İSTANBUL METROBÜS HATTI İÇİN 25 M VE ÇİFT KÖRÜKLÜ ELEKTRİKLİ METROBÜSÜN GÜÇ AKTARMA ORGANLARI SEÇİMİNİN YAPILMASI

Bayram Hasan YİĞİT

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL METROBÜS HATTI İÇİN 25 M VE ÇİFT KÖRÜKLÜ ELEKTRİKLİ METROBÜSÜN GÜÇ AKTARMA ORGANLARI SEÇİMİNİN YAPILMASI

Bayram Hasan YİĞİT
0000-0001-8221-128X

Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

İSTANBUL METROBÜS HATTI İÇİN 25 M VE ÇİFT KÖRÜKLÜ ELEKTRİKLİ METROBÜSÜN GÜÇ AKTARMA ORGANLARI SEÇİMİNİN YAPILMASI

Bayram Hasan YİĞİT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Metrobüs otobüslerin hareket kabiliyetine sahip olup, İstanbul gibi büyük şehirler için en uygun şehir içi yolcu taşıma araçları olan tramvay ve metronun yolcu taşıma kapasitesine yakındır. İstanbul Belediyesi tarafından 2007 yılında İstanbul Metrobüs Hattı için 50 adet, 26m ve çift körüklü Phileas marka araç satın alınmıştır. Bu araçların yüksek eğimli yollarda çekiş performansı problemleri olmuştur. Bu nedenle bir daha Phileas marka araçlar alınmamış ve başka markalara ait 18 m tek körüklü araçlar satın alınmıştır. Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firması dizel 25 m, 5 akslı ve çift körüklü LF25 metrobüs aracını geliştirerek 132 adet İstanbul metrobüs hattına vermiştir. Mart 2022'den bu yana çekiş sorunu olmadan çalışmaktadır ve yolcu taşıma kapasitesi açısından da oldukça iyi performans göstermektedirler. Bu çalışmada, LF25 dizel aracın İstanbul Metrobüs Hattına göre çekiş performansı hesaplamaları Güç Aktarma Organı Seçim (GAOS) programı ile yapılmıştır. Üretilen araçlar metrobüs hattında test edilmiş ve GAOS programı ile elde edilen test sonuçları sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra LF25 dizel aracın, GAOS programı kullanılarak İstanbul metrobüs hattına en uygun elektrikli araca nasıl dönüştürülebileceği gösterilmiştir. LF25 dizel araç için en uygun güç aktarma organları mimarisi, aracı 4. ve 5. akslardan tahrik etmek iken, araç elektrikli portal akslar kullanılarak elektrikli araca dönüştürüldüğünde, en uygun mimarinin 3. ve 4. akslardan tahrik etme olduğu görülmüştür. İstanbul Metrobüs Hattında çalışan 132 adet LF25 dizel araçlarda telemetre bulunmaktadır. Bu araçlardan telemetre sonuçları en uygun olan 5 aracın verileri alınmıştır. Gerekli analiz ve hesaplar yapılarak İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi oluşturulmuştur. LF25 dizel ve elektrikli araçların MATLAB Simulink ile modellenmesi yapılmıştır. LF25 dizel bütün araç telemetresinden aylık alınan yakıt sarfiyatı ortalaması ile elektrikli aracın modelinden alınan enerji tüketimi karşılaştırıldığında elektrikli aracın dizel araca göre %73,22 oranında avantajlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dizel Metrobüs, Elektrikli Metrobüs, Elektrikli Güç Aktarma Organları, Çift Körüklü Metrobüs, Şehir içi ulaşım
2024, xvii + 88 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

SELECTION POWERTRAIN OF 25 M AND BE-ARTICULATED ELECTRIC BUS RAPID TRANSIT FOR ISTANBUL BUS RAPID TRANSIT LINE

Bayram Hasan YİĞİT

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

Supervisor: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Bus Rapid Transit (BRT) has the mobility of buses and is close to the passenger carrying capacity of trams and metro which is the most suitable urban passenger transportation vehicle for metropolitan cities like as Istanbul. In 2007 year, Istanbul Municipality purchased 50 units, 26m and be-articulated Phileas brand vehicles for the Istanbul Metrobus Line. These vehicles had traction performance problems on highly slope roads. For this reason, Phileas brand vehicles were not purchased again and 18m single articulated vehicles of another brands were purchased. Ulasim Ic ve Dis Ticaret A.S. company developed diesel 25 m, 5 axles and be-articulated LF25 BRT vehicle and gave to 132 units Istanbul BRT Line. They have been operating without any traction problems since March 2022 and performed very well in terms of passenger carrying capacity. In this study, traction performance calculations of the LF25 diesel vehicle according to Istanbul BRT Line were done with Powertrain Selection Program (PTSP). The produced vehicles were tested on the BRT line and the obtained test results were compared with modeling results. Then, it was demonstrated how the LF25 diesel vehicle can be transformed into electric vehicle the most suitable for the Istanbul BRT Line by using the PTSP. While the most suitable architecture for the LF25 diesel vehicle is to drive the vehicle from the 4^{th} and 5^{th} axles, when the vehicle is converted into an electric vehicle using electric portal axles, it was found to be the most appropriate solution to drive it from the 3^{rd} and 4^{th} axles. There are telemeters in 132 LF25 diesel vehicles operating on the Istanbul Metrobus Line. Among these vehicles, the data of the 5 vehicles with the most suitable results were taken. The Istanbul Metrobus Line drive cycle was created by making the necessary analysis and calculations. LF25 diesel and electric vehicles were modeled with MATLAB Simulink. When the monthly fuel consumption average obtained from the LF25 diesel whole vehicle telemeter and the energy consumption taken from the electric vehicle model are compared, it is seen that the electric vehicle has an advantage of %73,22 over the diesel vehicle.

Key words: Diesel BRT, Electric BRT, Electric Powertrain, Be-Articulated BRT, Urban transportation
2024, xvii + 88 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak desteğini aldığım danışman hocam Prof. Dr. M. İhsan Karamangil'e teşekkür ederim.

Bu çalışmanın MATLAB Simulink modelleme kısmında Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firmasının Ar-Ge Mühendisleri Sn. Yunus Kızılarslan, Sn. Oğuzhan Arı ve Sn. Ali Topal ile birlikte çalışılmıştır. Desteklerinden dolayı kendilerine teşekkür ederim.

Bu çalışma esnasında Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firmasının Ar-Ge merkezi imkânlarından faydalanılmıştır. Bu imkânı sağladığı için Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firması yönetim ekibine teşekkür ederim.

İstanbul Metrobüs Hattı verileri İETT'den alınmıştır. Araç testi İETT'nin işlettiği İstanbul Metrobüs Hattı'nda da yapılmıştır. Desteklerinden dolayı İETT yönetim ekibine teşekkür ederim.

Doktora yaptığım süre boyunca sürekli beni destekleyen ve motive eden eşim Mukadder Yiğit'e, hayata yeni atılan ve geleceğini planladığımız oğlum Arda Yiğit'e ve birlikte ders çalıştığım oğlum Anıl Yiğit'e teşekkür ederim.

Bayram Hasan YİGİT
25/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
İÇİNDEKİLER xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvii
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Metrobüs Sisteminin Tanımı 3
2.2. Metrobüs Sisteminin Dünyadaki Tarihçesi 3
2.3. Metrobüs Sisteminin Türkiye'deki Tarihçesi 4
2.4. Dünyadaki Metrobüs Sistemleri ve Kullanılan Araçlar 5
2.4.1. Güney Amerika metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar 6
2.4.2. Asya metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar 8
2.4.3. Avrupa metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar 9
2.4.4. Kuzey Amerika metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar 12
2.4.5. Afrika metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar 13
2.4.6. Avusturalya metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar 13
2.5. İstanbul Metrobüs Hattında Kullanılan Araçlar 14
2.6. İstanbul Metrobüs Hattında Araçlar Üzerine Yapılan Çalışmalar 15
2.7. İstanbul Metrobüs Hattı Araçları Üzerine Yapılacak Çalışmalar 16
2.7.1. İstanbul Metrobüs Hattında Çalışabilecek Dizel Hibrit Araç Mimarisi 18
2.7.2. İstanbul Metrobüs Hattında Çalışabilecek Elektrikli Araç Mimarisi 21
2.7.3. İstanbul Metrobüs Hattında Çalışabilecek Yakıt Hücreli Araç Mimarisi 22
3. MATERYAL ve YÖNTEM 24
3.1. İstanbul Metrobüs Hattının İncelenmesi 24
3.2. Hattın Düz, Büyük Kısmını Temsil Edebilecek Uygun Eğimli ve Maksimum Eğimli Yol Kesitlerinin Tespit Edilmesi 27
3.2.1. Hattın düz yol kesitinin tespit edilmesi 28
3.2.2. Hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesitinin tespit edilmesi 28
3.2.3. Maksimum eğimli yol kesitinin tespit edilmesi 29
3.3. Metrobüs-01, LF25 Dizel Araç ile Test Yapılması 29
3.4. GAOS Programı Özelleştirilerek, Teorik Sonuçların Elde Edilmesi 30
3.5. İstanbul Metrobüs Hattına Uygun Olabilecek Elektrikli Araç Özellikleri ve Güç Aktarma Organlarının Belirlenmesi 34
3.6. Metrobüs-02 için GAOS Programından Teorik Sonuçların Elde Edilmesi 37
3.7. Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 Araçları İçin GAOS Programından Teorik Sonuçların Elde Edilmesi 37
3.8. Araçların MATLAB Simulink ile Modellenmesi 38
3.8.1 Metrobüs-02 Dizel Aracın MATLAB Simulink ile Modellenmesi 38
3.8.2 Metrobüs-03 Elektrikli Aracın MATLAB Simulink ile Modellenmesi 54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 68
4.1. Araçların Güçlerinin ve Performanslarının Karşılaştırılması 68

4.2. Araçların Performanslarının Düz Yolda Karşılaştırılması 73
4.3. Araçların Performanslarının Hattı Temsil Edebilecek Uygun Eğimli Yolda Karşılaştırılması 74
4.4. Araçların Performanslarının Maksimum Eğimli Yolda Karşılaştırılması 75
4.5. Araçlarının Toplam Performanslarının Karşılaştırılması 76
4.6. Metrobüs-03 elektrikli araç simülasyon modelinden sonuçların alınması 77
4.7. Metrobüs-03 elektrikli araç eşdeğer diferansiyel oranının enerji tüketimine etkisinin araştırılması 78
4.8. Araçların yakıt ve enerji tüketimlerinin karşılaştırılması 78
5. SONUÇ 81
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Araç ön kesit alanı (m^2)
a	Araç ivmesi (m/s^2)
B_k	Batarya kapasitesi (kWh)
C_d	Hava direnç katsayısı
D_h	Hava direnç kuvveti (N)
D_{gr}	Yokuş direnç kuvveti (N)
D_{rr}	Yuvarlanma direnç kuvveti (N)
E_{bge}	Batarya gerekli enerjisi (kWh)
E_{bne}	Batarya net enerjisi (kWh)
E_{bre}	Batarya rejeneratif enerjisi (kWh)
$ET_{/km}$	1 km'deki enerji tüketimi (kWh)
$ET_{/100km}$	100 km'deki enerji tüketimi (kWh/100km)
F_i	İdeal çekme kuvveti (N)
F_T	Çekme kuvveti (N)
F_4	4'üncü aks çekme kuvveti (N)
F_5	5'inci aks çekme kuvveti (N)
F_{tr}	Toplam direnç kuvveti (N)
G_D	Eşdeğer diferansiyel oranı
G_T	Şanzıman oranları
I_{bat}	Batarya akımı (A)
I_{et}	Elektrik motoru planet dişlileri kütle atalet momentleri
I_w	Jant ve lastik kütle atalet momentleri
m	Kütle (kg)
m_e	Eşdeğer kütle (kg)
n	Toplam durak sayısı
N	Motor devri (rpm)
P	Güç (kW)
P_{aks}	Araç aksesuar gücü (kW)
P_{atg}	Araç toplam gücü (kW)
P_{bat}	Batarya gücü (kW)
P_{bgg}	Batarya gerekli gücü (kW)
P_{brg}	Batarya rejeneratif gücü (kW)
P_{emgg}	Elektrik motoru gerekli gücü (kW)
P_{emmg}	Elektrik motoru mekanik gücü (kW)
P_{emng}	Elektrik motoru net gücü (kW)
P_{emrg}	Elektrik motoru rejeneratif gücü (kW)
R	Teker dinamik yarıçapı (m)
R_{bid}	Batarya iç direnci (Ω)
T	Tork (Nm)
T_4	4'üncü aks torku (Nm)
T_5	5'inci aks torku (Nm)

t	Zaman (s)
V_{adv}	Açık devre voltajı (V)
V_v	Araç hızı (km/h)
V	Araç hızı (m/s)
V_0	Araç ilk hızı (m/s)
W	Aracın toplam ağırlığı (N)
W_{a1}	1'inci aksa gelen yük (N)
W_{a2}	2'nci aksa gelen yük (N)
W_{a3}	3'üncü aksa gelen yük (N)
W_{a4}	4'üncü aksa gelen yük (N)
W_{a5}	5'inci aksa gelen yük (N)
W_{cb1}	1'inci kabin ağırlığı (N)
W_{cb2}	2'nci kabin ağırlığı (N)
W_{cb3}	3'üncü kabin ağırlığı (N)
W_{ar1}	1'inci körük ağırlığı (N)
W_{ar2}	2'nci körük ağırlığı (N)
x	Aracın aldığı yol (m)
x_0	Aracın aldığı ilk yol (m)
X	Aracın aldığı Toplam yol (km)
$YS_{A^nA^{n+1}}$	İki durak arası yakıt sarfiyatı (L/100 km veya L/h)
$YS_{g/km}$	1 km′deki yakıt sarfiyatı (g/ km)
$YS_{L/100km}$	100 km′deki yakıt sarfiyatı (L/100 km)
$YS_{top(L/h)}$	Toplam yakıt sarfiyatı (L/h)
$\sum F_{net}$	Net kuvvet (N)
μ	Teker yuvarlanma direnç katsayısı
η	Güç aktarma organı toplam mekanik verimi
ηe	Elektrik motoru mekanik verimi
ηb	Batarya verimi
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
θ	Yol eğim açısı (rad)

Kısaltmalar	**Açıklama**
AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
BŞD (SoC)	Batarya Şarj Durumu (State of Charge)
BTYS	Batarya, Batarya Termal Yönetim Sistemi
BRT	Metrobüs (Bus Rapid Transit)
CAN	Denetleyici Alanı Ağı (Controller Area Network)
DC/DC	Doğru Akım (Direct Current)
İETT	İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel
GAOS	Güç Aktarma Organları Seçimi
LF	Alçak Taban (Low Floor)
PTSP	Güç Aktarma Organları Seçim Programı (Powertrain Selection Program)
YGGDB	Yüksek Gerilim Güç Dağıtım Birimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Dünyada yaygın olarak kullanılan Metrobüs sistemleri……..	5
Şekil 2.2.	Brezilya'nın Sao Paulo kentinde kullanılan 26m Metrobüs aracı..	7
Şekil 2.3.	Kolombiya'nın Bogota kentinde kullanılan 26m Metrobüs aracı..	7
Şekil 2.4.	Avrupa'da yaygın olarak kullanılan Metrobüs sistemleri	10
Şekil 2.5.	Avrupa'da 2020 yılından 2030 yılına kadar tahmini yıllık otobüs satışları…….	11
Şekil 2.6.	Solaris firmasının 24m tam elektrikli çift körüklü Urbino modeli	11
Şekil 2.7.	HESS firmasının 25m tam elektrikli çift körüklü lighTram 25 TOSA modeli……	12
Şekil 2.8.	HESS firmasının 25m tam elektrikli çift körüklü lighTram 25 TOSA modeli……	14
Şekil 2.9.	Ulaşım firmasının 25m, çift körüklü ve 5 akslı Ultra LF25 modeli	15
Şekil 2.10.	İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek dizel hibrit araç mimarisi	19
Şekil 2.11.	ZF firmasının AxTrax AVE portal aksı	19
Şekil 2.12.	İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek elektrikli araç mimarisi	22
Şekil 2.13.	İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek yakıt hücreli araç mimarisi	23
Şekil 3.1.	İstanbul Metrobüs Hattı için güç aktarma organları seçim metodu	25
Şekil 3.2.	İstanbul Metrobüs Hattı……	26
Şekil 3.3.	İstanbul Metrobüs Hattının yola göre eğim grafiği……..	27
Şekil 3.4.	Seçilen yol kesitlerinin rakıma göre grafiği…….	29
Şekil 3.5.	Metrobüs-01, LF25 dizel aracın yüklü ve test cihazlarının bağlı hali……	30
Şekil 3.6.	Metrobüs-02 aracına etki eden kuvvetlerin gösterimi…….	32
Şekil 3.7.	Metrobüs araçların güç aktarma sistemleri……..	35
Şekil 3.8.	Metrobüs-03 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi…….	35
Şekil 3.9.	Metrobüs-04 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi…….	36
Şekil 3.10.	GAOS programının Metrobüs-02 aracı için özelleştirilmiş hali..	37
Şekil 3.11.	Metrobüs-02 dizel aracın MATLAB Simulink modeli……	39
Şekil 3.12.	Metrobüs-02 dizel aracın parametreleri	40
Şekil 3.13	İstanbul Metrobüs Hattı Beylikdüzü – Söğütlüçeşme yönü sürüş çevrimi ……	41
Şekil 3.14	İstanbul Metrobüs Hattı Söğütlüçeşme – Beylikdüzü yönü sürüş çevrimi ……	41
Şekil 3.15	İstanbul Metrobüs Hattı Beylikdüzü – Söğütlüçeşme – Beylikdüzü yönü sürüş çevrimi ……..	42
Şekil 3.16	Metrobüs-02 dizel LF25 aracın, araç dinamiği modeli ……..	43
Şekil 3.17	Metrobüs-02 dizel LF25 araç dinamiği modeli çıktıları ……	44
Şekil 3.18	Araç yakıt sarfiyatı incelemesi için hız zaman grafiği ……..	47
Şekil 3.19	LF25 motorunun güce göre fren özgül yakıt sarfiyatı haritası ..	48
Şekil 3.20	LF25 motorunun torka göre fren özgül yakıt sarfiyatı haritası ..	49
Şekil 3.21	Metrobüs-02 dizel LF25 aracın yakıt sarfiyatı modeli ……..	50

Şekil 3.22	Üç boyutlu fren özgül yakıt sarfiyatı haritası ……	52
Şekil 3.23	Metrobüs-02 dizel LF25 yakıt sarfiyatı modeli çıktıları ……..	53
Şekil 3.24	LF25 araç dizel motorun verim haritası üzerinde çevrim boyunca tork değerleri ……	54
Şekil 3.25	Metrobüs-03 elektrikli aracın MATLAB Simulink modeli …….	55
Şekil 3.26	Metrobüs-03 elektrikli aracın parametreleri ……	56
Şekil 3.27	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın, araç dinamiği modeli ……	57
Şekil 3.28	Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç dinamiği modeli çıktıları …..	59
Şekil 3.29	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor, batarya ve şarj durumu modeli …….	59
Şekil 3.30	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor modeli ……..	60
Şekil 3.31	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın batarya modeli ……	61
Şekil 3.32	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın şarj durumu (SoC) modeli ..	62
Şekil 3.33	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor, batarya ve şarj durumu (SoC) modeli çıktıları …….	63
Şekil 3.34	LF25 elektrikli aracın ZF AxTrax AVE portal aksının elektrik motorun verim haritası ……	64
Şekil 3.35	Metrobüs-03 elektrikli aracın maksimum hızı 75 km/h, eşdeğer diferansiyel oranı 25,71 iken İstanbul Metrobüs Hattında devre göre tork değerleri ……	65
Şekil 3.36	Metrobüs-03 elektrikli aracın maksimum hızı 85 km/h, eşdeğer diferansiyel oranı 22,66 iken İstanbul Metrobüs Hattında devre göre tork değerleri ……...	65
Şekil 3.37	Metrobüs-03 elektrikli aracın maksimum hızı 95 km/h, eşdeğer diferansiyel oranı 20,28 iken İstanbul Metrobüs Hattında devre göre tork değerleri ……	66
Şekil 4.1.	Metrobüs araçların güç karşılaştırma grafiği……	69
Şekil 4.2.	Metrobüs-02 aracının performans grafiği…….	69
Şekil 4.3.	Metrobüs-03 aracının performans grafiği ……	70
Şekil 4.4.	Metrobüs-04 aracının performans grafiği ……	70
Şekil 4.5.	Şirinevler-Yenibosna yolunda araçların yola göre hız ve zaman grafiği……	74
Şekil 4.6.	Merter-Cevizlibağ yolunda araçların yola göre hız ve zaman grafiği……	75
Şekil 4.7.	Haramidere-Güzelyurt yolunda araçların yola göre hız ve zaman grafiği……	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Kıtalara göre metrobüs verileri ……	6
Çizelge 2.2.	Güney Amerika ülkeleri metrobüs verileri ……..	6
Çizelge 2.3.	Asya ülkeleri metrobüs verileri ……...	8
Çizelge 2.4.	Çin'de 2020 yılında üretilen elektrikli otobüslerin firmalara göre dağılımı…….	9
Çizelge 2.5.	Avrupa ülkeleri metrobüs verileri ……	11
Çizelge 2.6.	Kuzey Amerika ülkeleri metrobüs verileri ……..	12
Çizelge 2.7.	Afrika ülkeleri metrobüs verileri …….	13
Çizelge 2.8.	Avusturalya ülkeleri metrobüs verileri ……	13
Çizelge 2.9.	Seri hibrit, elektrikli ve yakıt hücreli otobüsün ana bileşenleri ve özellikleri …….	17
Çizelge 3.1.	İstanbul Metrobüs Hattının eğime göre yol oranı ve uzunluğu....	26
Çizelge 3.2.	Araç özellikleri karşılaştırma tablosu……..	36
Çizelge 3.3.	Metrobüs-02 dizel LF25 aracın eşdeğer kütle tablosu ……	43
Çizelge 3.4.	Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın eşdeğer kütle tablosu …….	58
Çizelge 3.5.	Metrobüs-03 elektrikli araç maksimum hıza göre eşdeğer diferansiyel oranları …….	64
Çizelge 3.6.	TNO firması 12 m elektrikli araç SORT testleri sonuçları ile 12 m elektrikli araç simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ……	67
Çizelge 3.7.	Otokar firması elektrikli araç SORT testi rejeneratif fren sonuçları ile 12 m elektrikli araç rejeneratif fren simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ……...	67
Çizelge 4.1.	Metrobüs araçların tüm yollardaki performansının karşılaştırılması…….	77
Çizelge 4.2.	Metrobüs-03 elektrikli araç simülasyon modeli sonuçları ……...	77
Çizelge 4.3.	İstanbul Metrobüs Hattı çevriminde Metrobüs-03 elektrikli araç eşdeğer diferansiyel oranının enerji tüketimine etkisi …….	78
Çizelge 4.4.	Metrobüs-01 dizel aracın aylara göre yakıt sarfiyatı ……...	79
Çizelge 4.5.	Metrobüs-01 dizel aracın günlük, aylık ve yıllık yakıt sarfiyatı..	79
Çizelge 4.6.	Metrobüs-03 elektrikli aracın günlük, aylık ve yıllık enerji tüketimi ……	79
Çizelge 4.7.	Metrobüs-01 dizel ve Metrobüs-03 elektrikli araçların yakıt ve enerji tüketimleri fiyat karşılaştırması ……	80
Çizelge 4.8.	Metrobüs-01 dizel ve Metrobüs-03 elektrikli araçların enerji tüketimleri karşılaştırması…….……..	80

1. GİRİŞ

Büyük şehirlerin, şehir içi ulaşımlarında yüksek kapasiteli taşıma araçları, yatırım kapasitelerine göre küçükten büyüğe doğru otobüs, troleybüs, metrobüs, tramvay ve metro olarak sıralanırlar. Nüfusu çok kalabalık olan büyük şehirlerin şehir içi ulaşımları için otobüs ve troleybüs yeterli sayıda yolcu taşımadıkları için uygun değildir. Tramvay ve metro yüksek miktarda yolcu taşıması açısından uygun, ancak yüksek alt yapı maliyetleri gerektirmektedir. Ayrıca, tramvay ve metro belirlenen hattın dışında hareket etme kabiliyeti yoktur. Metrobüs ise otobüslerin hareket kabiliyetine sahip, tramvay ve metronun yolcu taşıma kapasitesine yakındır. Bu neden ile Metrobüs gelişmekte olan ülkelerin kalabalık şehirleri için en uygun şehir içi yolcu taşıma aracıdır.

