçları yeniden hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Simülasyon ortamında daha az maliyetle gerçekleştirilen bu ölçümler üretici ve tasarımcıya yönelik oldukça hızlı ve pratik olanaklar sunmaktadır. Ayrıca, parametreleri bilinen herhangi bir elektrikli aracın enerji tüketim değerleri de bu model ile herhangi bir yol koşulunda hesaplanabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kıyaklı A.O., Solmaz H., (2018) “Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink”, Science and Technology, 4 (2), 9-15.
- [2] Web 1, (2020), <https://temizenerji.org/2020/11/27/dizel-ve-benzinli-araclarin-satisinin-yasaklanmasi-turkiyeyi-nasil-etkileyecek-sektor-bu-degisime-hazir-mi/>, (Erişim Tarihi: 16/10/2022).
- [3] Web 2, (2017), <https://www.dunya.com/kose-yazisi/elektrikli-otomobil-kuresel-rekabet-ve-gelismeler/395575>, (Erişim Tarihi: 16/10/2022).
- [4] Web 3, (2002), https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrikli_otomobil, (Erişim Tarihi: 16/10/2022).
- [5] UITP PROJECT 'E-SORT'. Standardised On-Road Test Cy-cles, International Association of Public Transport, Belgium, July 2017.
- [6] UITP PROJECT 'SORT'. Standardised On-Road Test Cy-cles, International Association of Public Transport, 2014
- [7] Boyalı A., Güvenç L., (2011), “Hibrid Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kural Tabanlı Kontrolü,” İtü Dergisi, 9 (2), 83-94.
- [8] Wang J., Besselink I., Nijmeijer H., (2015) “Electric vehicle energy consumption modelling and prediction based on road information,” World Electric Vehicle Journal, 7 (3), WEVJ7-0447.
- [9] Kıyaklı A.O., Solmaz H., (2018), “Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink,” Science and Technology, 2 (4), 9-15.
- [10] Çetin M. S., Karakaya B., Gençoğlu M. T., (2021), “Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi”, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33 (2), 755-63.
- [11] Ilyès M., Fotouhi A., Ewin N., (2021), “Electric vehicle energy consumption modelling and estimation-A case study,” International Journal of Energy Research, 45 (1), 501-520.
- [12] Mohd T.A.T., Hassan M.K., Aziz WMK.A., (2015) “Mathematical Modeling and Simulation of an Electric Vehicle,” Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 8, 1312-1313.
- [13] Özece B., (2020), “Fuel Consumption Analysis of a Hybrid Road Vehicle in MATLAB Environment”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [14] Özek A., (2020), “Elektrikli Bir Aracın Genel Performans Simülasyonu ve Gerçeklenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [15] San A., (2011), “Bir Elektrik Tahrirli Otomobilin Modellenmesi ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [16] Güner C., (2013), “Dışarıdan Şarj Edilebilen Hibrit Elektrikli Araç İle Menzil Artırıcı Elektrikli Araç Konseptlerinin Karşılaştırılmalı Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [17] Gökçe C., (2005), “Modelling and Simulation of Series Parallel Hybrid Electrical Hybrid Electrical Vehicle”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [18] Uğur E., (2011), “Prototip Bir Elektrikli Araç Üzerinde Enerji Yönetim Sisteminin Uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [19] Web 4, (2002), https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car, (Erişim Tarihi: 16/10/2022).
- [20] Biliroğlu A.Ö., (2009), “Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [21] Guzzella L., Sciarretta A., (2005), “Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modelling and Optimization Springer”, 3rd Edition, Springer.
- [22] Web 5, (2020), https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html, (Erişim Tarihi: 16/10/2022).
- [23] Iclodean C., Varga B., Burnete N., Cimerdean D., Jurchiş B., (2017), "Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 252, Sweden, Gothenburg, 7 April.
- [24] Web 6, (2020),” <http://www.gulistanboylu.com/control-area-network-can-nedir/> (Erişim Tarihi: 16/10/2022).

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzkaan DELİGÖZ ilk ve orta öğrenimini Konya’da tamamlayıp, lisans eğitimini Manisa Celal Bayar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde tamamladı. 2012-2013 yılları arasında Mercedes-Benz Türk A.Ş. Kamyon Fabrikasında, 2013-2014 yılları arasında İnci GS Yuasa Akü San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge bölümünde, 2014-2018 yılları arasında İstanbul Tersanesi Komutanlığında, 2018-2019 yılları arasında Consept Test ve Teknoloji Merkezi’nde Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalıştı. 2019 yılından itibaren Heksagon Mühendislik ve Tasarım A.Ş.’de Test ve Doğrulama Ekip Lideri olarak görev yapmaktadır. 2023 yılında ise Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Deligöz O., Aliew F., Azak K., (2022), “Comparison of Simulated EVs Energy Consumption with Physical Road Test”, 22nd International Conference on Engineering Technologies Abstracts Book, pp.85, Konya, Türkiye, 17-19 Nov.

Ek B: MATLAB/Simulink Kodları

```
15.11.2022 09:10 electric_vehicle_edit.m 1 of 1
%% drive cycles
nedc.data=xlsread("nedc.xlsx");
nedc.time=1:1180;
%plot(nedc.time,nedc.data);
%% vehicle parameters
rw=0.3645; %m teker yarıçapı
m=4248; %kg kütle (SORT hesaplaması)
me=1.02*m; %kg
f=0.007; %yuvarlanma direnci
cd=0.37; % aerodinamik sürtünme katsayısı
A=6.4764; %m2 projeksiyon alanı
transmission=17.945; %transmisyon oranı
%% ambient parameters
ro_air=1.2; %ortam hava yoğunluğu
g=9.81; %% yerçekimi sabiti
%% eff_map
eff_map.data=xlsread('eff_map(jest_for_matlab).xlsx');
eff_map.torque=eff_map.data(2:25,1);
eff_map.speed=eff_map.data(1,2:25);
eff_map.ency=eff_map.data(2:25,2:25);
%% batt parameters
v_ocv=360; %v
```

```
bat_capacity=44*36*(10^5); %Ws  
bat_eff=0.97;  
r_int=0.1; %ohm  
p_aksesuar=650; %W  
%% run  
drive_time=1180;  
sim=('Temel_Dinamik_Model_7')
```