İstanbul Belediyesi tarafından 2007 yılında İstanbul Metrobüs Hattı için 50 adet, 26m ve çift körüklü Phileas marka araç satın alınmıştır. Bu araçların yüksek eğimli yollarda çekiş performans problemleri olmuştur. Bu nedenle bir daha Phileas marka araçlar alınmamış ve başka markalara ait 18m tek körüklü araçlar satın alınmıştır. İstanbul Belediyesi 2007 yılından bu yana, sürekli olarak daha fazla yolcu taşıma kapasitesine ve yüksek eğimli yollarda çekiş performansına sahip çift körüklü araçlara talepte bulunmuştur. Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. (Ulaşım) firması dizel 25 m, 5 akslı ve çift körüklü 270 kişi yolcu taşıma kapasitesine sahip LF25 metrobüs aracını geliştirerek 2022 yılının Mart ayından itibaren 132 adet İstanbul metrobüs hattına vermiştir. O tarihten bu yana LF25 Metrobüs araçların çekiş sorunu olmadan çalışmaktadır ve yolcu taşıma kapasitesi açısından da oldukça iyi performans göstermektedirler.

Diğer taraftan, günümüzde fosil yakıtlı araçların çevreye verdiği zarardan dolayı şehir içi ulaşım sektöründe üretim yapan firmalar tarafından elektrikli araçlara doğru bir geçiş çalışması yapılmaktadır. Avrupa birliği ülkelerinde 2030 yılına gelindiğinde şehir içi ulaşımda kullanılan otobüs filolarının % 95'inin elektrikle, hidrojen veya doğal gaz ile çalışan sıfır emisyonlu otobüslerin olacağı öngörülmektedir. Türkiye otomotiv sektöründe Avrupa regülasyonlarını takip ettiği için, Türkiye'deki otobüs üreticileri de bu yönde adımlar atmaktadır.

Ulaşım firması da LF25 dizel aracını elektrikli araca dönüştürme çalışmaları yapmaktadır. Şehirlerde kullanılan şehir içi otobüslerin sıfır emisyonlu olması, şehirlerin hava kirliğini azaltma yönünde ciddi katkısı olacaktır. İstanbul Metrobüs Hattında kullanılan araçlarında sıfır emisyonlu olmasının İstanbul'un hava kirliliğinin azalması yönünde ciddi katkısı olacaktır.

Bu çalışmanın amaçlarından biri İstanbul Metrobüs hattında çalışan LF25 dizel aracın performansına eşit veya daha üstün elektrikli metrobüs güç aktarma organları seçimini yaparak, gelecekte bu hatta çalışacak elektrikli araçlarda yaşanabilecek performans probleminin önüne geçmektir.

Bu çalışmanın diğer bir amacı da güç aktarma organları seçimi yaptıktan LF25 dizel aracın MATLAB Simulink ile modellenmesini İstanbul Metrobüs Hattına göre yaparak, bu hatta kullanılan 132 aracın yakıt sarfiyatları ile karşılaştırmaktır. Ayrıca LF25 elektrikli aracın MATLAB Simulink ile modellenmesini de yaparak, bu hatta kullanılan 132 adet aracın yakıt sarfiyatları ile elektrikli aracın enerji tüketimini karşılaştırmaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde şehir içi ulaşım otomobil, minibüs, midibüs, otobüs, metrobüs, tramvay ve metro ile yapılmaktadır. Büyük şehirlerde otomobil, minibüs, midibüs ve hatta otobüsün kullanılması trafik yoğunluğunu arttırmaktadır. Tramvay ve metro yüksek miktarda yolcu taşıması açısından uygun, ancak yüksek alt yapı maliyetleri gerektirmektedir. Ayrıca devreye alma süreleri uzun yıllar almaktadır. Metrobüs ise otobüslerin hareket kabiliyetine sahip, özel bir şeritte ilerleyerek hızlı ve etkili bir şekilde yolcu taşımasını sağlayarak kısa zamanda devreye alınabilirler.

2.1. Metrobüs Sisteminin Tanımı

Dünyada Bus Rapid Transit (BRT) olarak bilinen ve Türkiye'de Metrobüs olarak adlandırılan, esnek kullanımlı, lastik tekerlekli, hızlı ve konforu otobüslere göre daha yüksek olan bir transit yolcu taşıma sistemidir. Bu sistem araçları, istasyonları, hizmetleri, tercihli ve sınırlı yolları ve akıllı trafik sistemleri uygulamalarını içermektedir. (Levinson vd., 2003)

Bu çalışma İstanbul Metrobüs Hattında kullanılan LF25 dizel araç ve gelecekte dönüştürülecek LF25 elektrikli araçlar üzerine yapılmıştır. Metrobüs dendiğinde, Metrobüs sistemi değil, Metrobüs sisteminde çalışan araç anlaşılmalıdır.

2.2. Metrobüs Sisteminin Dünyadaki Tarihçesi

Metrobüs sisteminin dünyadaki tarihçesi aşağıda maddeler halinde kronolojik olarak verilmektedir. (Arias vd., 2007)

- 1937 yılında Chicago'daki üç adet raylı sistem hattının ekspres otobüs hattına dönüştürülmesi ile ilk Metrobüs uygulamasına geçildiği kabul edilmektedir.
- 1966 yılında tramvay sistemlerinin otobüs sistemi kullanımına dönüştürülmesi sonucu Amerika ve Belçika'da ilk kez yolun ortasında yer alan ve ayrılmış otobüs yolları ortaya çıkmıştır.

- 1972 yılında özel otobüs yolu “Via Expresa” adı ile Peru’da geliştirilmiştir. Via Expresa 7,5 km uzunluğunda olup, günümüzde hala etkin bir şekilde hizmet vermektedir.
- 1974 yılında Brezilya’nın Curitiba kentinin ilk 20 km’lik kısmı hizmete açılması ile Metrobüs sisteminin farkına varılmış ve etkisi fazla olmuştur.
- 2000 yılında Kolombiya’nın Bogota şehrinde açılan Trans Milenio BRT sistemi, dünya çapında BRT anlayışını tamamen değiştirmiştir. Metrobüs sistemlerinin, büyük kentlerin de yüksek kapasiteli taşıma yapabileceğinin kanıtı olmuştur.
- 2002 yılında Güney Kore’nin Seul ve Hollanda’nın Amsterdam kentlerinde Metrobüs sistemi hayata geçmiştir.
- 2003 yılında Brezilya’nın Sao Polo kentinde Metrobüs sistemi devreye alınmıştır.
- 2004 yılında Endonezya'nın Jakarta kentlerinde Metrobüs sistemi hayata geçmiştir.
- 2005 yılında Meksika'nın Mexico City kentinde Metrobüs sistemi devreye alınmıştır.
- 2006 yılında Çin’in Hangzhzou, Ekvator’un Quito ve Fransa’nın Nantes kentlerinde Metrobüs sistemi hayata geçmiştir.
- 2007 yılında Türkiye’de İstanbul’da Metrobüs sisteminin ilk etabı devreye alınmıştır.

Metrobüsün tarihsel süreci içerisinde, dünya üzerinde birçok farklı ülkede metrobüs sistemleri hayata geçirilmeye devam etmektedir.

2.3. Metrobüs Sisteminin Türkiye’deki Tarihçesi

Metrobüs sistemi Türkiye’de sadece İstanbul’da vardır ve tarihçesi aşağıda maddeler halinde kronolojik olarak verilmektedir. (Vikipedi, 2024)

- Yapımına 2007 yılı başında başlanan 18,3 kilometrelik birinci etap Topkapı-Avcılar Metrobüs hattı 17 Eylül 2007’de açılmıştır.
- Metrobüsün ikinci etabı olan Zincirlikuyu ayağı, 8 Eylül 2008 tarihinde hizmete alınmıştır.
- Metrobüs hattının üçüncü etabı olan Söğütlüçeşme, 3 Mart 2009 tarihinde hizmete alınarak İstanbul’un iki yakası en kısa yoldan birbirine bağlanmıştır.
- Hattın Avcılar-Beylikdüzü güzergâhının açılışı 19 Temmuz 2012 tarihinde yapılmıştır.

- Toplam uzunluğu 52 kilometreyi bulan 44 istasyonlu Beylikdüzü-Söğütlüçeşme metrobüs hattında yolculuk süresi yaklaşık 90 dakika ve günlük ortalama 950 bin yolcu taşınmaktadır.

2.4. Dünyadaki Metrobüs Sistemleri ve Kullanılan Araçlar

Dünyada kıtalara göre metrobüs sistemleri Şekil 2.1'de kırmızı dairelerin büyüklüğü günlük yolcu taşıma kapasitesine göre orantılı olarak gösterilmektedir. Çizelge 2.1'de ise kıtalara göre günlük yolcu sayısı, şehir sayısı ve yol uzunluğu gösterilmektedir (Global BRT Data, 2024c).



Şekil 2.1. Dünyada yaygın olarak kullanılan Metrobüs sistemleri

Gülük yolcu sayısına göre; büyükten küçüğe doğru, Güney Amerika, Asya, Avrupa, Kuzey Amerika, Afrika ve Avusturalya olarak sıralanmaktadır. Kıtalara göre metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar aşağıda maddeler halinde tanıtılmaktadır.

Çizelge 2.1. Kıtalara göre metrobüs verileri

Kıtalar	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
Güney Amerika	18 505 436	62	2 012
Asya	7 987 756	45	1 768
Avrupa	3 169 846	46	946
Kuzey Amerika	1 005 796	23	815
Afrika	491 578	5	131
Avusturalya	436 200	4	96
Toplam	**31 596 612**	**185**	**5 768**

2.4.1. Güney Amerika metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar

Güney Amerika ülkelerinde metrobüs araçları ile Çizelge 2.2.'de görüleceği üzere günde 18 000 000'un üzerinde yolcu taşınmaktadır. Günlük yolcu taşıma verilerine göre ülkeler büyükten küçüğe doğru Brezilya, Kolombiya, Meksika, Arjantin, Ekvator, Peru, Venezuela, Guatemala ve Nikaragua olarak sıralanmaktadır. Toplam yol uzunluğu 2 000 km'nin üzerindedir.

Çizelge 2.2. Güney Amerika ülkeleri metrobüs verileri

Ülkeler	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
Brezilya	8 824 386	27	922
Kolombiya	2 719 532	7	226
Meksika	2 659 137	12	416
Arjantin	1 563 000	5	122
Ekvator	1 055 000	2	117
Peru	704 803	1	26
Şili	476 800	2	105
Venezuela	240 778	3	42
Guatemala	210 000	1	24
El Salvador	27 000	1	6
Uruguay	25 000	1	6
Toplam	**18 505 436**	**62**	**2 012**

Şekil 2.2'de Brezilya'nın Sao Paulo kentinde kullanılan 26m Metrobüs aracı gösterilmektedir (Global BRT Data, 2024d).



Şekil 2.2. Brezilya'nın Sao Paulo kentinde kullanılan 26m Metrobüs aracı

Şekil 2.3'te Kolombiya'nın Bogota kentinde kullanılan 26m Metrobüs aracı gösterilmektedir (Sustainable Bus, 2024a). Her iki aracın fotoğrafında da görüleceği üzere; bu araçların tarihi gelişimlerine uygun olarak kapı girişleri yüksektir. Dolayısı ile araçların yanaştığı duraklarda yüksek yapılmıştır. Güney Amerika ülkelerinde mevcut Euro II ve Euro III standardında olan araçlar, ülke standartlarına göre Euro V, Euro VI veya CNG araçlara doğru bir geçiş yapmaktadırlar. Henüz hibrit, elektrikli veya yakıt hücreli araçlara geçiş yoktur.



Şekil 2.3. Kolombiya'nın Bogota kentinde kullanılan 26m Metrobüs aracı

2.4.2. Asya metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar

Asya ülkelerinde Çizelge 2.3'de görüleceği üzere; metrobüs sistemleri günde yaklaşık 8 000 000 yolcu taşınmaktadır. Çin'de 4 350 000'un üzerinde, Tayvan'da 1 000 000 milyonun üzerinde, İran'da yaklaşık 850 000, Hindistan'da yaklaşık 500 000, Güney Kore'de 400 000 ve Pakistan'da 300 000 üzerinde günde yolcu taşınmaktadır. Çin 20 şehrinde 672 km yol uzunluğu ile Asya ülkeleri arasında açık ara önde gitmektedir (Global BRT Data, 2024c). Çin'de Euro V, Euro VI, elektrikli ve alçak tabanlı araçlar kullanılmaktadır. Yakın gelecekte, özellikle hava kirliliğinin olduğu şehirlerde komple elektrikli araçlara geçileceği öngörülmektedir. Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi 2020 yılında Çin'de 61 binin üzerinde elektrikli otobüs üretilmiş ve daha sonraki yıllarda da elektrikli otobüs üretimi arttırarak sürdürmesi beklenmektedir (Sustainable Bus, 2024b).

Çizelge 2.3. Asya ülkeleri metrobüs verileri

Ülkeler	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
Çin	4 375 250	20	672
Tayvan	1 354 832	3	107
İran	848 696	3	214
Hindistan	497 411	9	228
Güney Kore	400 000	1	115
Pakistan	305 000	2	50
İsrail	92 000	1	40
Endonezya	46 467	1	251
Ürdün	36 000	1	32
Tayland	15 000	1	15
Japonya	9 100	2	29
Vietnam	8 000	1	15
Toplam	**7 987 756**	**45**	**1 768**

Çizelge 2.4. Çin'de 2020 yılında üretilen elektrikli otobüslerin firmalara göre dağılımı

Sıra	Marka	Satış Miktarı (adet)	Büyüme Oranı (%)	Pazar Payı (%)
1	Yutong	15 940	-26,59	26,11
2	BYD	9 125	44,45	14,95
3	CRRC Electric	5 503	-25,70	9,01
4	Zhongtong	4 965	-38,91	8,13
5	Higer	3 636	10,38	5,96
6	Ankai	2 799	18,65	4,59
7	King Long	2 753	-16,85	4,51
8	Foton	2 663	-27,36	4,36
9	Skywell	2 126	-30,64	3,48
10	Sunwin	2 116	87,42	3,47
	Toplam Satış	**61 044**	**-20,10**	**100,00**

2.4.3. Avrupa metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar

Avrupa'da yaygın olarak kullanılan metrobüs sistemleri Şekil 2.4 ve Çizelge 2.5'de gösterilmektedir. (Global BRT Data, 2024b). Şekil 2.4'de kırmızı dairelerin büyüklüğü günlük yolcu taşıma kapasitesine göre orantılı olarak gösterilmektedir. Günlük yolcu taşıma kapasitesine göre; büyükten küçüğe doğru ülkeler Fransa 23 şehrinde yaklaşık 1 750 000 yolcu, Türkiye İstanbul'da 950 000 yolcu, Hollanda 5 şehrinde 110 500 yolcu, İngiltere 7 şehrinde 101 500 yolcu, İsveç 3 şehrinde 100 000 yolcu ve diğer ülkeler şeklinde sıralanmaktadır.

Avrupa'da otobüslerde kullanılan dizel motorlarda Euro I standardına 1992 yılında, Euro II standardına 1996 yılında, Euro III standardına 2000 yılında, Euro IV standardına 2005 yılında, Euro V standardına 2008 yılında ve Euro VI standardına 2013 yılında geçilmiştir. Dizel motor geliştirme adımları Euro VI ile birlikte, OBD-A, B, C, D ve E şeklinde olmuştur. Günümüzde Euro VI, OBD-E aşaması kullanılmaktadır. Dizel motor geliştirme adımları Euro VI ile birlikte üretici firmalara ekonomik olarak çok pahalıya mal olmuş, bazı üreticiler stratejik olarak bazı dizel motorların geliştirmesini durdurmak zorunda kalmıştır.



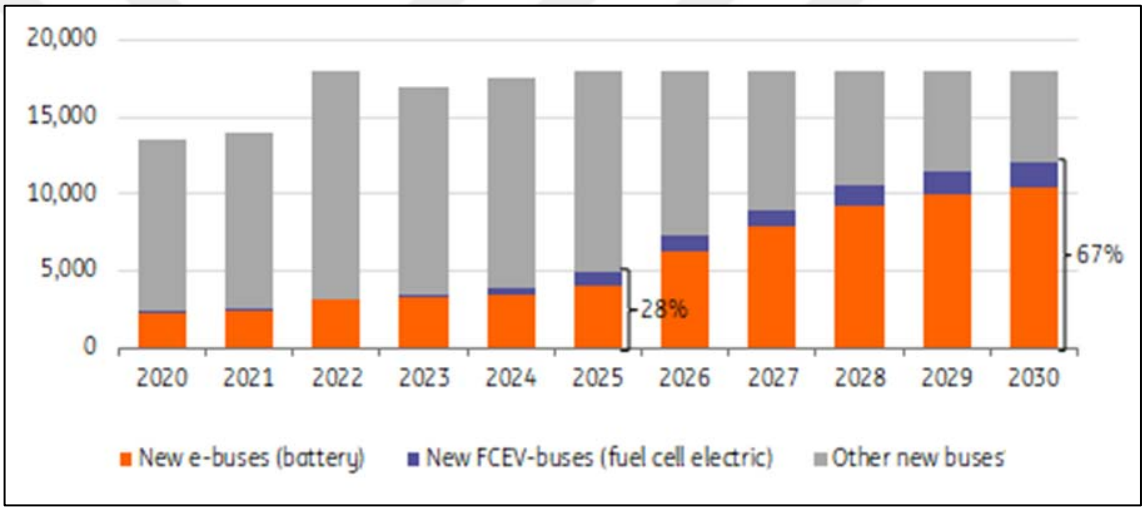
Şekil 2.4. Avrupa'da yaygın olarak kullanılan metrobüs sistemleri

Avrupa'da otobüs ve metrobüs üreticileri 2010 ile 2020 yılları arasında elektrikli araçta kullanılan batarya, batarya ısıl yönetimi, ısıtma, soğutma ve elektrikli hava kompresörü gibi parçaların teknolojisinin yeteri kadar gelişmemesinden ve şarj sistemi alt yapısının yeterli olmamasından dolayı dizel-elektrikli hibrit araca yönelmişlerdir. Avrupa'nın bazı büyük şehirlerine dizel motorlu otobüslerin girişinin yasaklanması sonucu dizel-elektrikli hibrit araçtan da tam elektrikli ve yakıt hücreli otobüs ve metrobüs araçlara doğru bir yönelme olmuştur. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi; Avrupa'da 2020 yılından 2030 yılına kadar elektrikli otobüslerin satışı sürekli artarak, yakıt hücreli otobüsler ile birlikte % 67'ye ulaşması tahmin edilmektedir (Luman, 2021).

Bu gelişme paralelinde Solaris firmasının 24m tam elektrikli, çift körüklü Urbino modeli Şekil 2.6'da verilmektedir. Bu araç iki akstan, toplam gücü 240 kW olan 2 adet elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Batarya kapasitesi 700 kWh'dir ve soket tipi şarj sistemi ile şarj edilmektedir. Bu araçtan Danimarka'nın Aalborg kentine 2021 yılının Ekim ayında 14 adet verilmiştir (Sustainable Bus, 2021).

Çizelge 2.5. Avrupa ülkeleri metrobüs verileri

Ülkeler	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
France	1 757 519	23	392
Türkiye	950 000	1	52
Hollanda	110 568	5	161
İngiltere	101 559	7	135
İsveç	100 000	3	96
Almanya	42 000	2	31
İrlanda	33 333	1	25
İspanya	30 867	2	15
Finlandiya	30 000	1	28
İsviçre	14 000	1	11
Toplam	**3 169 846**	**46**	**946**



Şekil 2.5. Avrupa'da 2020 yılından 2030 yılına kadar tahmini yıllık otobüs satışları



Şekil 2.6. Solaris firmasının 24m tam elektrikli çift körüklü Urbino modeli

Yine bu gelişme paralelinde HESS firmasının 25m tam elektrikli ve çift körüklü lighTram 25 TOSA modeli Şekil 2.7'de verilmektedir. Bu araçta iki akstan 2 ayrı elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Bu araçtan Fransa'nın Nantes kentine 2020 yılında 22 adet verilmiştir (Pajares, 2020).

Avrupa'daki otobüs ve metrobüs üretici firmaları araç geliştirme konusunda dünyaya öncülük etmektedir. Türkiye'de Avrupalı üretici firmaları yakından takip ederek araç geliştirme konusunda kendilerini geliştirmektedirler.



Şekil 2.7. HESS firmasının 25m tam elektrikli çift körüklü lighTram 25 TOSA modeli

2.4.4. Kuzey Amerika metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar

Çizelge 2.6'da görüldüğü gibi Kanada'nın 7 şehrinde ve Amerika Birleşik Devletleri'nin 16 şehrinde günde 500 000'den fazla yolcu taşınmaktadır. Kuzey Amerika ülkelerinde regülasyonlar Avrupa Birliğine paralel gitmektedir ve alçak tabanlı araçlar kullanılmaktadır.

Çizelge 2.6. Kuzey Amerika ülkeleri metrobüs verileri

Ülkeler	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
Kanada	503 407	7	306
Amerika Birleşik Devletleri	502 389	16	509
Toplam	**1 005 796**	**23**	**815**

2.4.5. Afrika metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar

Çizelge 2.7'de görüldüğü gibi Nijerya'nın 1 şehrinde 200 000 yolcu, Tanzanya'nın 1 şehrinde 180 000 yolcu ve Güney Afrika'nın 3 şehrinde 110 000'den fazla yolcu taşınmaktadır. Afrika ülkelerinde regülasyonlar Avrupa Birliğinin çok gerisindedir ve alçak tabanlı araçlar kullanılmaktadır.

Çizelge 2.7. Afrika ülkeleri metrobüs verileri

Ülkeler	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
Nijerya	200 000	1	22
Tanzanya	180 000	1	21
Güney Afrika	111 578	3	88
Toplam	**491 578**	**5**	**131**

2.4.6. Avusturalya metrobüs sistemleri ve kullanılan araçlar

Çizelge 2.8'de gösterildiği gibi Avustralya'nın 3 şehrinde günde 410 000'den ve Yeni Zelanda'nın 1 şehrinde 22 000'den fazla yolcu taşınmaktadır (Global BRT Data, 2024a). Avustralya'da metrobüs sisteminde kullanılan araçlar Avrupa'dan ithal edildiği için regülasyonlar Avrupa Birliğine paralel gitmektedir ve alçak tabanlı araçlar kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de verilen HESS firmasının 25m tam elektrikli çift körüklü lighTram 25 TOSA modelinden Avusturya'nın Brisbane BRT sistemine 2022 yılının Nisan ayı itibarı ile ilk araç verilmeye başlanarak toplam 60 araç teslim edilmiştir (Urban Transport Magazine, 2022).

Çizelge 2.8. Avusturalya ülkeleri metrobüs verileri

Ülkeler	Günlük Yolcu Sayısı	Şehir Sayısı	Yol Uzunluğu (km)
Avustralya	413 300	3	90
Yeni Zelanda	22 900	1	6
Toplam	**436 200**	**4**	**96**



Şekil 2.8. HESS firmasının 25m tam elektrikli çift körüklü lighTram 25 TOSA modeli

2.5. İstanbul Metrobüs Hattında Kullanılan Araçlar

Türkiye'de metrobüs hattı sadece İstanbul'da vardır. İstanbul Belediyesi tarafından 2007 yılında İstanbul Metrobüs Hattı için 50 adet, 26m ve çift körüklü Phileas marka araç satın alınmıştır. Bu araçların yüksek eğimli yollarda çekiş performans problemleri olmuştur (NTV, 2009). Bu nedenle bir daha Phileas marka araçlar alınmamış ve başka markalara ait tek körüklü araçlar satın alınmıştır.

Phileas marka araçlardan günümüze kadar Metrobüs filosunda 165 kişi kapasiteli 18m Mercedes Citero ve 18m Mercedes Conecto, 220 kişi kapasiteli 21m Mercedes CapaCity L ve Otokar Kent XL, 165 kişi kapasiteli 18m Karsan Avancity ve 281 kişi kapasiteli Ulaşım firmasına ait 25m Ultra LF25 modelleri kullanılmıştır. Bu modellerin içerisinde Şekil 2.9'da gösterilen 25m uzunluğu, çift körüğü, 5 aksı, yüksek performansı, yüksek manevra kabiliyeti ve fazla yolcu taşıma özellikleri ile Ulaşım firmasının Ultra LF25 modeli öne çıkmaktadır (Ulasim, 2024).

Türkiye'de Otomotiv sektöründe regülasyonlar Avrupa Birliğini aynı anda yürürlüğe girerek ya da bir veya iki yıl ara ile yakından takip etmektedir. Günümüzde Türkiye'de dizel motor için geçerli regülasyon Euro VI, OBD-E aşamadır. Bu nedenle İstanbul

Metrobüs hattına en son verilen Otokar firmasının Kent XL aracı ve Ulaşım firmasının Ultra LF25 modelindeki dizel motorlar Euro VI, OBD-E regülasyonunu sağlamaktadır.



Şekil 2.9. Ulaşım firmasının 25m, çift körüklü ve 5 akslı Ultra LF25 modeli

2.6. İstanbul Metrobüs Hattında Araçlar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bir şehre metrobüs aracı alırken öncelikle aracın performans açısından o şehrin yol koşullarına uygun olup olmadığı detaylı olarak araştırılmalıdır. Aksi takdirde, 2007 yılında İstanbul Metrobüs hattında işletmeye alınan 50 adet Phileas marka metrobüste olduğu gibi, metrobüs güç aktarma organlarının bu güzergaha uygun olmaması nedeniyle ciddi performans sorunları yaşanabilecektir. Phileas marka araçların hizmete girdiği günden bu yana, Türkiye ulusal basınında bu araçların performans sorunlarına ilişkin haberler sürekli gündeme getirilmiştir (Aydınonat, 2014). Phileas marka metrobüslerin performans probleminin çözümü için üniversitelerin ilgili bölümlerinde çalışmalar yapılmıştır. Timuçin (Timuçin, 2016) sürücü sistemlerini modelleyerek Phileas aracının güç aktarma organlarını tasarladı. Sezer (Sezer, 2018) Phileas aracının şaft torkunun sınırlandırılması üzerinde çalışarak bir güç yönetim sistemi tasarladı. Burada açıklanan çözümler Phileas aracına uygulanmamıştır. Ulaşım firması 25 m, körüklü, 5 akslı, 1. ve 5. akstan yönlendirmeli dizel LF25 Metrobüs modelini geliştirerek Mart 2022 itibarıyla 132 aracı İstanbul Metrobüs Hattı'na teslim etmiştir. Haziran 2024 itibarıyla 220 000

kilometreyi aşan araçlar bulunmaktadır. Aracı kullanan sürücü ve yolcular, araçların performansından oldukça memnundur. Bir aracın performansı, aktarma organları tarafından belirlenir. LF25 dizel araca Türk Patent ve Marka Kurumundan "TR 2018 11920 Y" numaralı "Çok Körüklü Otobüs" isimli faydalı model belgesi alınmıştır. LF25 dizel aracın güç aktarma organları bu sertifikanın belgelerinde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.7. İstanbul Metrobüs Hattı Araçları Üzerine Yapılacak Çalışmalar

Günümüzde fosil yakıtlı araçların çevreye verdiği zararlar nedeniyle şehir içi ulaşım sektöründe üretim yapan firmalar elektrikli ve yakıt hücreli araçlara geçiş yapmaktadır. Bu kapsamda dünyada ve Avrupa'da yapılan çalışmalar izlenerek, üretilen araçların hangi özelliklere sahip olduğu ve hangi şehirlere teslim edildiği takip edilmektedir. İstanbul Metrobüs Hattı için yapılan çalışmalara geçmeden dünyada bu alanda yapılan çalışmaların detaylarına bakmak uygun olacaktır. Tasarımın temel bir parçası olarak sürüş davranışını, yol altyapısını, coğrafyayı ve trafik sistemini içeren metrobüs için hibrit, elektrikli ve yakıt hücreli güç aktarma organı tasarlanmıştır (Naranjo vd., 2017). Bunların performansı tasarım şemasından, kontrol stratejisinden ve sürüş koşullarından büyük ölçüde etkilenir(Zhou vd., 2023). Metrobüs araçların güç aktarma organları ağır hizmet tipi ticari araçların güç aktarma organlarına da paralellik gösterir. Bu nedenle bu çalışmada ağır hizmet tipi ticari araçların güç aktarma organları, ana bileşenleri ve özellikleri de incelenmiştir(Cunanan vd., 2021), (Tran vd., 2021), (Smallbone vd., 2020), (Verbruggen vd., 2020). Seri hibrit, elektrikli ve yakıt hücreli otobüsün ana bileşenleri ve özellikleri Çizelge 2.9'de özetlenmiştir (Mahmoud vd., 2016), (Çağatay Bayindir vd., 2011), (Kumar & Jain, 2014). Araç kütlesi ve yol eğiminin etkisi altında araçtan istenen performans için çok önemli olan elektrik motoru ve sürücüleri ile aynı güç aktarma organlarına sahiptirler (Tabbache vd., 2013), (Jiang vd., 2019). Enerji sistemi olarak Yüksek Gerilim Güç Dağıtım Birimi (YGGDB), Batarya, Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) ve DC/DC dönüştürücüden oluşmaktadır. Seri hibrit otobüs, diğer araçlardan farklı olarak dizel motorlu jeneratöre sahiptir (Z. Gao vd., 2022), (Kim, 2017), (Zhang vd., 2016). Dizel otobüsle karşılaştırıldığında seri hibrit otobüs düşük emisyona

ve düşük yakıt sarfiyatına sahiptir. Yakıt hücreli otobüs, elektrikli araçlardan farklı olarak hidrojen tanklarına sahiptir (Wang vd., 2006), (D. Gao vd., 2016), (Wolff vd., 2021). Hem elektrikli otobüs hem de yakıt hücreli otobüs, hibrit otobüse göre bileşenler açısından birbirine daha yakındır (Aguilar & Groß, 2022). Elektrikli otobüs ve yakıt hücreli otobüsün emisyonu sıfırdır.

Çizelge 2.9. Seri hibrit, elektrikli ve yakıt hücreli otobüsün ana bileşenleri ve özellikleri

Ana Bileşenler ve Özellikleri	Seri Hibrit Otobüs	Elektrikli Otobüs	Yakıt Hücreli Otobüs
Güç Aktarma Organları	Elektrik Motoru ve Sürücüleri	Elektrik Motoru ve Sürücüleri	Elektrik Motoru ve Sürücüleri
Enerji Sistemi	YGGDB Batarya BTYS Jeneratör ve Dizel Motor DC/DC dönüştürücü	YGGDB Batarya BTYS DC/DC dönüştürücü	YGGDB Batarya BTYS DC/DC Converter Hidrojen Tankları
Enerji Kaynakları	Yakıt ve Elektrik	Elektrik	Hidrojen
Özellikleri	Düşük Emisyon ve Düşük Yakıt Sarfiyatı	Sıfır Emisyon	Sıfır Emisyon

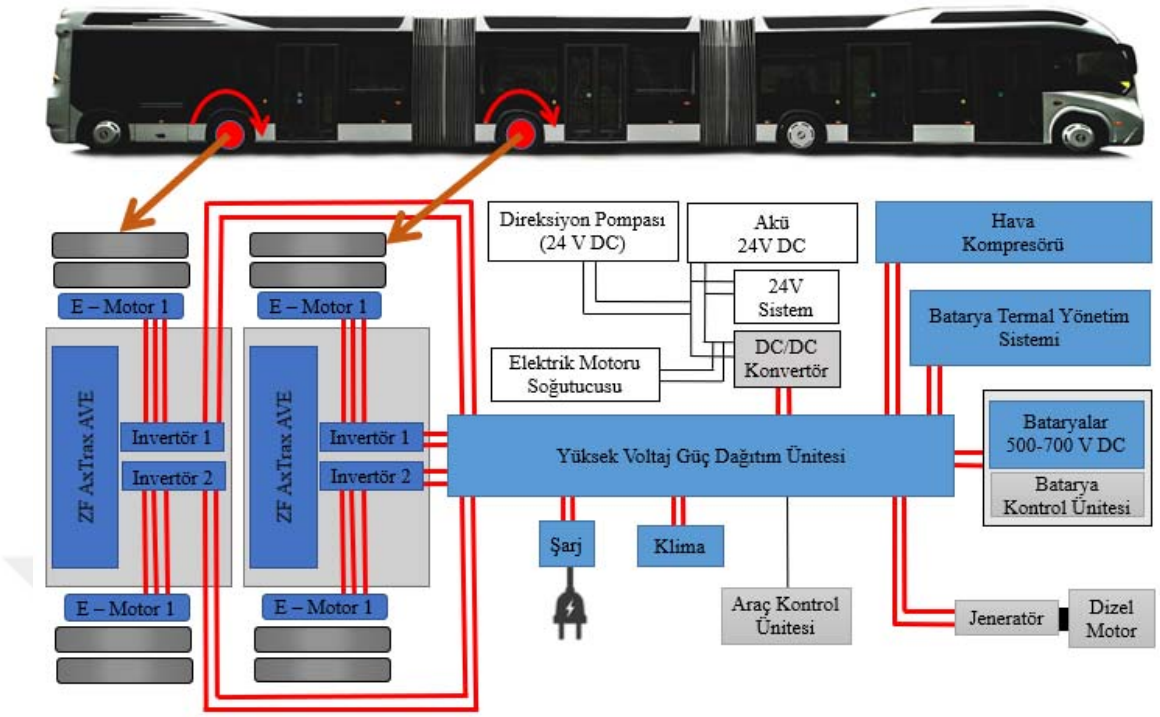
Avrupa Birliği ülkelerinde 2030 yılına kadar şehir içi ulaşımda kullanılan otobüs filolarının %95'inin elektrik, hidrojen veya doğalgazla çalışan sıfır emisyonlu otobüsler olacağı öngörülmektedir (Brdulak vd., 2020). Türkiye, otomotiv sektöründe Avrupa regülasyonlarını takip ettiği için Türkiye'deki otobüs üreticileri de bu yönde çalışmalar yapmaktadır. Büyük şehirlerde kullanılan belediye otobüslerinin sıfır emisyonlu olması şehirlerdeki hava kirliliğinin azaltılmasına önemli katkı sağlayacaktır. İstanbul Metrobüs Hattı'nda kullanılacak sıfır emisyonlu araçlar, İstanbul'daki hava kirliliğinin azaltılmasına önemli katkısı olacaktır. Türkiye'deki bazı üniversitelerin ilgili bölümleri tarafından İstanbul Metrobüs Hattının hibrit ve elektrikli olması yönünde yüksek lisans ve doktora öğrencilerine tez çalışması yaptırılmıştır. Yılmaz (Yılmaz, 2016) çalışmasında İstanbul metrobüs hattı için 18 metre seri hibrit elektrikli aracın aktarma organlarının

boyutlandırılması, güç ve enerji yönetimini araştırmıştır. Altay (Altay, 2017) çalışmasında metrobüs hattında elektrikli otobüslerin tekno-ekonomik kullanımını araştırmıştır. Kaymaz (Kaymaz, 2018), (Kaymaz vd., 2019) hibrit ve elektrikli metrobüs araçları için sürüş çevriminin geliştirilmesi konusunu çalışmıştır. Keskin (Keskin, 2019) çalışmasında İstanbul'da metrobüs sisteminden çift körüklü troleybüs sistemine geçilmesinin maliyet etkinliği analizini araştırmıştır. Tanyeri (Tanyeri, 2019) İstanbul metrobüs hattı için elektrikli araç çözümünü önermiştir. Aşağıda İstanbul metrobüs hattında çalışabilecek hibrit, elektrikli veya yakıt hücreli metrobüs araçların özellikleri detaylı olarak verilmektedir.

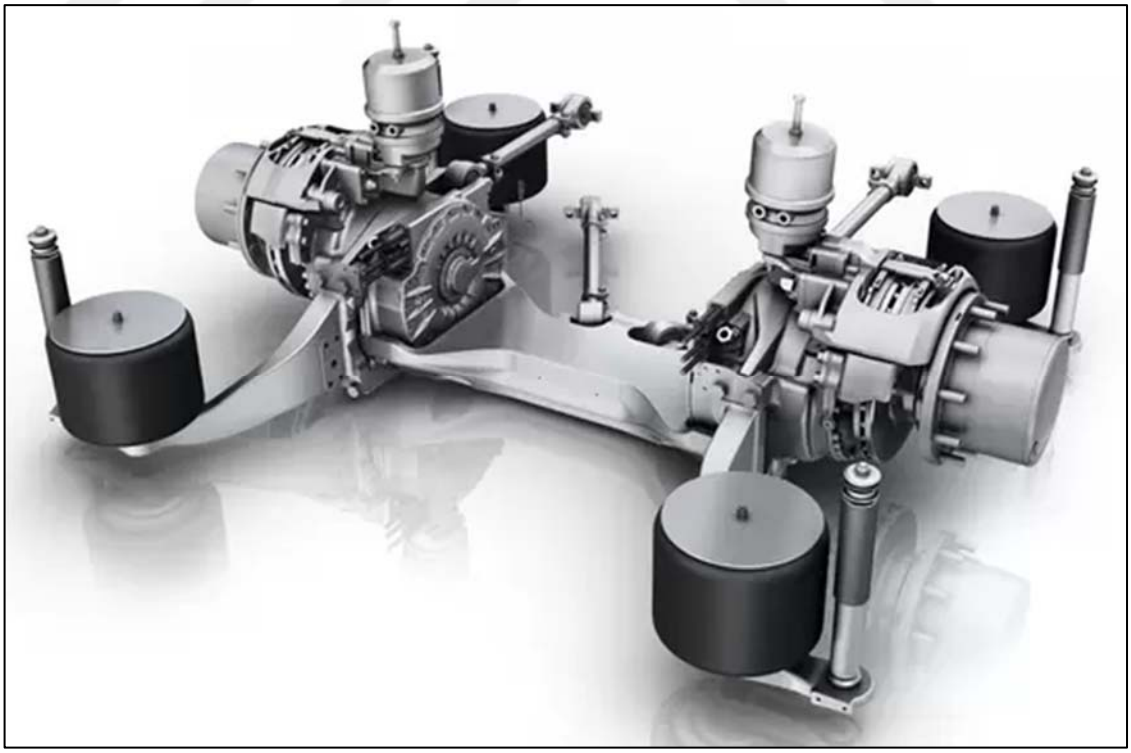
2.7.1. İstanbul Metrobüs Hattında Çalışabilecek Dizel Hibrit Araç Mimarisi

Avrupa'da otobüs ve metrobüs üreticileri 2010 ile 2020 yılları arasında dizel hibrit elektrikli araçlar üretmişlerdir. Türkiye'de 2015 yılından bugüne kadar dizel hibrit aracın üretilmesi gündeme gelmiştir. Ulaşım firmasına ait dizel LF25 Metrobüs modelinin dizel hibrit araca dönüştürülmüş halinin mimari yapısı Şekil 2.10'da verilmektedir. Bu şekilde gösterilen parçaların ne amaç ile kullanıldığı aşağıda belirtilmektedir.

Elektrik Motor Tahrikli Aks: Bu çalışmada LF25 aracının 3. ve 4. akslarında Şekil 2.11'de verilen ZF firmasının AxTrax AVE portal aksının kullanımı düşünülmüştür (ZF, 2024). Bu aks üzerine entegre edilmiş 2 adet üç faz, AC 400 V asenkron elektrik motoru, 2 adet invertör ve 1 adet kontrol ünitesi ile birlikte tedarik edilmektedir. Aks üzerinde bulunan bir motorun gücü 2500-8500 rpm arası devirlerde maksimum 125 kW, torku ise; 0-2500 rpm arası devirlerde maksimum 480 Nm'dir. Aks üzerinde bulunan motorların gücü ve torku SAE J1939 standardına göre, aracın CAN bus sistemi aracığı ile gaz pedalı ve fren pedalından gelen sinyaller aracılığı ile kontrol edilmektedir.



Şekil 2.10. İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek dizel hibrit araç mimarisi



Şekil 2.11. ZF firmasının AxTrax AVE portal aksı

Yüksek Voltaj Güç Dağıtım Ünitesi: Yüksek voltaj güç dağıtım ünitesi; motor invertörü, bataryalar, batarya termal yönetim sistemi, hava kompresörü, jeneratör, araç kontrol ünitesi, klima, şarj cihazı ve DC/DC konvertör arasındaki enerji kontrolünü sağlamaktadır.

Dizel Motor ve Jeneratör: Aracın enerji ihtiyacına bağlı olarak, dizel motor en verimli devirde çalışarak jeneratörün AC elektrik üretmesini sağlamaktadır.

Bataryalar: Bataryaların seçimi herhangi bir anda elektrik motoruna yeterli gücü verebilecek kapasitede seçilmektedir.

Şarj Cihazı: Araç dururken aracın bataryalarının şarj edilmesi için kullanılmaktadır.

Batarya Termal Yönetim Sistemi: Batarya termal yönetim sistemi araçtaki bataryaların ortam koşullarına göre sıcaklık yönetimini ayarlayan bir sistemdir. Bataryalar ile soğutma ünitesi arasındaki pompa, boru ve hortum bağlantıları kullanılarak soğutma sıvısının çevrimi yapılarak bataryaların sıcaklığı istenilen sıcaklık arasında tutulmaktadır.

Batarya Kontrol Ünitesi: Batarya kontrol ünitesi birçok hücreden oluşan batarya paketlerinin şarj ve deşarj sırasında denetimini ve yönetimini yapan sistemdir. Batarya paketlerinde akım, gerilim, sıcaklık vb. değerlerin ölçümünü yapılarak bu değerleri istenilen seviyede ayarlayan sistemdir.

Klima: Soğutma ve ısıtma sistemi, aracın tavanına konumlandırılan klima ünitesi tarafından gerçekleştirilmektedir. Klima kompresörü elektrik motoru ile tahrik edilerek klima gazının çevrimi sağlanmaktadır. Araç içi sıcaklık ve iç hava temizliği şoför bölgesinde bulunan klima kontrol kumandası ile kontrol edilerek araç iç ortam sıcaklığı belirli sınır aralıklarında ayarlanmakta ve aracın içine temiz hava alınmaktadır.

Hava Kompresörü: Araç fren sistemine, süspansiyon sistemine ve kapılarına basınçlı hava elektrikli motorlu hava kompresörü ile aracılığı ile verilmektedir.

DC/DC Konvertör: Bataryadan sağlanan 500 – 700 V DC akımı**,** aracın aksesuarları tarafından kullanılan 24 V DC akıma dönüştürür.

Araç Kontrol Ünitesi: Yüksek voltaj güç dağıtım ünitesi ve araca ait tüm CAN haberleşme sisteminin kontrolünü sağlar.

24 V Sistem: Araçta 24 V ile çalışan birçok aksesuar vardır. 24 V sistem dendiğinde aydınlatmalar, sinyaller, butonlar, kamera sistemi gibi 24 V ile çalışan tün bu aksesuarlar akla gelmelidir.

Akü: Araçta 24 V ile çalışan aksesuarları beslemek için kullanılır. DC/DC konvertör ile bataryadan sağlanan 500 – 700 V DC akım, 24 V DC akıma dönüştürülerek aküler beslenir.

Direksiyon Pompası: Hidrolik direksiyon dişli kutusu, direksiyon pompası 24 V DC akıma elektrikli motoru aracılığı ile çalıştırılır.

Elektrik Motor Soğutucusu: Elektrik motorlarından çıkan antifrizli sıcak su santrifüj pompası yardımıyla radyatörlere gönderilip soğutulmaktadır. Radyatörün içinden geçen antifrizli su, radyatör üzerine montajı yapılmış elektrikli fanların çalışmasıyla soğutulmaktadır. Motor suyu sıcaklığı; belirlenen aralıklarda, radyatör üzerindeki fanların sensörler aracılığı ile devreye girip çıkmasıyla, tutulmaktadır.

2.7.2. İstanbul Metrobüs Hattında Çalışabilecek Elektrikli Araç Mimarisi

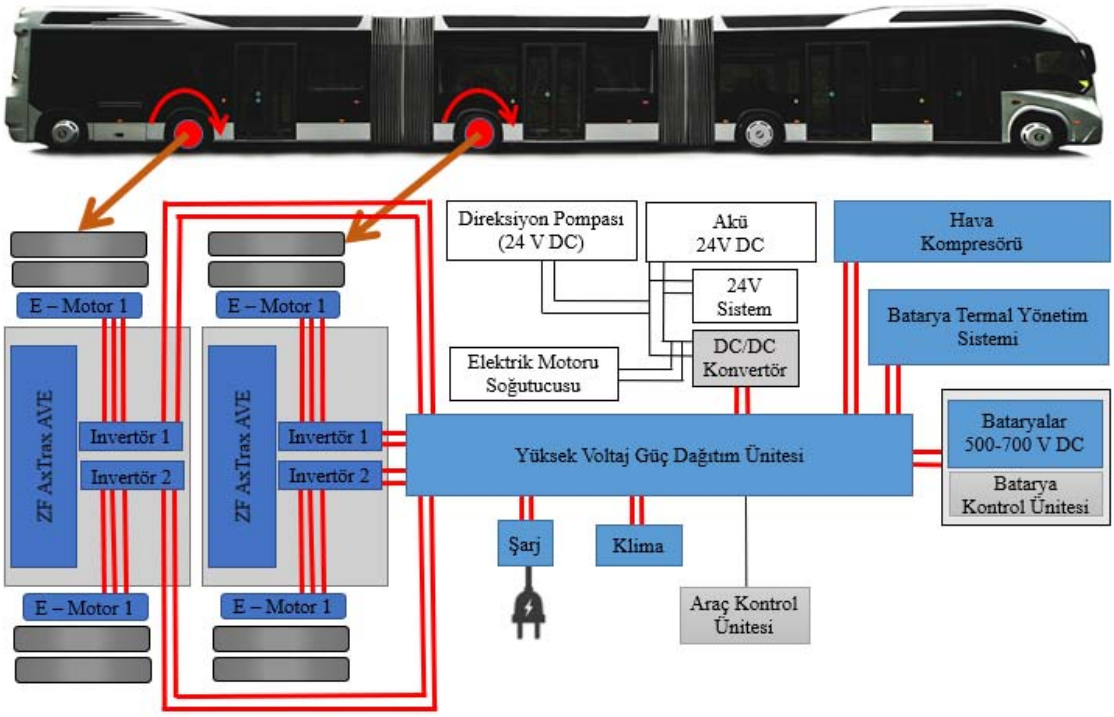
Avrupa'nın bazı büyük şehirlerine dizel motorlu otobüs ve metrobüslerin girişinin yasaklanması sonucu dizel-elektrikli hibrit araçtan da tam elektrikli ve yakıt hücreli otobüs ve metrobüs araçlara doğru bir yönelme olmuştur. Türkiye'de ise; hibrit otobüs ve metrobüsler üretilmeyerek Avrupa'ya paralel direk elektrikli metrobüs üretime geçileceği öngörülmektedir. Avrupa'da elektrikli otobüs ve metrobüslere geçildiği için, muhtemelen Türkiye'de de hibrit araç yerine direk elektrikli otobüs ve metrobüslere geçilecektir. İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek elektrikli araç mimarisi Şekil

2.12'de verilmektedir. Şekil 2.12'de verilen elektrikli araç mimarisi Şekil 2.10'da verilen dizel hibrit araç mimarisinden dizel motor ve jeneratör çıkartılarak elde edilmiştir.

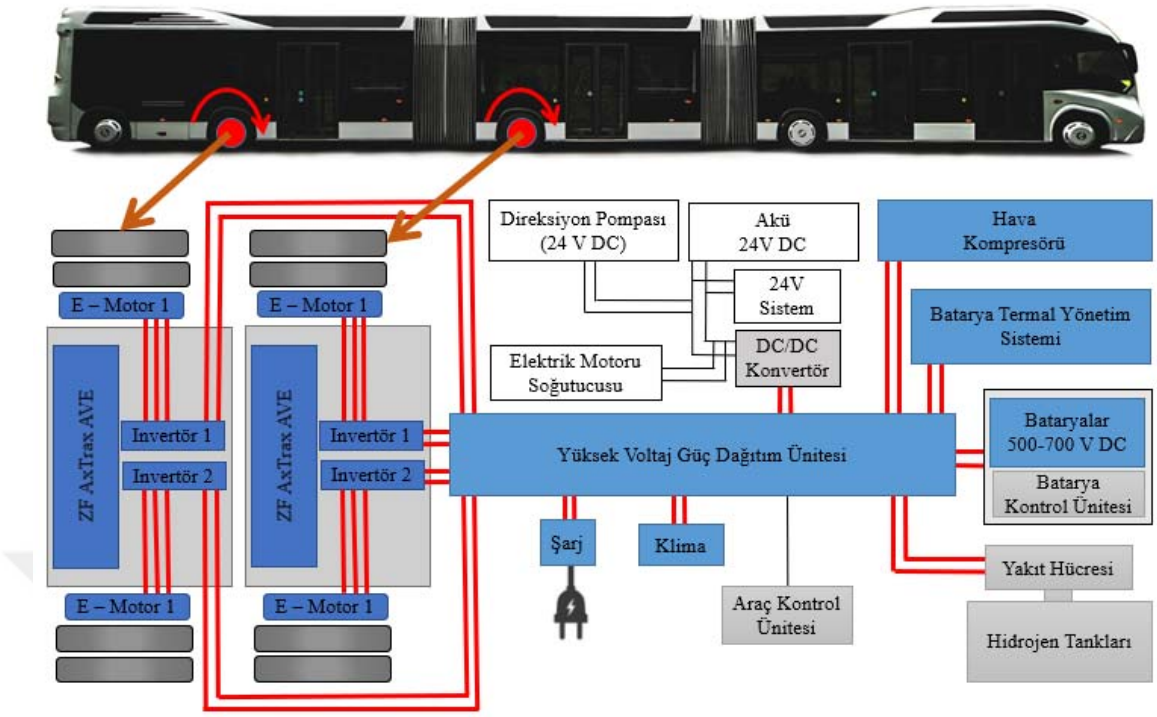
Dizel hibrit araçta enerji şarj cihazı ve dizel motor jeneratörü ile elde edilirken, elektrikli araçta enerji şarj cihazı ile şebeke cihazı ile elde edilmektedir. Şarj cihazı soket tipi olabileceği gibi tavandan pantograf tipi de olabilmektedir.

2.7.3. İstanbul Metrobüs Hattında Çalışabilecek Yakıt Hücreli Araç Mimarisi

Avrupa'da ve Türkiye'de üreticiler yakıt hücreli otobüslerin prototip üretimlerine başlamışlardır. Fakat hidrojen tedarikindeki üretim ve dağıtım problemlerinden dolayı yakıt hücreli otobüs ve metrobüslerin yaygınlaşması 2035 ve daha sonraki yılları alacağı tahmin edilmektedir. Şekil 2.13'te İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek elektrikli araç mimarisi verilmektedir. Şekil 2.13'te verilen yakıt hücreli araç mimarisi Şekil 2.12'de verilen elektrik araç mimarisine aşağıda detayları anlatılan yakıt hücresi ve hidrojen tankları ilave edilerek elde edilmiştir.



Şekil 2.12. İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek elektrikli araç mimarisi



Şekil 2.13. İstanbul Metrobüs Hattında çalışabilecek yakıt hücreli araç mimarisi

Yakıt Hücresi: Yakıt hücresi seçimi yapılırken LF25 metrobüste kullanılacak olan ZF firmasının 2 adet AxTrax AVE portal aksının güç ve torkuna uygun yakıt hücresi seçilmesi gerekmektedir. Yakıt hücresi seçim konusu bu çalışmanın dışındadır.

Hidrojen Tankları: Hidrojen tankları LF25 metrobüsün tavanına yerleştirilmelidir. Günümüzde tedarik edilebilen 360 bar basınca dayanıklı karbon fiber tanklar bulunmaktadır. Kullanılacak tank sayısı, müşteri tarafından bir dolumda LF25 metrobüsün kaç km gitmesi isteneceğine bağlı olarak değişecektir. Tank sayısının hesaplama konusu bu çalışmanın kapsamı içinde değildir.

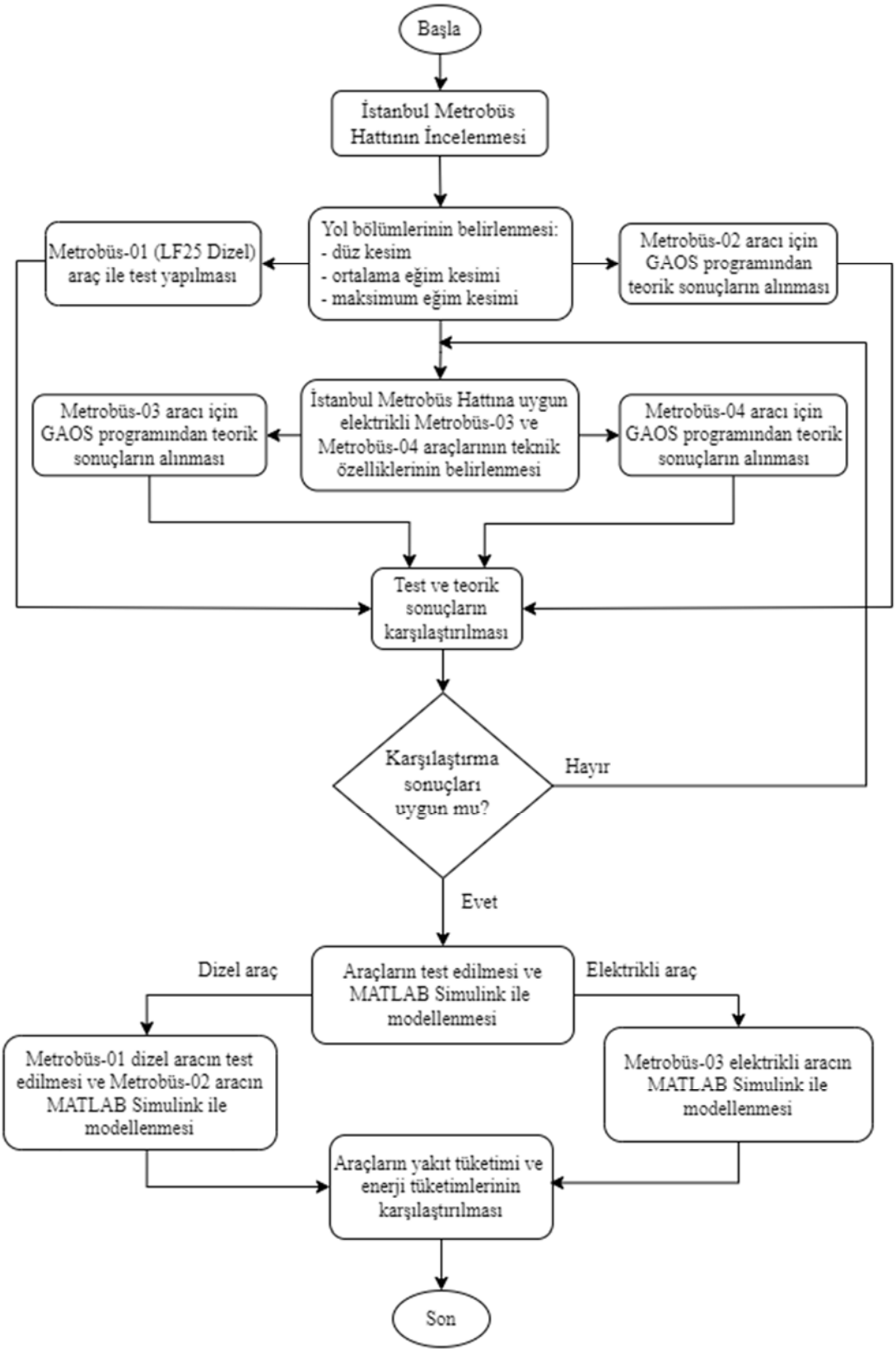
3. MATERYAL ve YÖNTEM

İstanbul metrobüs hattında kullanılacak tam elektrikli metrobüs güç aktarma organlarının seçimi için aşağıda Şekil 3.1'de belirtilen deneysel ve teorik metot uygulanmıştır. Şekil 3.1'de belirtilen Metrobüs-01 aracı, dizel LF25 test aracıdır. Metrobüs-02 aracı, LF25 dizel aracın Güç Aktarma Organları Seçim (GAOS) programında hesabı yapılan teorik bir araçtır. Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçları, LF25 araca sırasıyla ZF'nin 2 adet ve 3 adet ZF AxTrax AVE elektrikli portal aksının montaj edilerek GAOS programında hesabı yapılan teorik araçlardır(ZF, 2024). GAOS programı MATLAB APPS programı kullanılarak otobüslerin güç aktarma organları seçimi için geliştirilen bir programdır (Yiğit, 2017). Şekil 3.1'de verilen İstanbul Metrobüs Hattı için güç aktarma organları seçim metodunun detayları aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır.

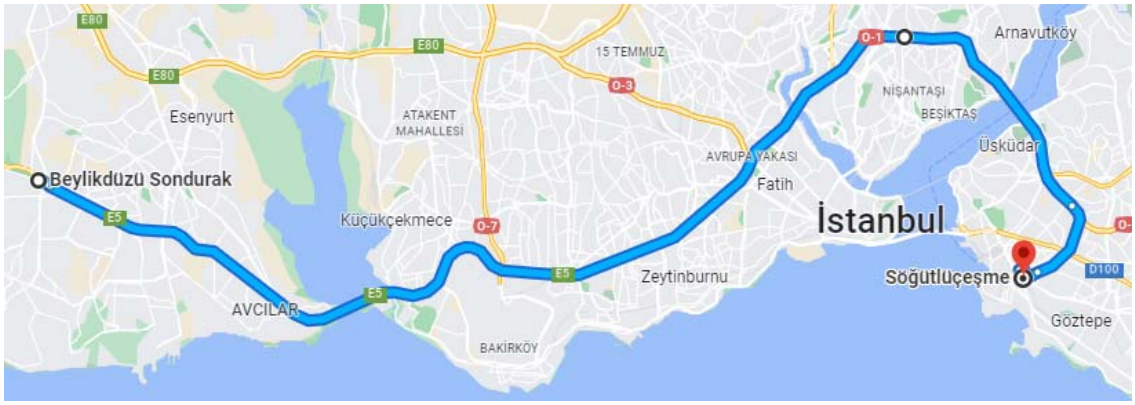
3.1. İstanbul Metrobüs Hattının İncelenmesi

Otomotiv sektöründe bir ülkeye, bir bölgeye veya bir şehre şehir içi ulaşım için otobüs verilecekse ve gelecekte araçların performanslı bir şekilde çalışması istiyorsa, o coğrafyanın yol şartlarının detaylı incelenmesi ve araçların o coğrafyanın şartlarına göre geliştirilmesi gerekir (Balket & Asmael, 2021), (Changyu vd., 2023). İstanbul Metrobüs Hattı Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, İstanbul'un Avrupa yakasında Beylikdüzü ile Anadolu yakasında Söğütlüçeşme arasındadır. İstanbul Metrobüs Hattının işletmesi İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel (İETT) tarafından yapılmaktadır. Hattın uzunluğu yaklaşık 52 km, durak sayısı 44 ve günlük taşınan yolcu sayısı 950.000 kişinin üzerindedir (Global BRT Data, 2024c) (Vikipedi, 2024).

İstanbul Metrobüs Hattını fiziksel olarak incelemek için, mevcut hatta çalışan araçlara günün yoğun olan ve yoğun olmayan saatlerinde, yolcu gibi binilerek, Söğütlüçeşme' den Beylikdüzü' ne ve tersi yönde seyahat edilmiştir. Bu seyahat esnasında araçlardaki yolcu doluluk oranları ve hattın özellikleri yerinde incelenmiştir. Metrobüs Hattının yol verileri (Küresel Konumlama Sistemi (GPS) koordinatları, yükseklik ve mesafe) İETT'den istenip, detaylı incelenerek Çizelge 3.1'de verilen eğime göre yol kesiti elde edilmiştir.



Şekil 3.1. İstanbul Metrobüs Hattı için güç aktarma organları seçim metodu



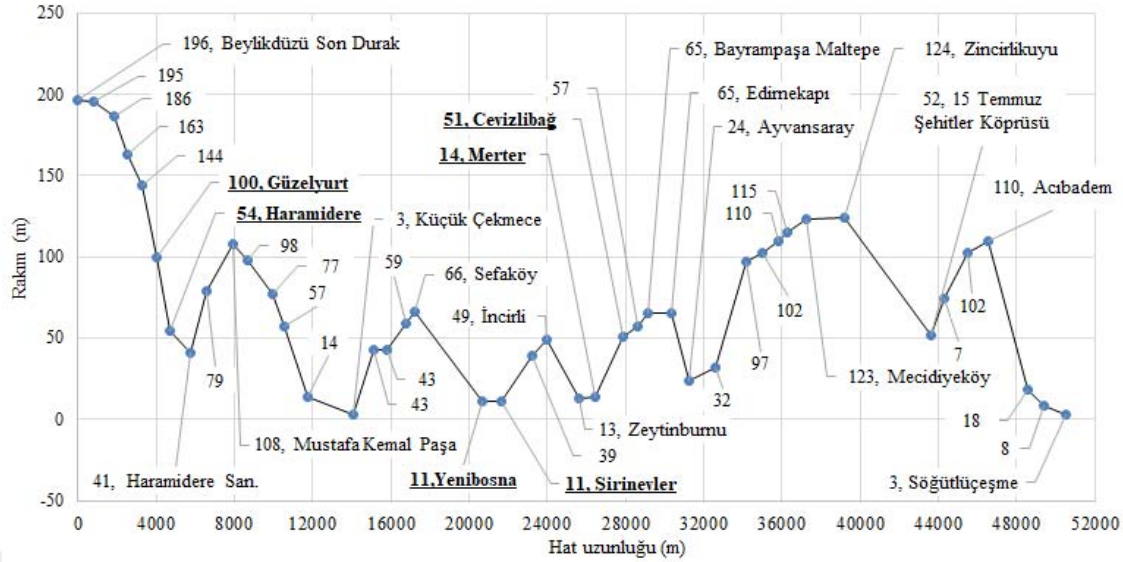
Şekil 3.2. İstanbul Metrobüs Hattı

Yolun büyük bir kısmının eğimi %0 ile %5 arasındadır ve yolun %40,86'ni oluşturarak 20.649 m uzunluğundadır. Yolun %5 ile %8 arasındaki eğimi, yolun %7,57'lik kısmını oluşturmaktadır ve uzunluğu 3.826 m'dir. Yolun %1,16'lık kısmı %8 ile %11 arası eğimi içermektedir ve uzunluğu 586 m'dir. Yolun %11 ile %12 arasındaki eğimi, yolun %0,41'lik kısmını oluşturmaktadır ve sadece 207 m'dir. Yolun diğer yarısı ise; % -12 ile % 0 arası eğimi içererek, uzunluğu -25.268 m'dir ve negatif yönde eğimlidir.

Çizelge 3.1. İstanbul Metrobüs Hattının eğime göre yol oranı ve uzunluğu

Eğim aralığı (%)	Yolun eğim oranı (%)	Mesafe (m)
0 ≤ Eğim <5	40,86	20.649
5 ≤ Eğim <8	7,57	3.826
8 ≤ Eğim <11	1,16	586
11 ≤ Eğim <12	0,41	207
-12 ≤ Eğim <0	-50	-25.268

İETT'den alınan Metrobüs Hattının yol verileri, Google Earth programı kullanılarak karşılıklı kontrol edilmiştir. Google Earth programından her durağın deniz sevisine göre yüksekliği, İETT'den alınan duraklar arası mesafeler kullanılarak, Şekil 3.3'te verilen İstanbul Metrobüs Hattı grafiği çizilmiştir. Bu grafikte hattın başlangıç ve bitiş duraklarının adı, her durağın rakımı, yolun rakımı en düşük ve en yüksek noktalarındaki durakların adları ve testlerde kullanılan durak adları koyu ve altı çizili olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. İstanbul Metrobüs Hattının yola göre eğim grafiği

Şehir içi bir otobüsün prototipini yaparak aracın kullanılacağı yolda test edip performans sonuçlarını görmek hem uzun zaman almaktadır hem de maliyeti çok yüksektir. Bunun yerine aracın güç aktarma organları modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması ve oluşturulan modelin koşturulması hem zaman açısından hem de maliyet açısından ciddi avantajlar sağlamaktadır. Bilgisayar ortamında tüm yolu modellemek ve analizlerini yapmak da çok uzun zaman almaktadır. Bunun yerine; tüm yolun şartlarını içeren "hattın düz, hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli ve hattın maksimum eğimli" olduğu yol kesitlerinin tespit edilip modellenmesi, daha hızlı ve daha doğru sonuçlara ulaşmak için en hızlı yöntemdir. Aşağıda bu yöntemler detaylı anlatılmıştır.

3.2. Hattın Düz, Büyük Kısmını Temsil Edebilecek Uygun Eğimli ve Maksimum Eğimli Yol Kesitlerinin Tespit Edilmesi

Tüm hattın şartlarını düz yol, büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol ve maksimum eğimli yol kesitleri içermektedir. Düz yol; araca yol eğiminden dolayı herhangi bir kuvvetin etki etmediği bir yoldur ve araçların performans karşılaştırılmasında mutlaka göz önünde bulundurulması gerekir. Hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesiti; toplam yol eğiminin büyük bir kısmına yakın

olmalıdır ve gerçekte de yolu temsil etmelidir. Bu nedenle yolun hangi kesitinin alınması gerektiği detaylı inceleme yapıldıktan sonra karar verilmelidir. Maksimum eğimli yol kesiti; araca yol eğiminden dolayı en fazla kuvvetin etki ettiği yoldur ve araçların performans karşılaştırılmasında en kritik yol kesitidir. Araç bu kesitte iyi performans göstermiyor ise; bu araç üretilmemelidir. Aşağıda bu yol kesitlerini nasıl seçildiği detaylı anlatılmıştır.

3.2.1. Hattın düz yol kesitinin tespit edilmesi

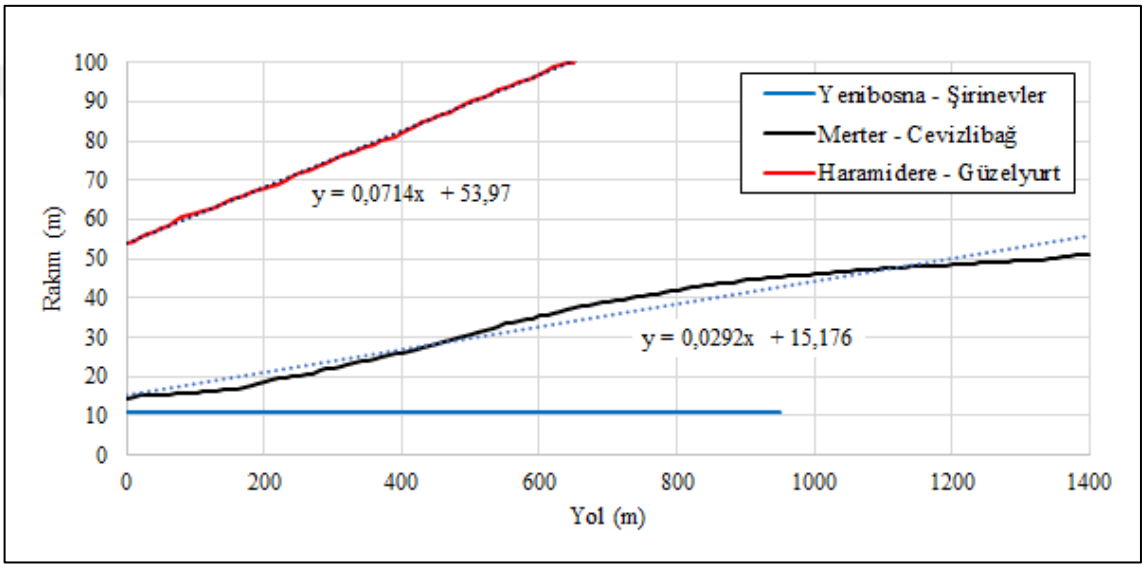
Metrobüs Hattının yol verileri, Google Earth programı ölçümlerinde ve fiziksel incelemede Şirinevler - Yenibosna durakları arasındaki yolun düz olduğu görülmüştür. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, yolun bu kısmı Beylikdüzü - Söğütlüçeşme istikametine doğru 20.677m ile 21.620m arasındaki 943m'lik mesafesidir. Bu aralıkta yolun yükseklikteki değişimi 1 m'nin altındadır. Bu neden ile yolun bu kesiti düz yol olarak seçilmiştir. Şekil 3.4'te Şirinevler-Yenibosna durakları arasındaki yol düz olduğu için yatay çizgi olarak gösterilmiştir.

3.2.2. Hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesitinin tespit edilmesi

Metrobüs Hattının yol verileri, Google Earth programı ölçümleri ve fiziksel inceleme neticesinde Şekil 3.3'te görülen Merter - Cevizlibağ durakları arasındaki yolun "hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesiti" olduğuna karar verilmiştir. Yolun bu kısmı Beylikdüzü - Söğütlüçeşme istikametine doğru 26.416m ile 27.872m arasındaki 1.456m'lik mesafesidir. Bu duraklar arasında yolun eğimi %0 ile %6 arasında değişerek Şekil 3.4'te görüldüğü gibi ortalama eğimi %2,92'dir. Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi yolun büyük bir kısmının eğimi %0 ile %5 arasındadır. Dolayısı ile Merter - Cevizlibağ durakları arasındaki yolun "hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesiti" olması uygundur.

3.2.3. Maksimum eğimli yol kesitinin tespit edilmesi

Metrobüs hattının yol verileri, Google Earth programı ölçümleri ve fiziksel inceleme neticesinde; Haramidere - Güzelyurt durakları arasındaki yolun "maksimum eğimli yol kesiti" olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, yolun bu kısmı Beylikdüzü - Söğütlüçeşme istikametine doğru 4.047m ile 4.719m arasındaki 672m'lik mesafesidir. Bu duraklar arasında yolun eğimi %5 ile %12 arasında değişerek Şekil 3.4'te görüldüğü gibi ortalama eğimi %7,14'tür.



Şekil 3.4. Seçilen yol kesitlerinin rakıma göre grafiği

3.3. Metrobüs-01, LF25 Dizel Araç ile Test Yapılması

Metrobüs-01, LF25 dizel test aracı tam yolcu kapasitesine denk gelecek bir yük ile Şekil 3.5'teki fotoğraflarda görüldüğü gibi yüklenip, Beylikdüzü ile Söğütlüçeşme arasında testler yapılarak zamana göre, aracın aldığı yol ve hız bilgileri DEWE 43 A cihazı CANBUS sistemine bağlanarak dizüstü bilgisayar yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Aracın yüklü halde toplam ağırlığı 45.608 kg'dır. Testler performans amaçlı yapıldığı için gece metrobüs hattında başka araçların olmadığı zaman diliminde, araç tam yüklü ve gaz pedalı oranı %100 olarak yapılmıştır. Testlerde özellikle Şirinevler - Yenibosna,

Merter - Cevizlibağ ve Haramidere - Güzelyurt durakları arasındaki veri alışına özel olarak dikkat dilmiştir.



Şekil 3.5. Metrobüs-01, LF25 dizel aracın yüklü ve test cihazlarının bağlı hali

3.4. GAOS Programı Özelleştirilerek, Teorik Sonuçların Elde Edilmesi

Otobüslerin güç aktarma organları için geliştirilen GAOS programı; Metrobüs-02, Metrobüs-03, Metrobüs-04 araçları, Şirinevler - Yenibosna, Merter - Cevizlibağ ve Haramidere - Güzelyurt yol verileri girilip özelleştirilerek teorik analiz sonuçları elde edilmiştir. GAOS programında kullanılan denklemler aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

GAOS programında kullanılan kinematik denklemler Denklem 3.1'den Denklem 3.6'ya kadar verilmiştir. Denklem 3.1'de aracın hızı; motorun devrine (rpm), şanzıman oranlarına, eşdeğer diferansiyel oranına ve teker dinamik yarıçapına (m) bağlı olarak km/h biriminde hesaplanır. Denklem 3.2'de motor devri (rpm); aracın hızına (km/h), şanzıman oranlarına, eşdeğer diferansiyel oranına ve teker dinamik yarıçapına (m) bağlı olarak hesaplanır.

$$V_v = \frac{0.377\ R\ N}{G_T\ G_D} \tag{3.1}$$

$$N = \frac{G_T\, G_D\, V_v}{0.377\, R} \tag{3.2}$$

Denklem 3.3'te aracın hızı; aracın ilk hızına (m/s), ivmeye (m/s^2) ve zamana (s) bağlı olarak km/h biriminde hesaplanır. Denklem 3.4'te aracın aldığı yol (m); hızı aracın ilk hızına (m/s), ivmeye ve zamana bağlı olarak hesaplanır.

$$V = V_0 + at \tag{3.3}$$

$$x - x_0 = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \tag{3.4}$$

Denklem 3.5'te aracın hızı (m/s); aracın ilk hızına (m/s), ivmeye (m/s^2) ve aracın aldığı yola (m) bağlı olarak hesaplanır. Denklem 3.6'da aracın aldığı yol (m); hızı aracın ilk hızına (m/s), hızına (m/s) ve zamana (s) bağlı olarak hesaplanır.

$$V^2 = V_0^2 + 2a(x - x_0) \tag{3.5}$$

$$x - x_0 = (V - V_0)t \tag{3.6}$$

Metrobüs-02 aracına etki eden kuvvetler Şekil 3.6'da gösterilmektedir. GAOS programında Şekil 3.6'da gösterilen kuvvetlerden faydalanılarak yazılan Denklem 3.7'den Denklem 3.22'ye kadar verilmiş dinamik denklemler kullanılmıştır. Denklem 3.7'de aracın çekiş kuvveti (N); motorun torkuna (Nm), şanzıman oranlarına, eşdeğer diferansiyel oranına, güç aktarma organı toplam mekanik verimi ve teker dinamik yarıçapına (m) bağlı olarak hesaplanır. Aracın çekme torku 4. aksa %67 ve 5. aksa %33 oranında uygulanır. Bu neden ile Denklem 3.8'de akslara gelen torklar ve Denklem 3.9'da çekme kuvvetleri toplanır.

$$F_T = \frac{T\, G_T\, G_D\, \eta}{R} \tag{3.7}$$

$$T = 0.67T_4 + 0.33T_5 \tag{3.8}$$

$$F_T = 0.67F_4 + 0.33F_5 \tag{3.9}$$

Denklem 3.10'da hava direnç kuvveti (N); hava direnç katsayısı, havanın yoğunluğu (kg/m^3) araç ön kesit alanı (m^2)ve araç hızına (m/s) bağlı olarak hesaplanır.

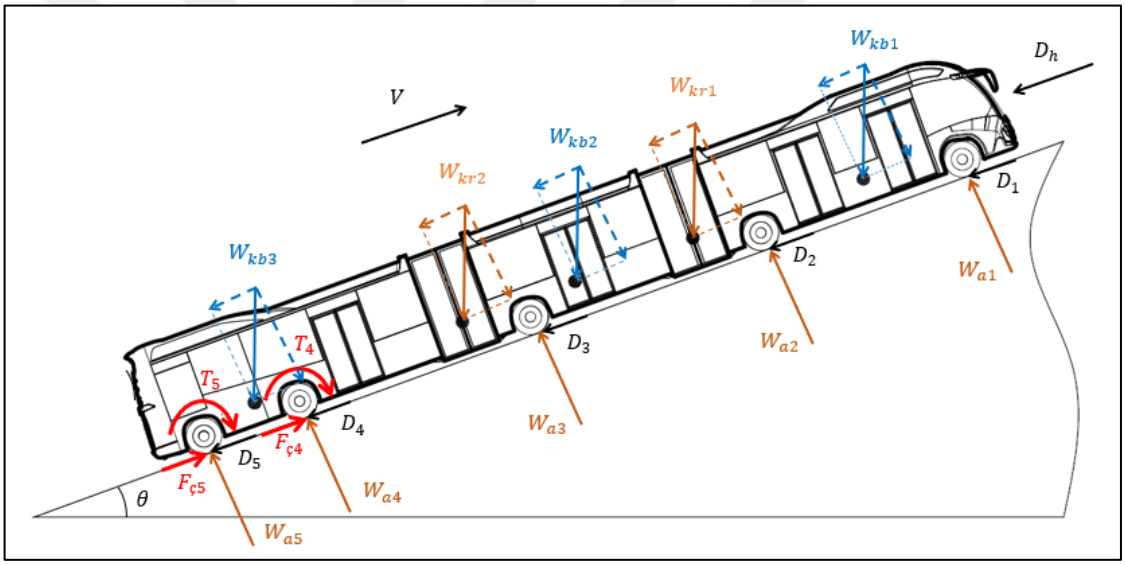
$$D_h = \frac{1}{2} C_d \, \rho \, A \, V^2 \tag{3.10}$$

Denklem 3.11'de aracın yokuş direnç kuvveti; 1. kabin ağırlığı, 1. körük ağırlığı, 2. kabin ağırlığı, 2. körük ağırlığı, 3. kabin ağırlığı ve yol eğim açısına bağlı olarak hesaplanır. Denklem 3.12'de aracın toplam ağırlığı hesaplanır. Denklem 3.13'te aracın yokuş direnç kuvveti; aracın toplam ağırlığı ve yol eğim açısına bağlı olarak hesaplanır.

$$D_{gr} = (W_{cb1} + W_{ar1} + W_{cb2} + W_{ar2} + W_{cb3}) \sin(\theta) \tag{3.11}$$

$$W = W_{cb1} + W_{ar1} + W_{cb2} + W_{ar2} + W_{cb3} \tag{3.12}$$

$$D_{gr} = W \sin(\theta) \tag{3.13}$$



Şekil 3.6. Metrobüs-02 aracına etki eden kuvvetlerin gösterimi

Denklem 3.14'te aracın yuvarlanma direnç kuvveti (N); sırasıyla akslara gelen yükler, teker yuvarlanma direnç katsayısı ve yol eğim açısına bağlı olarak bulunur. Denklem 3.15'te sırasıyla akslara gelen yükler toplanarak aracın toplam ağırlığı hesaplanır. Denklem 3.16'da aracın yuvarlanma direnç kuvveti (N); aracın toplam ağırlığı, teker yuvarlanma direnç katsayısı ve yol eğim açısına bağlı olarak hesaplanır.

$$D_{rr} = (W_{a1} + W_{a2} + W_{a3} + W_{a4} + W_{a5}) \, \mu \cos(\theta) \tag{3.14}$$

$$W = W_{a1} + W_{a2} + W_{a3} + W_{a4} + W_{a5} \quad (3.15)$$

$$D_{rr} = W\,\mu\cos(\theta) \quad (3.16)$$

Denklem 3.17'de aracın toplam direnç kuvveti (N); yuvarlanma direnç kuvveti (Denklem 16), yokuş direnç kuvveti (Denklem 3.13) ve hava direnç kuvveti (Denklem 3.10) toplanarak hesaplanır.

$$F_{tr} = \ W(\mu\cos(\theta) + \sin(\theta)) + \frac{1}{2} C_d\,\rho\,A\,V^2 \quad (3.17)$$

Denklem 3.18'de aracın toplam net kuvveti (N); Newton'un 2. yasasına uygun olarak aracın üzerindeki net kuvvet, aracın eşdeğer kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşittir.

$$\sum F_{net} = m_e a \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'deki etkin kütle (m_e), Metrobüs-01 dizel LF25 için ve denklem (3.19a)'deki etkin kütle (m_e), Metrobüs-03 elektrikli LF25 için geçerlidir (Gillespie, 2021). Denklem (3.19a)'de verilen eşdeğer kütle; aracın kütlesine, şanzıman oranlarına ve eşdeğer diferansiyel oranlarına bağlı olarak testler sonucunda elde edilen bir denklemdir. Denklem (3.19b) 'de verilen eşdeğer kütle ise; elektrik motoru planet dişlileri kütle atalet momentleri, jant ve lastiğin kütle atalet momentleri ve lastiğin yarıçapına bağlı olarak yazılan bir denklemdir.

$$m_e = m[1 + 0.04(G_T\,G_D) + 0.0025\,(G_T\,G_D)^2] \quad (3.19a)$$

$$m_e = m + \left(4I_{et}\ {G_D}^2 + 8I_w\right)/\ R^2 \quad (3.19b)$$

Denklem 3.18'de araca etki eden çekme kuvveti ve direnç kuvvetleri toplamının farkı yazıldığında Denklem 3.20 elde edilir. Denklem 3.20'de araca etki eden çekme kuvveti (Denklem 3.7) ve direnç kuvvetleri toplamı (Denklem 3.17) yazıldığında Denklem 3.21 elde edilir.

$$F_T\ - F_{tr}\ = m_e a \quad (3.20)$$

$$\frac{\mathrm{T}\ G_{\mathrm{T}}\ G_D\ \eta}{\mathrm{R}} - W(\mu\cos(\theta) + \sin(\theta)) + \frac{1}{2}\mathrm{C}_d\ \rho\ \mathrm{A}\ V^2 = m_e a \quad (3.21)$$

Denklem (22)'de belirtilen ideal çekiş kuvveti, araçta kullanılan içten yanmalı veya elektrik motor gücüne ve aracın hızına bağlı olarak hesaplanır.

$$\mathrm{F}_i = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{V}} \quad (3.22)$$

3.5. İstanbul Metrobüs Hattına Uygun Olabilecek Elektrikli Araç Özellikleri ve Güç Aktarma Organlarının Belirlenmesi

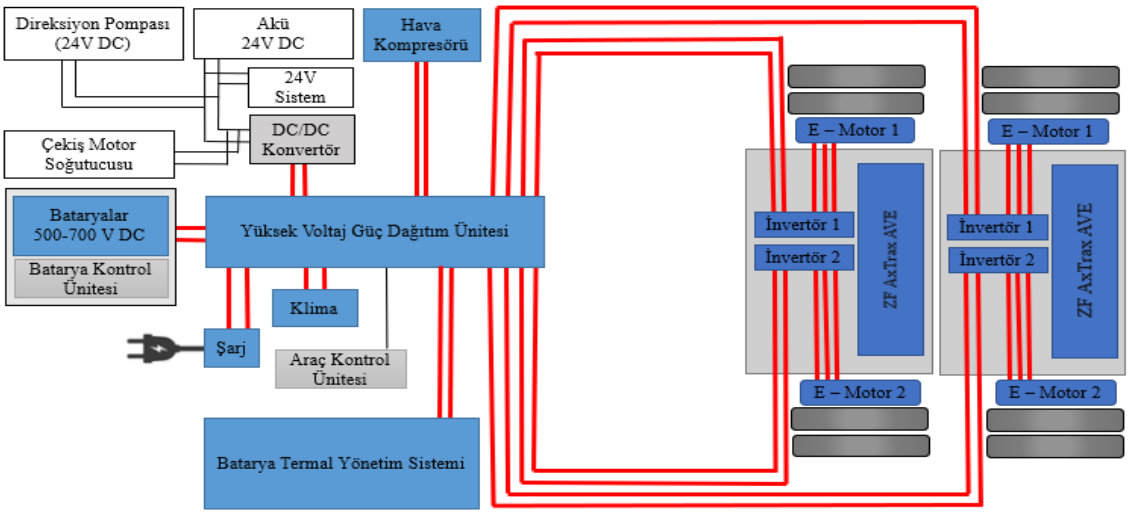
Dünyada ve Avrupa'daki çift körüklü metrobüs uygulamalarında elektrikli araçlarda diferansiyelden veya tekerden tahrik edilen tahrik sistemleri kullanılmaktadır (D. Gao vd., 2016). Avrupa'da çift körüklü metrobüslerde ZF'nin 2 adet AxTrax AVE elektrikli portal aksının montaj edildiği araçlar mevcuttur. Ancak Avrupa şehirlerindeki yollar İstanbul Metrobüs Hattına göre daha düz olabilir ve aynı güç aktarma organlarına sahip olan araçlar, geçmişte Phileas araçlarında olduğu gibi, bu hatta iyi performans göstermeyebilirler. Ayrıca Ulaşım firması tarafından üretilen aracın boyutları ve yolcu taşıma kapasiteleri farklı olması nedeniyle, ağırlığı da farklıdır. Bundan dolayı ZF'nin 3 adet AxTrax AVE elektrikli portal aksının montaj edildiği araçlarda düşünülerek, bu araçların güç aktarma organları detaylı analiz edilmiştir. Şekil 3.7'de en üstte verilen Metrobüs-01 aracı, 4. ve 5. akstan tahrikli LF25 dizel test aracını gösterirken, Metrobüs-02 aracı ise; bu aracın GAOS programında hesabı yapılan teorik bir aracıdır. Şekil 3.7'de verilen LF25 aracın endüstriyel tasarımı Türk Patent ve Marka kurumundan "2016 04060" tescil numarası ile koruma altına alınmıştır. Şekil 3.7'nin ortasında verilen Metrobüs-03 aracı ise; 3. aksa ve 4. aksa ZF'nin 2 adet AxTrax AVE elektrikli portal aksının montaj edildiği teorik araçtır. Şekil 3.7'nin en altında verilen Metrobüs-04 aracı, 2. aksa, 3. aksa ve 4. aksa ZF'nin 3 adet AxTrax AVE elektrikli portal aksının montaj edildiği teorik araçtır. Çizelge 3.2'de Metrobüs-01, Metrobüs-02, Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçlarının özellikleri verilmektedir. AxTrax AVE elektrikli portal aksın 1 tekerindeki motorunun gücü 125 kW ve Torku 480 Nm'dir. Tork ve güç değerleri Çizelge 3.2'de Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçları için toplam olarak verilmiştir. Çizelge

3.2’de belirtilen eşdeğer diferansiyel oranı, şanzıman oranları hariç, tüm aktarma organlarında bulunan dişli oranlarının çarpımıdır.

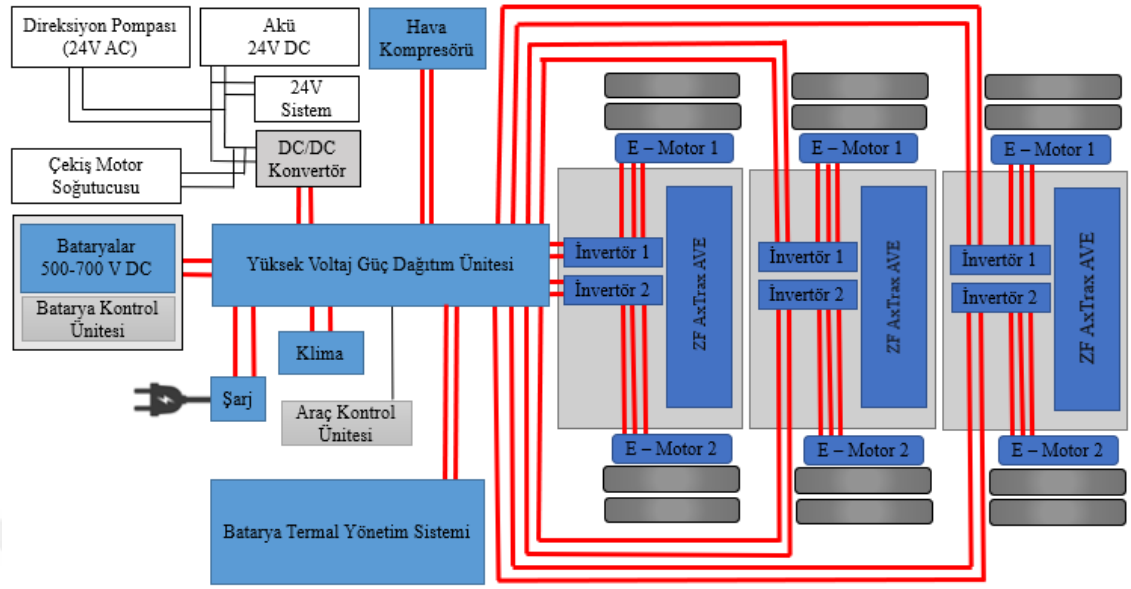
Metrobüs-03 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi Şekil 3.8’de verilmektedir. Bu araçta 2 adet ZF AxTrax AVE aksın, elektrik motorlarının, invertörlerin, yüksek voltaj güç dağıtım ünitesinin, bataryaların, batarya termal yönetim sisteminin, hava kompresörünün şarj ünitesi, klima ve düşük voltaj ile çalışan diğer ekipmanların yerleşim planı verilmiştir. Metrobüs-04 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi Şekil 3.9’da verilmektedir. Metrobüs-04 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi Şekil 3.8’e 3. aks ve invertörleri ilave edilerek elde edilmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da kırımızı hatlar yüksek voltaj sistemini ve siyah hatlar düşük voltaj sistemini göstermektedir.



Şekil 3.7. Metrobüs araçların güç aktarma sistemleri



Şekil 3.8. Metrobüs-03 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi



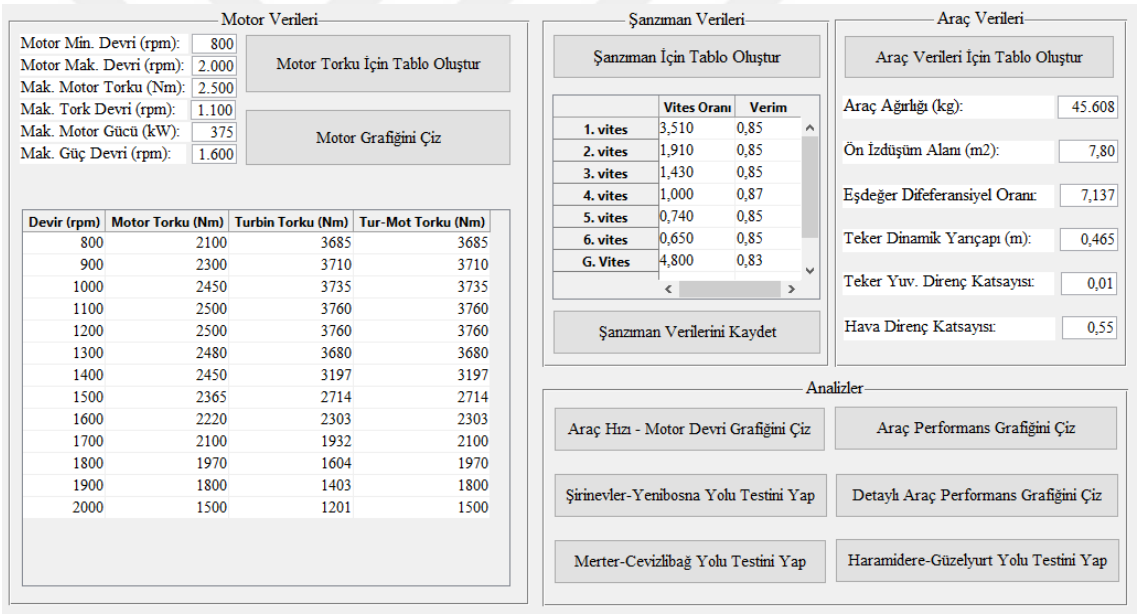
Şekil 3.9. Metrobüs-04 aracının yüksek ve düşük voltaj sistemi

Çizelge 3.2. Araç özellikleri karşılaştırma tablosu

Araçların özellikleri	Metrobüs-01 Metrobüs -02	Metrobüs -03	Metrobüs -04
Araç kütlesi (kg)	45.608	45.608	45.608
Motor Gücü (kW/rpm)	375 / 1600	500 / 2500-8500	750 / 2500-8500
Motor Torku (Nm/rpm)	2.500 / 1100-1200	1.920 / 0-2500	2.880/ 0-2500
1'inci vites şanzıman oranı	3,51		
2'nci vites şanzıman oranı	1,91		
3'üncü vites şanzıman oranı	1,43		
4'üncü vites şanzıman oranı	1,00		
5'inci vites şanzıman oranı	0,74		
6'ncı vites şanzıman oranı	0,65		
Geri vites şanzıman oranı	4,80		
1'inci vites tork konv. oranı	1,62		
2'nci vites tork konv. oranı	1,62		
Eşdeğer dif. oranı	7,137	22,66	22,66
Teker dinamik çapı (m)	0,465	0,465	0,465
Yuv. direnç katsayısı	0,01	0,01	0,01
Araç ön kesit alanı (m^2)	7,80	7,80	7,80
Hava direnç katsayısı	0,55	0,55	0,55

3.6. Metrobüs-02 için GAOS Programından Teorik Sonuçların Elde Edilmesi

Otobüslerin güç aktarma organları için geliştirilen GAOS programına Çizelge 3.2'de verilen Metrobüs-02 (LF25 dizel) aracın Şekil 3.9'da görüldüğü gibi Daimler OM471 Euro VI OBD-E motor verileri, Allison T525R otomatik şanzıman dişli oranları, tork konvektörü verileri ve verimlilik değerleri girilerek özelleştirilmiştir. İlave olarak, gerekli araç bilgileri, Şirinevler - Yenibosna, Merter - Cevizlibağ ve Haramidere - Güzelyurt yol verileri girilerek özelleştirme işlemi tamamlanmıştır. Daha sonra ilgili buton kullanılarak teorik analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. Burada tork konvertörünün şanzıman girişinden önce sağladığı tork artışını görmek mümkündür. Örneğin 800 rpm'de motor torku 2100 Nm iken türbin torku 3685 Nm'dir. Ayrıca motor devri 1700 rpm'e ulaştığında tork konvertörünün kilitlendiğini de görmek mümkündür.



Şekil 3.10. GAOS programının Metrobüs-02 aracı için özelleştirilmiş hali

3.7. Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 Araçları İçin GAOS Programından Teorik Sonuçların Elde Edilmesi

Madde 3.6'de belirtilen yöntemler izlenerek, GAOS programı ve ara yüzü Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçlarına göre özelleştirilip, ZF AxTrax AVE elektrik motorun değerleri ve Çizelge 3.2'de verilen araç bilgileri girildikten sonra Şirinevler-Yenibosna, Merter-Cevizlibağ ve Haramidere-Güzelyurt yolu için analiz sonuçları elde edilmiştir.

3.8. Araçların MATLAB Simulink ile Modellenmesi

MATLAB, Matrix Laboratory (Matris Laboratuvarı) kelimelerinin ilk üç harfi alınıp birleştirilerek oluşturulmuş bir kelimedir ve MathWorks firması tarafından geliştirilen teknik bir programlama dilidir(Arifoğlu, 2016). Simulink ise MATLAB programı üzerinde çalışan araç simülasyon modelleri, dinamik sistem simülasyon modelleri, mühendislik ile ilgili birçok simülasyonlar ve analizler yapılmasını sağlayan grafiksel programlama ortamıdır. Simulink ortamında önceden programlanmış birçok blok vardır ve bu bloklar sayesinde pek çok modelin blok diyagramları kolay bir şekilde yapılması sağlanır (MathWorks, 2024b).

Bu çalışmada MATLAB Simulink modelle programı kullanılarak Metrobüs-02 dizel aracın ve Metrobüs-03 elektrikli aracın simülasyon modelleri hazırlanmıştır. Aşağıda her iki aracın simülasyon modelleri detaylı olarak anlatılmaktadır.

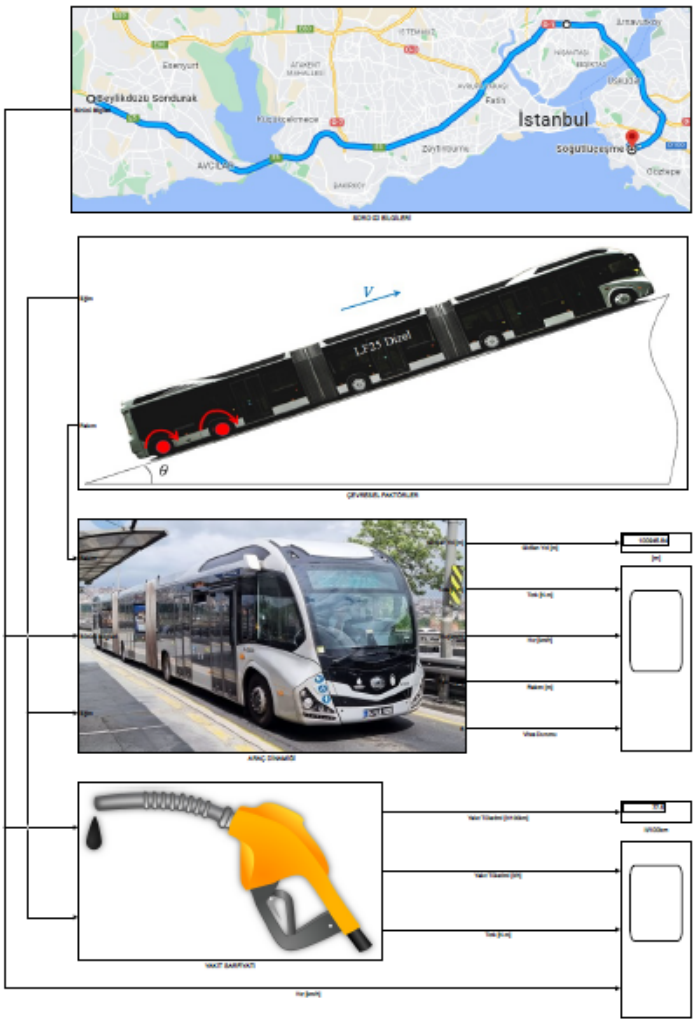
3.8.1 Metrobüs-02 Dizel Aracın MATLAB Simulink ile Modellenmesi

Metrobüs-02 dizel aracın MATLAB Simulink ile modellenmesi Şekil 3.11'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Bu model parametrelerin MATLAB'e tanıtılması, İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi ve yol verileri, araç dinamiği, yakıt sarfiyatı ve verilerin görselleştirilmesi olmak üzere 5 ayrı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

Metrobüs-02 dizel araç parametrelerin MATLAB'e tanıtılması: Metrobüs-02 dizel araç modelinin MATLAB Simulink'te çalışması için, Şekil 3.12'de gösterilen araç ile ilgili parametreler, ortam verileri, tablolar ve haritalar editörde tanımlanıp, çalıştırılarak tüm parametreler MATLAB ortamına tanıtılmıştır.

İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi ve yol verileri: İstanbul Metrobüs Hattında çalışan 132 adet Metrobüs-01 dizel LF25 araca telemetre montajı yapılmıştır. Bu araçların çalışması sürekli telemetreler aracılığı ile takip edilmektedir. Bu telemetrelerden ölçümleri en uygun olan 5 araç seçilmiştir. Bu araçların zamana göre her iki durak

arasındaki mesafe, maksimum hızlar, yaptığı ivmeler ve rakımlar alınarak, bütün duraklar arasındaki çevrim çalışılmıştır. Beylikdüzü'nün rakımı 195m iken Söğütlüçeşme'nin rakımı 2m'dir. Araçlar Beylikdüzü'nden Söğütlüçeşme yönüne hareket ederken ya da tam tersi yönde hareket ederken araçların kinetik ve potansiyel enerjileri farklıdır. Bu neden ile İstanbul Metrobüs Hattının Beylikdüzü – Söğütlüçeşme yönündeki sürüş çevrimi ile Söğütlüçeşme – Beylikdüzü sürüş çevrimi ayrı ayrı çalışılarak sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'teki grafiklerde verilen çevrimler oluşturulmuştur. Daha sonra bu iki grafik birleştirilerek, Şekil 3.15'teki İstanbul Metrobüs Hattı Beylikdüzü – Söğütlüçeşme – Beylikdüzü sürüş çevrimi oluşturulmuştur. Bu grafiklerde; yatay eksen zamanı saniye olarak, dikey sol eksen hızı km/h olarak ve dikey sağ eksen rakımı metre olarak göstermektedir.



Şekil 3.11. Metrobüs-02 dizel aracın MATLAB Simulink modeli

LF25_diesel_parametreleri.m

```
clear
clc

%% vehicle parameters
rw=0.465; % teker yarıçapı (m)
m=32929; % kg
mu=0.01; % sürtünme katsayısı
cd=0.55; % hava direnç katsayısı
A=7.8; %  ön yüzey alanı m2
gs1=3.51; %1. vites transmission oranı
gs2=1.91; %2. vites transmission oranı
gs3=1.43; %3. vites transmission oranı
gs4=1; %4. vites transmission oranı
gs5=0.74; %5. vites transmission oranı
gs6=0.65; %6. vites transmission oranı
nu1=0.85; %1. vites mekanik verim
nu2=0.85; %2. vites mekanik verim
nu3=0.85; %3. vites mekanik verim
nu4=0.87; %4. vites mekanik verim
nu5=0.85; %5. vites mekanik verim
nu6=0.85; %6. vites mekanik verim
n12=1688; %1. vitesten 2. vitese geçiş motor devri
n23=1575; %2. vitesten 3. vitese geçiş motor devri
n34=1686; %3. vitesten 4. vitese geçiş motor devri
n45=1601; %4. vitesten 5. vitese geçiş motor devri
n56=1361; %5. vitesten 6. vitese geçiş motor devri
gd=7.137; %Eşdeğer diferansiyel oranı

%% ambient parameters
ro_air=1.2;
g=9.81;

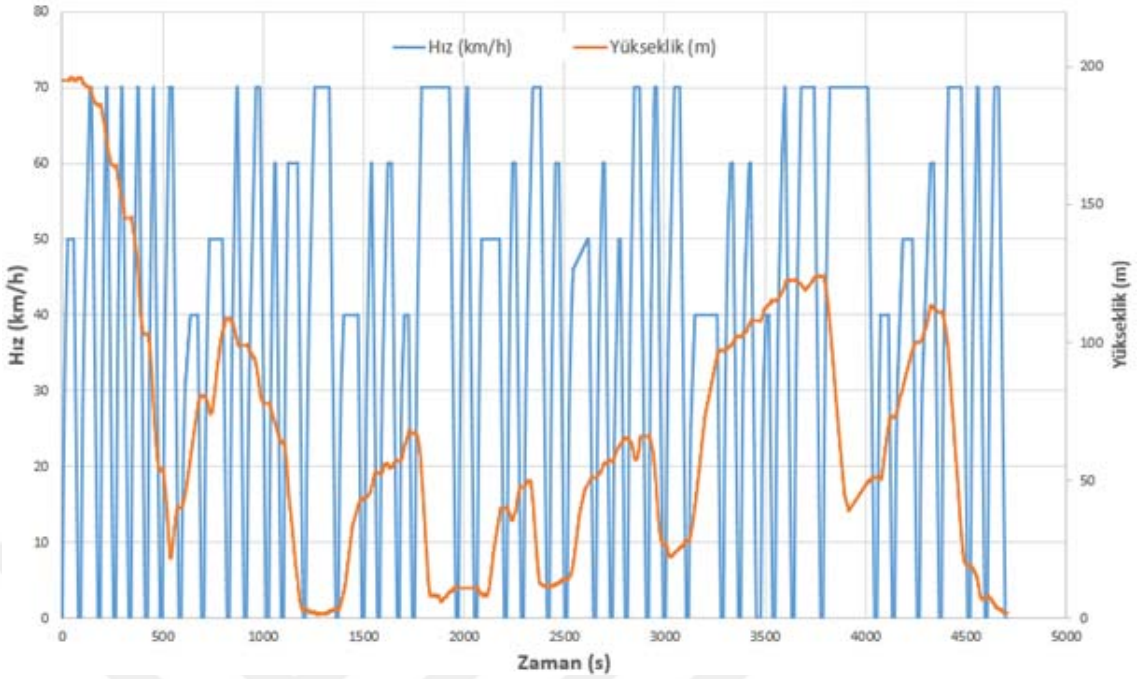
%% maps
rpm_torque_map_lockup.data=xlsread('rpm_tork_lockup.xlsx');
rpm_torque_map_lockup.rpm=rpm_torque_map_lockup.data(:,1);
rpm_torque_map_lockup.torque=rpm_torque_map_lockup.data(:,2);

rpm_power_fc_map.data=xlsread('rpm_power_fc.xlsx');
rpm_power_fc_map.rpm=rpm_power_fc_map.data(2:242,1);
rpm_power_fc_map.power=rpm_power_fc_map.data(1,2:377);
rpm_power_fc_map.fc=rpm_power_fc_map.data(2:242,2:377);
data=rpm_power_fc_map.data;
fc=rpm_power_fc_map.fc;
rpm=rpm_power_fc_map.rpm;
power=rpm_power_fc_map.power;

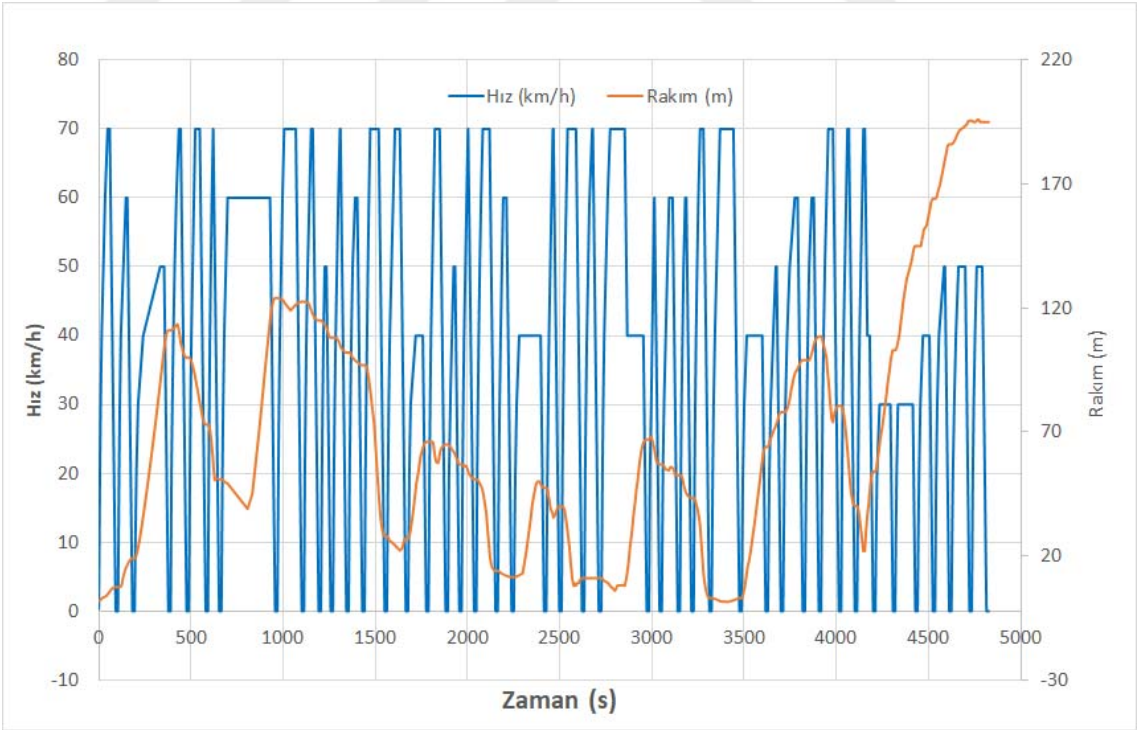
rpm_tc_ratio.data=xlsread('tc_ratio.xlsx');
rpm_tc_ratio.rpm=rpm_tc_ratio.data(:,1);
rpm_tc_ratio.tcratio=rpm_tc_ratio.data(:,2);

```

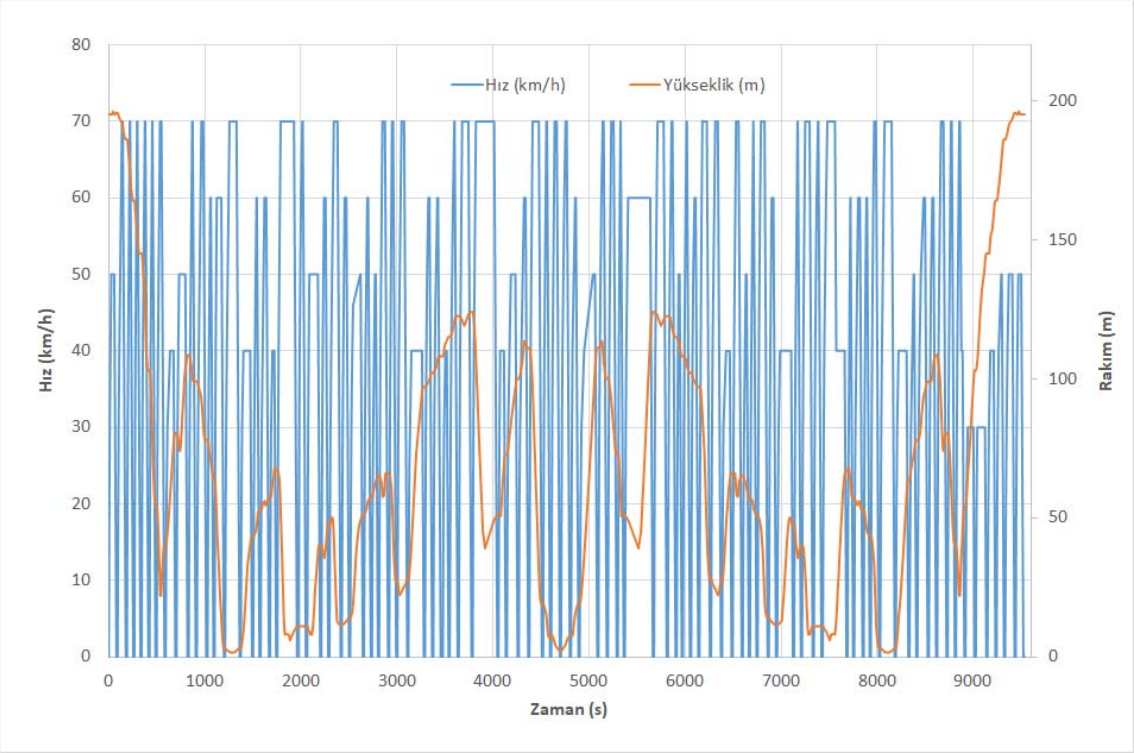
Şekil 3.12. Metrobüs-02 dizel aracın parametreleri



Şekil 3.13. İstanbul Metrobüs Hattı Beylikdüzü – Söğütlüçeşme yönü sürüş çevrimi



Şekil 3.14. İstanbul Metrobüs Hattı Söğütlüçeşme – Beylikdüzü yönü sürüş çevrimi

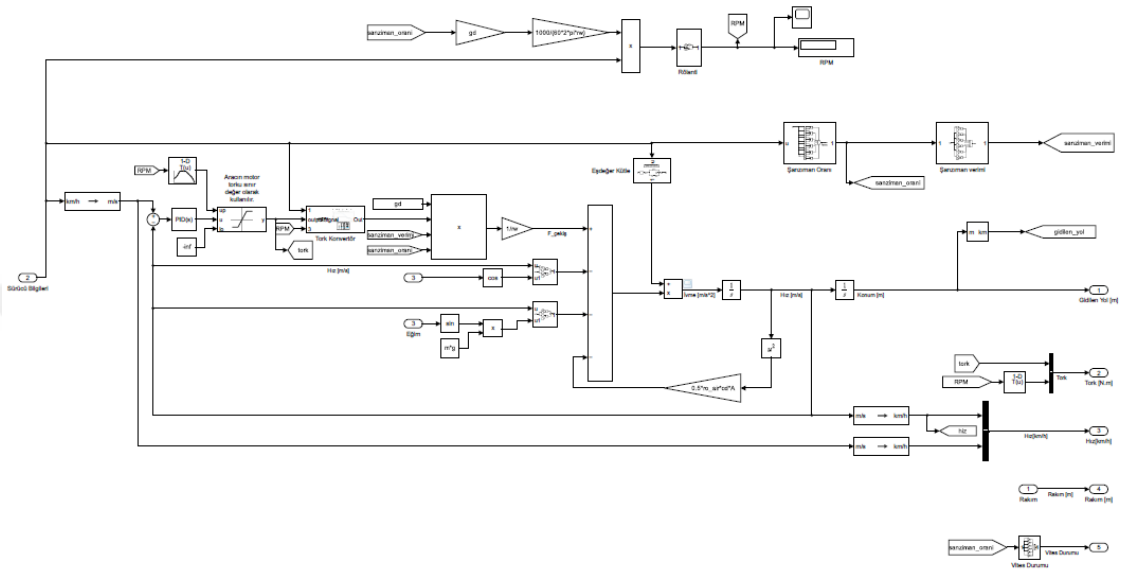


Şekil 3.15. İstanbul Metrobüs Hattı Beylikdüzü – Söğütlüçeşme – Beylikdüzü yönü sürüş çevrimi

Metrobüs-02 dizel araç dinamiği modeli: Metrobüs-02 dizel LF25 aracın, araç dinamiği modeli Şekil 3.16'te verilmektedir. Araç dinamiği alt sistemine İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi km/h olarak girerek m/s hız birimine çevrilir. Hız değerleri PID blokuna girerek zamana bağlı olarak çevrim değerlerine uymaya çalışır. Eğer uyum sağlamıyorsa "tune" alt komutu kullanılarak yakınsama yapmaya çalışılır. Eğer "tune" komutu ile uyum sağlanamıyorsa, araç parametreleri ile çevrim birbirini karşılamıyor demektir. Çevrim parametrelerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Modelde aracın hızına göre motor devri hesaplanır ve devre denk gelen tork lookup tablosundan alınarak "saturation dynamic" komutu ile motorun ürettiği maksimum tork ile sınırlanır. Tork konvertör 1'inci ve 2'nci viteslerle birlikte kullanılmaktadır, diğer viteslerde tork konvertör kullanılmamaktadır. Bu neden ile tork konvertör türbin çıkış torku sadece 1'inci ve 2'nci viteslerde dikkate alınmaktadır. Denklem 3.7'de verilen aracın çekiş kuvvetini elde etmek için tork, şanzıman oranı, eşdeğer diferansiyel oranı, mekanik verim ile çarpılır ve teker dinamik yarıçapına bölünür.

Denklem 3.16'da verilen teker yuvarlanma direnç kuvvetini elde etmek için sürtünme katsayısı, araç kütlesi, yerçekimi ivmesi ve eğim açısının cosünüs'ü ile çarpılır. Denklem 3.13'te verilen yokuş direnç kuvvetini elde etmek için araç kütlesi, yerçekimi ivmesi ve eğim açısının sinüs'ü ile çarpılır. Denklem 3.10'daki hava direnç kuvveti; hava direnç katsayısı, havanın yoğunluğu, araç ön kesit alanı ve araç hızına bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 3.16. Metrobüs-02 dizel LF25 aracın, araç dinamiği modeli

Metrobüs-02 dizel LF25 aracın dinamik modelinde Çizelge 3.2'de araç kütlesi hariç diğer araç verileri kullanılmıştır. Yakıt sarfiyatı hesaplarında araçların metrobüs hattındaki her ay tespit edilen aylık ortama kütlesi olan 32.929 kg kullanılmıştır. Bu kütle Denklem 3.19a'dan faydalanılarak hazırlanan ve Çizelge 3.3'te verilen eşdeğer kütle hesabında da kullanılmıştır.

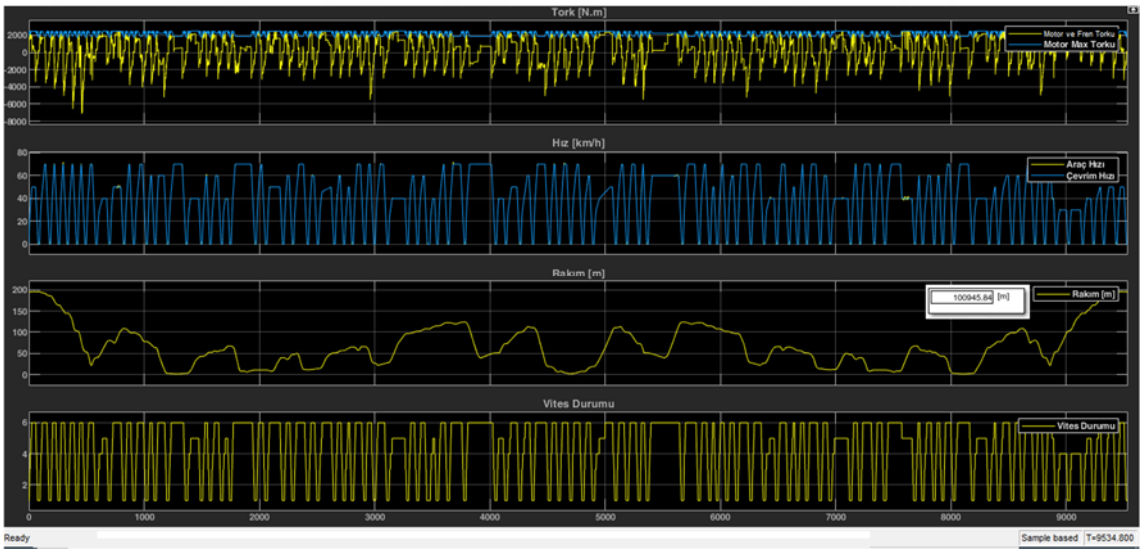
Çizelge 3.3. Metrobüs-02 dizel LF25 aracın eşdeğer kütle tablosu

Kütle (kg) m	Şanzıman Oranı G_T		Eşdeğer Diferansiyel Oranı G_D	Eşdeğer Kütle m_e
32 929	1. vites:	3,51	7,137	117 586
32 929	2. vites:	1,91	7,137	66 181
32 929	3. vites:	1,43	7,137	54 947
32 929	4. vites:	1,00	7,137	46 523
32 929	5. vites:	0,74	7,137	42 182
32 929	6. vites:	0,65	7,137	40 811

Araç dinamiği modelinin çıktıları Şekil 3.17'de gösterilmektedir ve aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Şekil 3.17'de üstten 1'inci sırada araç motorunun sürüş çevrimi boyunca zamana bağlı olarak yapabileceği maksimum tork mavi renk ile, aracın frenleme de dahil ürettiği tüm torklar sarı ile gösterilmektedir.
- Şekil 3.17'de üstten 2'nci sırada aracın sürüş çevrimi mavi renk ile, aracın çevrim boyunca cevrime uyumu sarı renk ile gösterilmiştir. Burada sarı rengin çok az görünmesi aracın çevrime çok iyi uyum sağladığını göstermektedir.
- Şekil 3.17'de üstten 3'üncü sırada aracın sürüş çevrimi boyunca zamana bağlı olarak hareket ettiği rakımı ve sağda üstte beyaz kutu içinde çevrim boyunca kat edilen mesafe gösterilmektedir.
- Şekil 3.17'de üstten 4'üncü sırada çevrim boyunca aracın hangi viteste gittiği gösterilmektedir.

Şekil 3.17'deki grafik detaylı incelendiğinde; hız çevrimine ve rakıma bağlı olarak motorun torku, frenleme torku ve aracın vites durumunun nasıl değiştiği gözlemlenir.



Şekil 3.17. Metrobüs-02 dizel LF25 araç dinamiği modeli çıktıları

Araç yakıt sarfiyatı modeli: Metrobüs-02 dizel LF25 aracın yakıt sarfiyatı modeline geçmeden önce, araçta yakıt sarfiyatı nasıl hesaplanması gerektiği analitik olarak çözümlenmelidir. Fren Özgül Yakıt Sarfiyatı (BSFC) içten yanmalı motorun verimliliğini

yansıtan bir parametredir ve otomotiv uygulamalarında BSFC, içten yanmalı motorların verimliliğini değerlendirmek ve aracın yakıt sarfiyatını hesaplamak için kullanılır (x-engineer, 2024). "Fren" kelimesi, motor parametrelerini ölçmek için bir dinamometrenin (elektrikli fren) kullanılmasından gelmektedir. Bir içten yanmalı motorun enerji üretmesi için yakıt ve hava gerektirir. Motorda kullanılan yakıt miktarı, dinamometre üzerinden kütle akış hızı olarak saniye başına kilogram (kg/s) cinsinden ölçüldüğünde, yakıt kütle akış hızı (kg/s) motor çıkış gücüne (W) bölünerek fren özgül yakıt sarfiyatını Denklem 3.23'te verildiği gibi (kg/J) olarak elde edilir.

$$\mathrm{BSFC} = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \tag{3.23}$$

Genellikle yakıt kütle akış hızı (g/s) cinsinden, motor gücü ise (kW) cinsinden ölçülür ve fren özgül yakıt sarfiyatı (g/kW·h) birimi ile verilir. Bu durumda Denklem 3.23, Denklem 3.24'te verildiği gibi yazılır. Bir araçta tekere iletilen güç aşağıdaki Denklem 3.25'te verilmektedir. Tekerlere iletilen güç, tekerlerde oluşan direnç kuvveti ile aracın hızının çarpımına ve güç aktarma organları veriminin bölümüne eşittir. Tekerlere iletilen direnç kuvveti ise Denklem 3.26'da verilmektedir.

$$\mathrm{BSFC} = 3600\ \frac{\dot{m}_f}{P_e} \tag{3.24}$$

$$P_e = \frac{F_d . V}{\eta} \tag{3.25}$$

$$F_d = mg\ (\mu \cos\theta + \sin\theta) + \frac{1}{2}\rho\ \mathrm{A}\ V^2 + m_e\ a \tag{3.26}$$

Denklem 3.24'ten yakıt debisi çekilip, Denklem 3.25 yerine yazılarak, güç aktarma organları verimi de dikkate alındığında Denklem 3.27 elde edilir.

$$\dot{m}_f = \frac{\mathrm{BSFC}. F_d . V}{3600. \eta} \tag{3.27}$$

Bir aracın birim mesafe başına yakıt sarfiyatı, yakıtın yoğunluğu ve tekerlere iletilen güç dikkate alındığında Denklem 3.28 elde edilir (Naunheimer vd., 2011).

$$YS_{g/km} = \frac{\text{BSFC}.P_e}{3600.\rho_f.V} \tag{3.28}$$

Bir aracın birim uzunluk başına yakıt sarfiyatı, yakıtın yoğunluğu ve tekerlere iletilen direnç kuvvetleri dikkate alındığında Denklem 3.29 elde edilir. Burada aracın aldığı mesafe kilometre olarak alındığı için birim uzunluk km kabul edilmiştir.

$$YS_{g/km} = \frac{\text{BSFC}.F_d}{3600.\rho_f.\eta} \tag{3.29}$$

Denklem 3.29 aracın hızı ile çarpıldığında Denklem 3.30'da aracın yakıt sarfiyatı saatte harcanan yakıt miktarı olarak bulunur.

$$YS_{L/h} = \left[\frac{\text{BSFC}.F_d}{3600.\rho_f.\eta}\right] \text{V} \tag{3.30}$$

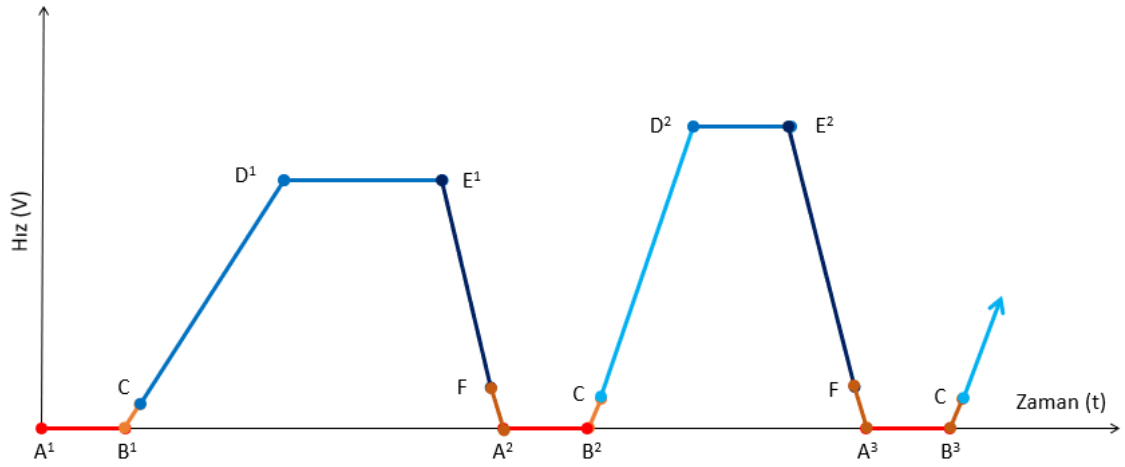
Şehir içinde çalışan bir aracın hareketi Şekil 3.18'de verilmektedir. Bu şekilde hareket eden aracın iki durak arası yakıt sarfiyatı Denklem 3.31'de verilmektedir. Farklı iki durak arasında hareket eden aracın yakıt sarfiyatı Denklem 3.32'de verilmektedir. Bir hat boyunca hareket eden aracın toplam yakıt sarfiyatı Denklem 3.33'te verilmektedir. Denklem 3.33'ünn toplam sembolü kullanılarak yazılmış hali Denklem 3.34 'te gösterilmektedir.

$$YS_{A^1A^2} = YS_{A^1B^1} + YS_{B^1C} + YS_{CD^1} + YS_{D^1E^1} + YS_{E^1F} + YS_{FA^2} \tag{3.31}$$

$$YS_{A^2A^3} = YS_{A^2B^2} + YS_{B^2C} + YS_{CD^2} + YS_{D^2E^2} + YS_{E^2F} + YS_{FA^3} \tag{3.32}$$

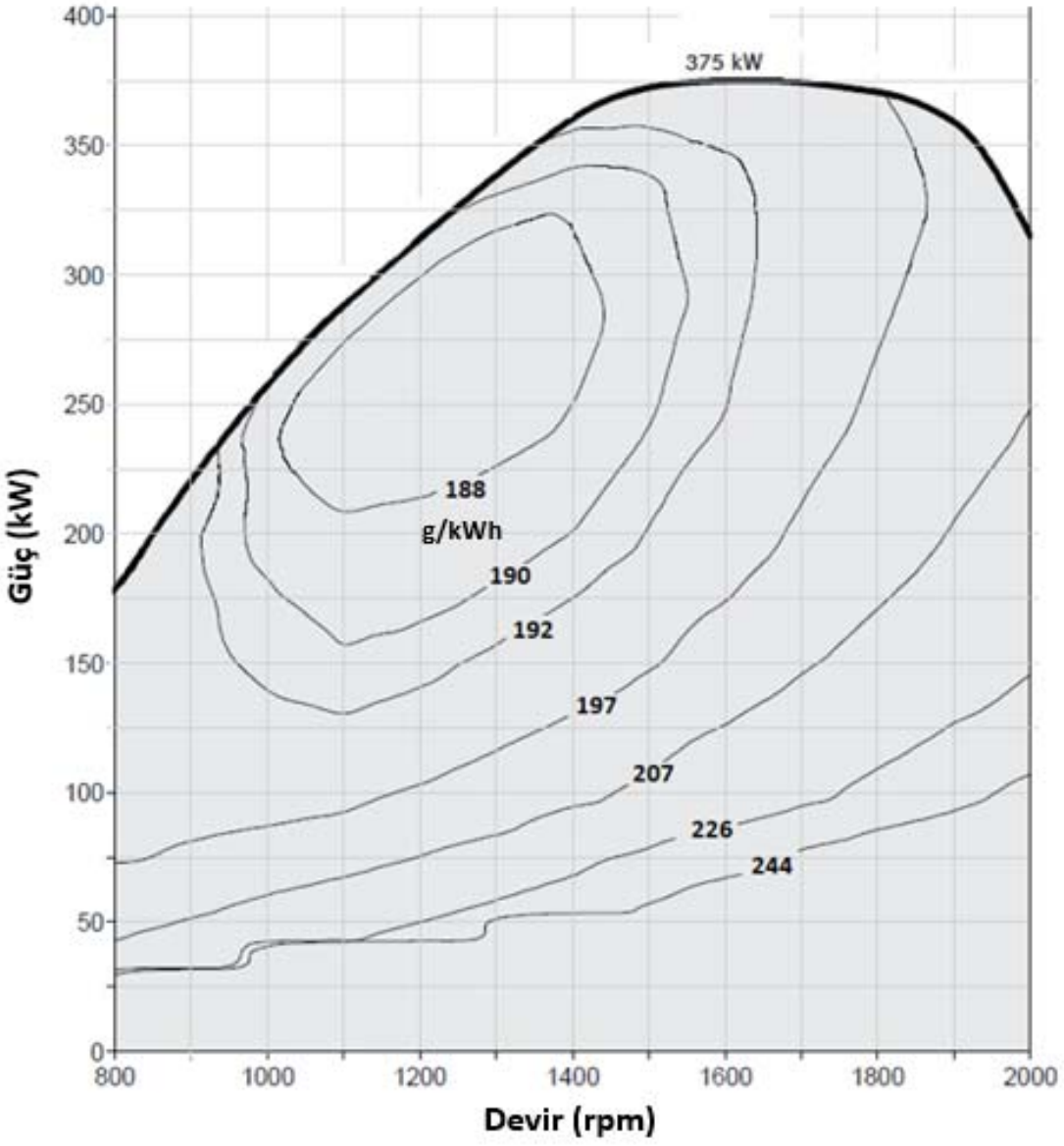
$$YS_{top(L/h)} = YS_{A^1A^2} + YS_{A^2A^3} + YS_{A^3A^4} + \cdots + YS_{A^{(n-1)}A^n} \tag{3.33}$$

$$YS_{top(L/h)} = \sum_{n=1}^{n-1} YS_{A^{(n)}A^{n+1}} \tag{3.34}$$



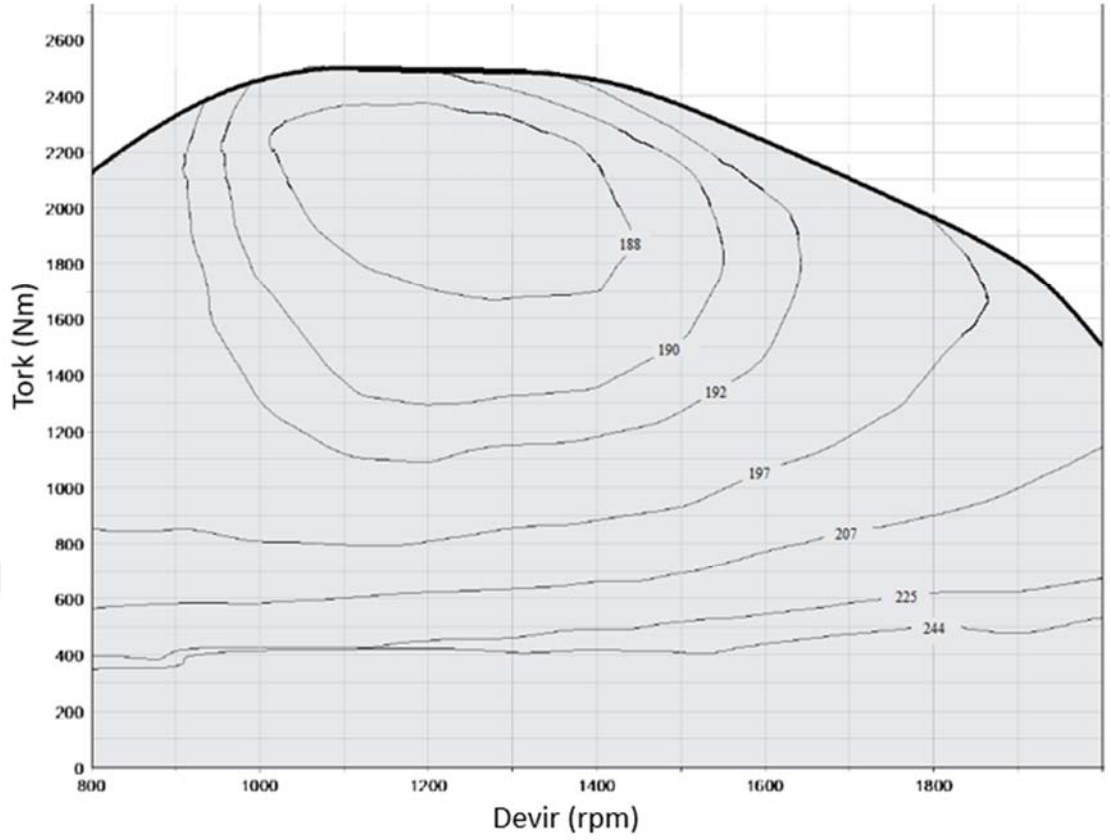
Şekil 3.18. Araç yakıt sarfiyatı incelemesi için hız zaman grafiği

Metrobüs-02 dizel LF25 aracın yakıt sarfiyatı Şekil 3.18'da verilen aracın zamana göre hareketi esnasında nasıl yakıt tükettiği gösterilmektedir. Şekil 3.19'da güce göre ve Şekil 3.20'de torka göre iki boyutlu özgül fren özgül yakıt sarfiyatı haritaları verilmektedir. LF25 aracı duraklarda, yani Şekil 3.18'de kırmızı ile gösterilen A^1 ve B^1 noktaları arasında, aracın motoru rölantide 600 rpm'de çalışarak ortalama 12s beklemektedir. Yapılan ölçümlere göre bu süre boyunca, saatte 6 litre yakıt tüketmektedir. Şekil 3.19 ve Şekil 3.20 fren özgül yakıt sarfiyatı haritasında görüldüğü üzere motor devri 800 rpm'de başlamaktadır. Araç durur halde rölanti devri 600 rpm'den kahve rengi çizgi ile gösterilen B^1 noktasından 800 rpm'deki C noktasındaki 5,6 km/h hıza kadar olan yakıt sarfiyatı saatte 24 litre olarak ölçülmektedir. Aracın 1. viteste harekete geçmesi için bütün güç aktarma organlarındaki statik sürtünme kuvvetlerini yenmesi gerekmektedir. Bu neden ile araç 0'dan 5,6 km/h hıza ulaşana kadar, rölanti çalışmasının 4 katı, yani saatte 24 litre olması makuldür. Şekil 3.18'de C-D^1 ve C-D^2' notaları arasında araç hızlanmaktadır ve yakıt sarfiyatı hesabında Denklem 3.28 ve Denklem 3.29 kullanılmaktadır. Şekil 3.18'de D^1-E^1 ve D^2-E^2 noktaları arasında araç sabit hız ile gitmektedir ve ivme 0'dır. Yakıt sarfiyatı hesabında Denklem 3.28 ve Denklem 3.29 kullanılmaktadır. Denklem 3.29'da kullanılan, Denklem 3.26 içinde geçen ivme sıfırdır. Şekil 3.18'de mavi ile gösterilen E^1-F ve E^2-F noktaları arasında araç yavaşlamaktadır ve yakıt sarfiyatı sıfırdır. Şekil 3.18'de F-A^2 ve F-A^3 noktaları arasında araç yavaşlamaktadır ve 8 km/h hızın altında olmasından dolayı motorun rölanti devrindeki kadar, saatte 6 litre yakıt tüketmektedir.



Şekil 3.19. LF25 motorunun güce göre fren özgül yakıt sarfiyatı haritası

Metrobüs-02 dizel LF25 aracın yakıt sarfiyatı modeli Şekil 3.21'de verilmektedir. Araç yakıt sarfiyatı alt sistemine İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi zamana bağlı hız (km/h) ve yol eğimi radyan olarak girer. Araç yakıt sarfiyatı alt sistemi modellenirken Şekil 3.18'de gösterilen araç hareket konumları göz önünde bulundurularak aşağıda belirtildiği gibi detaylı açıklanmıştır.



Şekil 3.20. LF25 motorunun torka göre fren özgül yakıt sarfiyatı haritası

- Araç A^1-B^1 noktaları arasındadır ve araç durmaktadır. Aracın hızı ve ivmesi sıfırdır. Araç rölantide çalışmaktadır. Araç hareketi ve yakıt sarfiyatı için aşağıdaki şartlar geçerlidir.

  $V = 0, \quad a = 0, \quad YS_{A^1B^1} = 6\ L/h, \quad YS_{top} = (n-1)x6\ l/h$

  Araç yakıt tüketim modeli "(durak sayısı-1) x 6 L/h" kadar yakıt sarfiyatına ilave yapar.

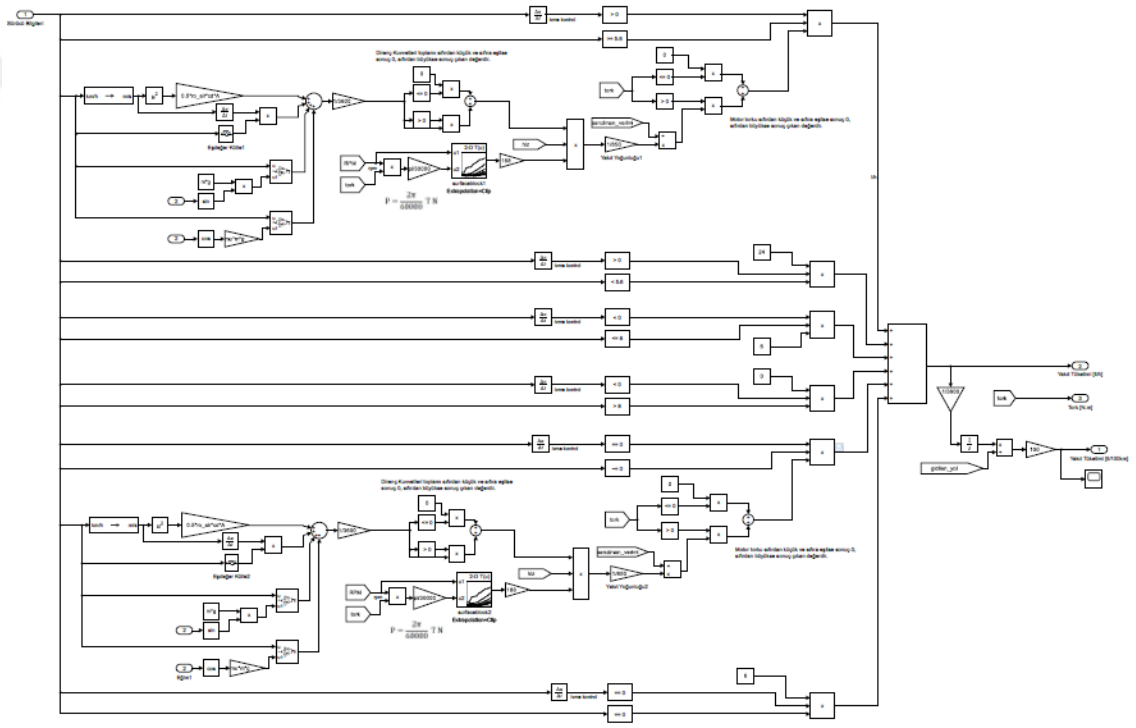
- Araç B^1-C noktaları arasındadır. Araç aracın hızı 0 ile 5,6 km/h arasındadır. Aracın ivmesi sıfırdan büyüktür. Araç hareketi ve yakıt sarfiyatı için aşağıdaki şartlar geçerlidir.

  $0 < V < 5{,}6\,, \quad a > 0, \quad YS_{B^1C} = 24\ L/h, \quad YS_{top} = (n-1)x24\ l/h$

Araç yakıt sarfiyatı modeli “(durak sayısı-1) x 24 L/h” kadar yakıt sarfiyatına ilave yapar.

- Araç C-D[1] noktaları arasındadır. Araç aracın hızı 5,6 km/h’den daha büyüktür. Aracın ivmesi sıfırdan büyüktür. Araç hareketi ve yakıt sarfiyatı için aşağıdaki şartlar geçerlidir.

$V > 5{,}6\,, \quad a > 0, \quad YS_{CD^1} =$ Denklem 3.30 ve 3.26 geçerlidir.



Şekil 3.21. Metrobüs-02 dizel LF25 aracın yakıt sarfiyatı modeli

Şekil 3.22’de verilen Metrobüs-02 dizel LF25 aracın üç boyutlu yakıt sarfiyatı haritasını oluşturabilmek için Şekil 3.19’de verilen iki boyutlu güce göre fren özgül yakıt sarfiyatı haritası “WebPlotDigitizer” programı yarımıyla Excel programına aktarılmıştır (Automeris, 2024). Excel programından da MATLAB ortamına, MATLAB APPS ortamında bulunan “Curve Fitter” komutu kullanılarak Şekil 3.22’de görüldüğü gibi üç boyutlu fren özgül yakıt sarfiyatı haritası oluşturulmuştur (MathWorks, 2024a). Daha sonda “lookup table” komutu kullanılarak fren özgül yakıt sarfiyatı interpolasyon

yapılarak uygun değerlerin hesaplanması sağlanmıştır. Bu çalışmalar yapıldıktan sonra yakıt sarfiyatı modeli oluşturulmuştur. Denklem 3.26'daki direnç kuvvetlerinin toplamı hesaplanmıştır. Aracın hızı 5,6 km/h'den ve direnç kuvvetlerini toplamı sıfırdan büyük ise; bu şart sağlanıyordur ve ivme de sıfırdan büyüktür. Araç dinamiği modelinden çevrim hızına göre motor devri ve motor torku alınarak motor gücü hesaplanır. Bu aşamadan sonra "fren özgül yakıt sarfiyatı", "direnç kuvvetlerini toplamı", "yakıt yoğunluğu" "güç aktarma organı toplam verimi" ve "3600 katsayısı" dikkate alınarak Denklem 3.29'in hesaplaması yapılır.

- Araç D^1-E^1 noktaları arasındadır. Araç sabit hız ile hareket etmektedir. Dolayısı ile aracın ivmesi sıfırdır. Araç hareketi ve yakıt sarfiyatı için aşağıdaki şartlar geçerlidir.

  $V = Sabit\,, \quad a = 0, \quad YS_{D^1E^1} =$ Denklem 3.30 ve 3.26 geçerlidir.

Denklem 3.26'daki direnç kuvvetlerinin toplamı hesaplanmıştır. Burada araç sabit hız ile gittiği için Denklem 3.26'daki ivme sıfırdır. Araç dinamiği modelinden çevrim hızına göre motor devri ve motor torku alınarak motor gücü hesaplanır. Bu aşamadan sonra "fren özgül yakıt sarfiyatı", "direnç kuvvetlerini toplamı", "yakıt yoğunluğu" "güç aktarma organı toplam verimi" ve "3600 katsayısı" dikkate alınarak Denklem 3.29'in hesaplaması yapılır.

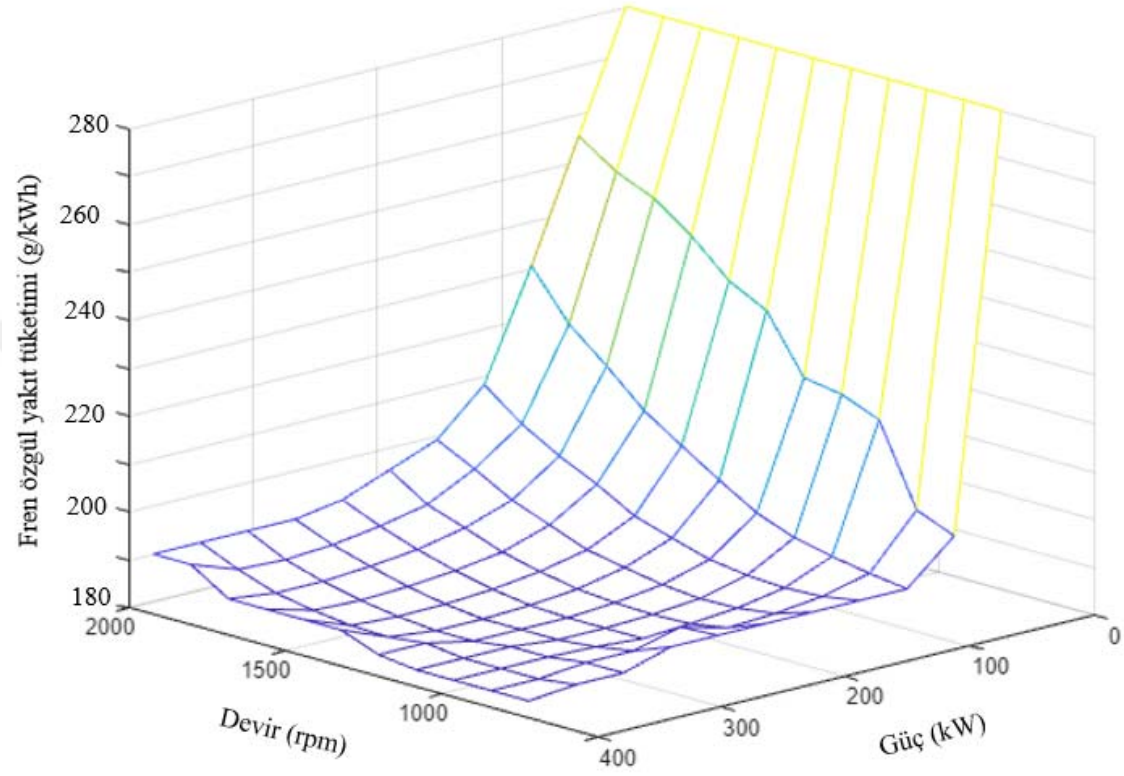
- Araç E^1-F noktaları arasındadır. Araç yavaşlamaktadır. Dolayısı ile aracın ivmesi sıfırdan küçük ve hızı 8 km/h üzerindedir. Araç hareketi ve yakıt sarfiyatı için aşağıdaki şartlar geçerlidir.

  $V > 8\,, \quad a < 0, \quad YS_{E^1F} = 0$

- Araç F- A^2 noktaları arasındadır. Araç yavaşlamaktadır ve duracaktır. Dolayısı ile aracın ivmesi sıfırdan küçük ve hızı 8 km/h'den düşüktür. Bu durumda araç hareketi ve yakıt sarfiyatı için aşağıdaki şartlar geçerlidir.

  $0 < V < 8\,, \quad a < 0, \quad YS_{FA^2} = 6\ L/h, \qquad YS_{top} = (n-1)x6\ l/h$

Araç yakıt sarfiyatı modeli "(durak sayısı-1)x6 L/h" kadar yakıt sarfiyatına ilave yapar.



Şekil 3.22. Üç boyutlu fren özgül yakıt sarfiyatı haritası

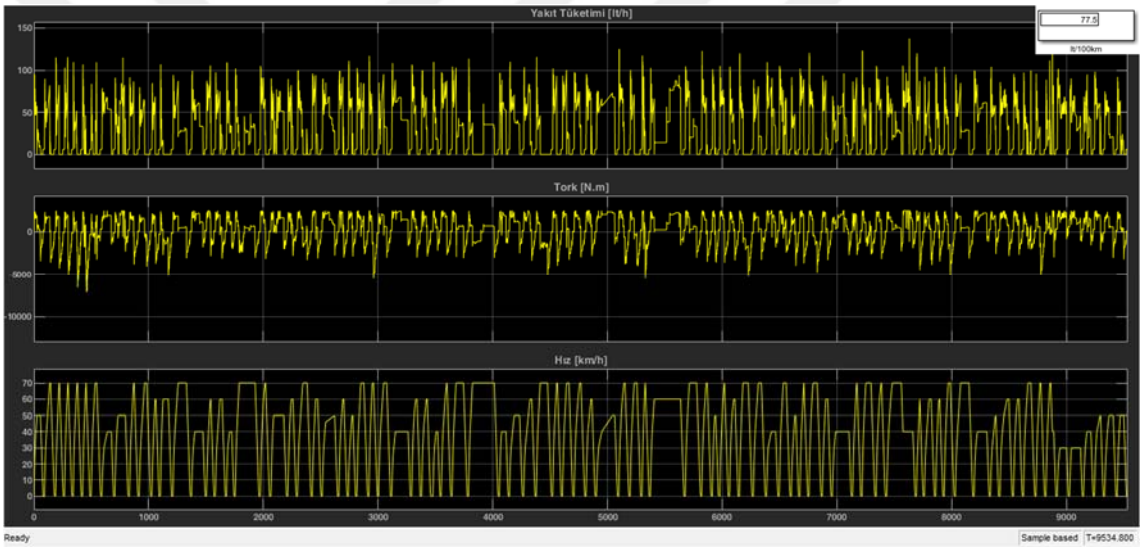
Şekil 3.18'de A^1 noktasındaki bir duraktaki araç B^1, C, D^1 ve E^1 noktalarından geçerek A^2 noktasında başka bir durağa ulaşır. Daha sonra araç A^2, B^2, C, D^2 ve E^2 noktalarından geçerek bir sonraki durağa ulaşır. Bu hareket bütün çevrim boyunca yapılır. Yukarıda belirtilen yöntemler Denklem 3.34'e göre araç yakıt sarfiyatı modelinde uygulanarak toplam yakıt sarfiyatı l/h biriminde bulunur. Bir çevrim boyunca 100 km'deki yakıt sarfiyatına çevirmek için Denklem 3.34 değeri 100 ile çarpılıp, 3600 ve toplam yol değerine bölünerek Denklem 3.35'teki belirtilen değer elde edilir.

$$YS_{L/100km} = \frac{100}{3600.X} \sum_{n=1}^{n-1} YS_{A^{(n)}A^{n+1}} \tag{3.35}$$

Araç yakıt sarfiyatı modelinin çıktıları Şekil 3.23'te gösterilmektedir ve aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Toplam çevrim sonucunda aracın 100 km'deki yakıt sarfiyatı
- Çevrim boyunca aracın bir saatteki yakıt sarfiyatı grafiği
- Araç motorunun sürüş çevrimi boyunca zamana bağlı olarak yaptığı tork grafiği
- Aracın sürüş çevrimi boyunca zamana bağlı olarak yaptığı hız çevrimi grafiği

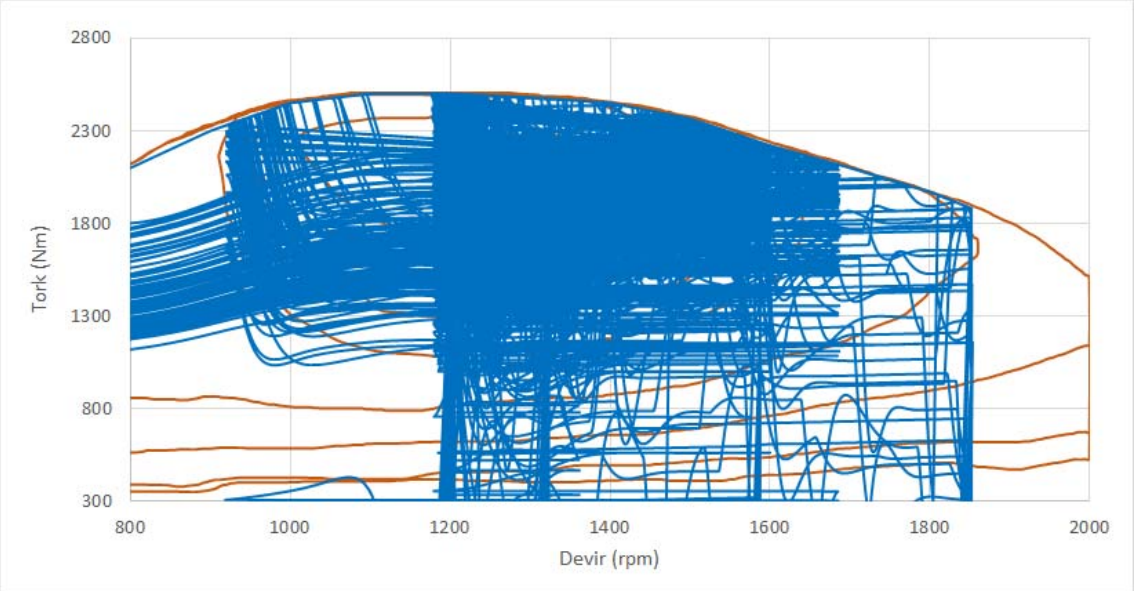
Aşağıda verilen Şekil 3.23'teki grafik detaylı incelendiğinde; hız çevrimine, motor torkuna ve frenleme torkuna bağlı olarak aracın yakıt sarfiyatının nasıl değiştiği gözlemlenir.



Şekil 3.23. Metrobüs-02 dizel LF25 yakıt sarfiyatı modeli çıktıları

L25 dizel araç motor tork özgül yakıt haritası kullanımı: Metrobüs-02 dizel LF25 aracın Şekil 3.20'de verilen torka göre fren özgül yakıt sarfiyatı haritasının İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi boyunca hangi bölgelerini kullandığı Şekil 3.24'te görülmektedir. Araç İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi boyunca 88 durakta durmaktadır. Dolayısı ile araç kalkış anında 800 devir ile 1200 devir arasını sürekli kullanmaktadır. Araç çevrim boyunca 1200 ile 1700 devirleri arasında yoğun olarak çalışmaktadır. Şekil 3.20'de görüleceği üzere motorun en verimli alanı 1000 devir ile 1450 devirleri arasındadır ve araç bu bölgeyi etkin olarak kullanmaktadır. Araç yüksek devirlerde (1450 ile 1700

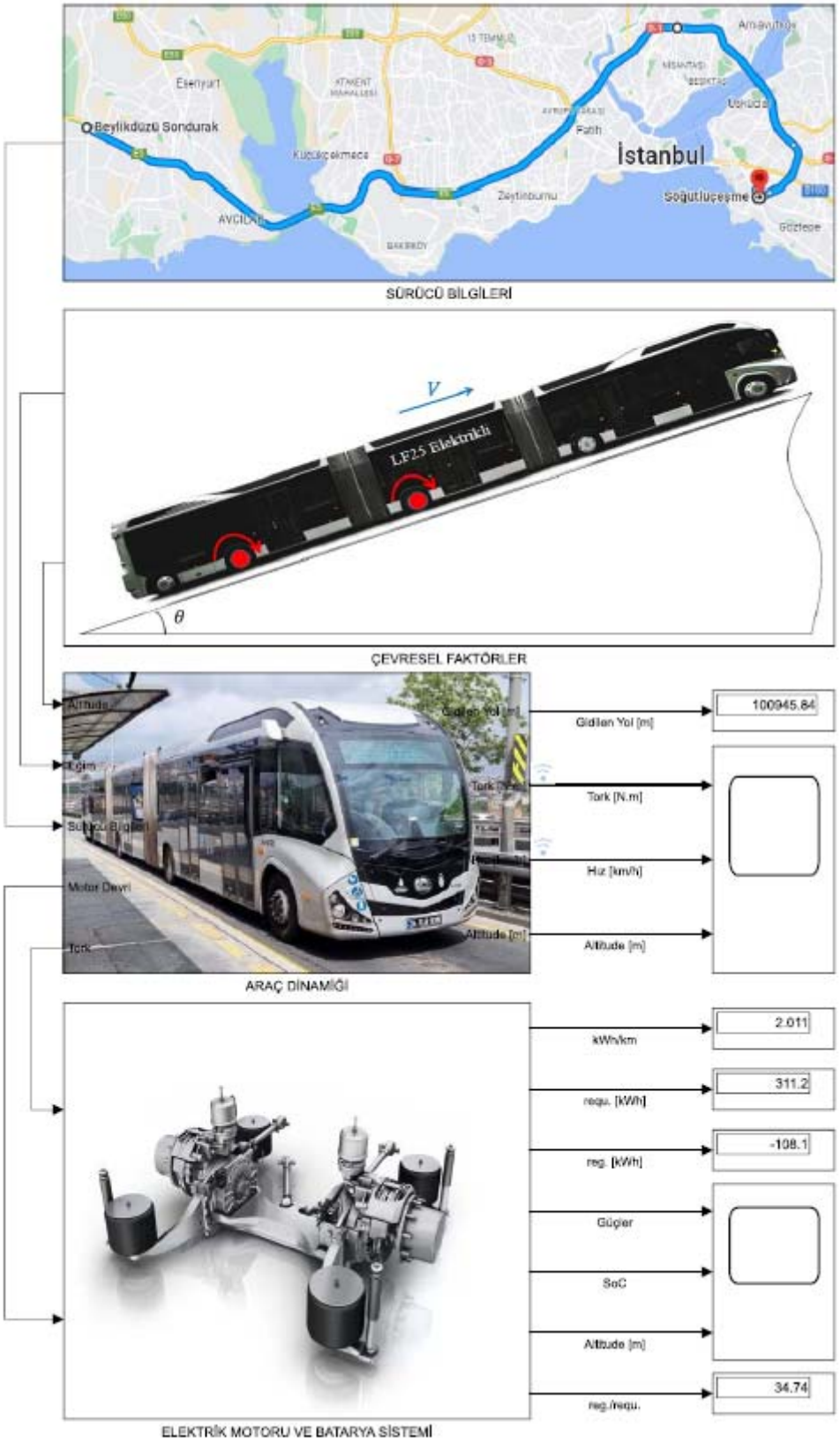
devirleri arasında) düşük oranlı vitesleri (4'üncü, 5'inci ve 6'ncı vitesleri) kullandığı için yakıt tüketimi açısından oldukça verimli bir araçtır.



Şekil 3.24. LF25 araç dizel motorun verim haritası üzerinde çevrim boyunca tork değerleri

3.8.2 Metrobüs-03 Elektrikli Aracın MATLAB Simulink ile Modellenmesi

Metrobüs-03 elektrikli aracın MATLAB Simulink ile modellenmesi Şekil 3.25'te görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Bu model parametrelerin MATLAB'e tanıtılması, İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi ve yol verileri, araç dinamiği, enerji tüketimi ve verilerin görselleştirilmesi olmak üzere 5 ayrı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 3.25. Metrobüs-03 elektrikli aracın MATLAB Simulink modeli

Metrobüs-03 elektrikli araç parametrelerin MATLAB'e tanıtılması: Metrobüs-03 elektrikli araç modelinin MATLAB Simulink'te çalışması için, Şekil 3.26'da gösterilen araç ile ilgili parametreler, ortam verileri, tablolar ve haritalar editörde tanımlanıp, çalıştırılarak tüm parametreler MATLAB ortamına tanıtılmıştır.

Lf25_electric_parameters.m

```
clear;
clc;
%% vehicle parameters
rw=0.465; % teker yarıçapı (m)
m=32929; % kg
Dr=22.66;
Iet=0.156;
Iw=13.849;
me=m+(4*Iet*Dr^2+8*Iw)/rw^2;
f=0.01; % sürtünme katsayısı
cd=0.55; % aerodinamik katsayısı
A=7.8; % m^2

%% ambient parameters
ro_air=1.2; % normal şartlar altındaki hava yoğunluğu
g=9.81; % yer çekimi ivmesi

%% eff_map Driving
d_eff_map.data=xlsread('driving_zfaxtraxave.xlsx');
d_eff_map.rpm=d_eff_map.data(2:58,1);
d_eff_map.tork=d_eff_map.data(1,2:29);
d_eff_map.eff=d_eff_map.data(2:58,2:29);

%% eff_map Rejeneratif
r_eff_map.data=xlsread('regenerative_zfaxtraxave.xlsx');
r_eff_map.rpm=r_eff_map.data(2:58,1);
r_eff_map.tork=r_eff_map.data(1,2:29);
r_eff_map.eff=r_eff_map.data(2:58,2:29);

%% rpm-tork
rpm_torque_map.data=xlsread('rpm-tork.xlsx');
rpm_torque_map.rpm=rpm_torque_map.data(:,1);
rpm_torque_map.torque=rpm_torque_map.data(:,2);

%% rpm-torkregen
rpm_torque_regen_map.data=xlsread('rpm-torkregen.xlsx');
rpm_torque_regen_map.rpm=rpm_torque_regen_map.data(:,1);
rpm_torque_regen_map.torque=rpm_torque_regen_map.data(:,2);

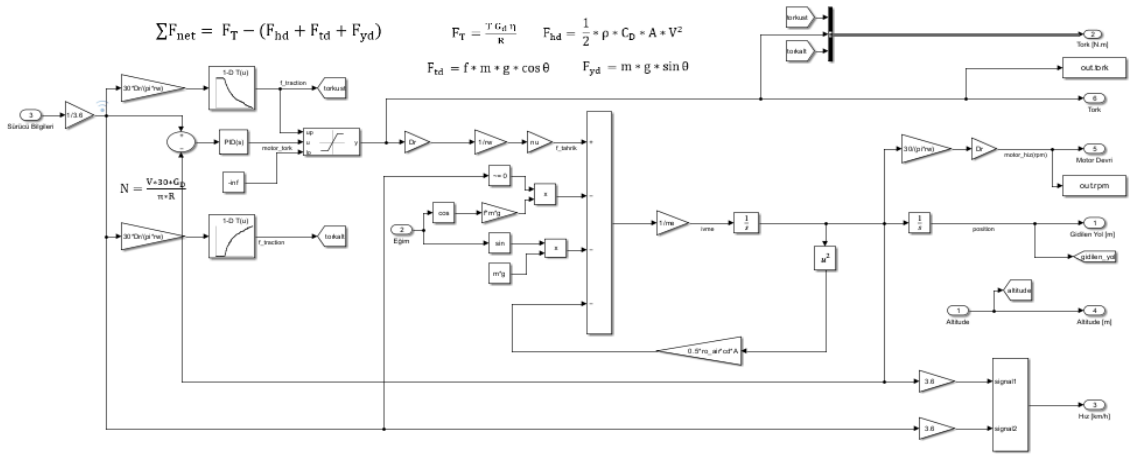
%% batt parameters
v_ocv=718; %v
batt_eff=0.98;
r_int=0.056; % ohm
p_aksesuar=5400; % W
```

Şekil 3.26. Metrobüs-03 elektrikli aracın parametreleri

İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi ve yol verileri: Madde 3.8.1'de verilen Metrobüs-02 dizel araç ile ilgili verilen İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi ve yol verileri elektrikli araç içinde geçerlidir.

Metrobüs-03 elektrikli araç dinamiği modeli: Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın, araç dinamiği modeli Şekil 3.27'de verilmektedir. Araç dinamiği alt sistemine İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi km/h olarak girerek m/s hız birimine çevrilir. Hız değerleri PID blokuna girerek zamana bağlı olarak çevrim değerlerine uymaya çalışır. Eğer uyum sağlamıyorsa "tune" alt komutu kullanılarak yakınsama yapmaya çalışılır. Eğer "tune" komutu ile uyum sağlanamıyorsa, araç parametreleri ile çevrim birbirini karşılamıyor demektir. Çevrim parametrelerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Aracın hızına göre motor devri hesaplanır. Bu devre denk gelen tork lookup tablosundan alınarak "saturation dynamic" komutu ile motorun ürettiği maksimum çekiş torku ve maksimum rejeneratif fren torkları ile sınırlanır.

Denklem 3.17'de verilen aracın çekiş kuvvetini elde etmek için tork, teker dinamik yarıçapına bölünür. Denklem 3.16'da verilen teker yuvarlanma direnç kuvvetini elde etmek için sürtünme katsayısı, araç kütlesi, yerçekimi ivmesi ve eğim açısının cosünüs'ü ile çarpılır. Denklem 3.13'te verilen yokuş direnç kuvvetini elde etmek için araç kütlesi, yerçekimi ivmesi ve eğim açısının sinüs'ü ile çarpılır. Denklem 3.10'daki hava direnç kuvveti; hava direnç katsayısı, havanın yoğunluğu, araç ön kesit alanı ve araç hızına bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 3.27. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın, araç dinamiği modeli

Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın dinamik modelinde Çizelge 3.2'de araç kütlesi hariç diğer araç verileri kullanılmıştır. Yakıt sarfiyatı hesaplarında araçların metrobüs hattındaki her ay tespit edilen aylık yüklü ortama kütlesi olan 32 929 kg kullanılmıştır. Bu kütle Denklem 3.19b'den faydalanılarak hazırlanan ve Çizelge 3.4'te verilen eşdeğer kütle hesabında da kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın eşdeğer kütle tablosu

Kütle (kg)	Elektrik motoru planet dişlileri kütle atalet momentleri ($kg.m^2$)	Eşdeğer Diferansiyel Oranı	Jant ve lastik kütle atalet momentleri ($kg.m^2$)	Teker dinamik yarıçapı (m)	Eşdeğer Kütle (kg)
m	I_{et}	G_D	I_w	R	m_e
32 929	0,156	22,66	13,849	0,465	34 923

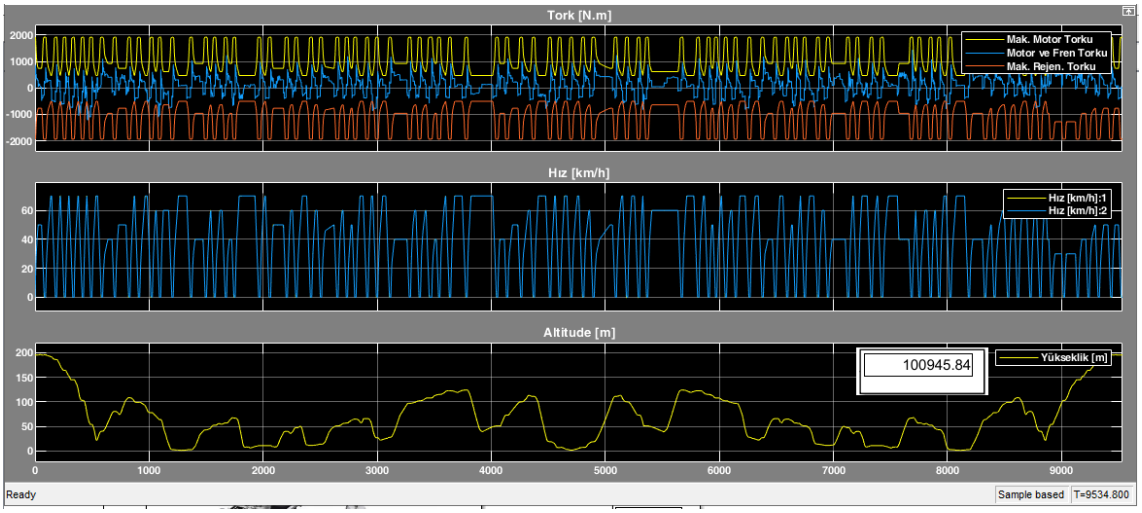
Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç dinamiği modelinin çıktıları Şekil 3.28'de gösterilmektedir ve aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Şekil 3.28'de üstten 1'inci sırada araç motorunun sürüş çevrimi boyunca zamana bağlı olarak motorun yapabileceği maksimum tork sarı renk ile, aracın motor, rejeneratif fren ve servis freni dahil ürettiği torklar mavi ile ve rejeneratif fren ile üretilen tork kırmızı ile gösterilmektedir.

- Şekil 3.28'de üstten 2'nci sırada aracın sürüş çevrimi mavi renk ile, aracın çevrim boyunca çevrime uyumu sarı renk ile gösterilmiştir. Burada sarı rengin görünmemesi aracın çevrime çok iyi uyum sağladığını göstermektedir.

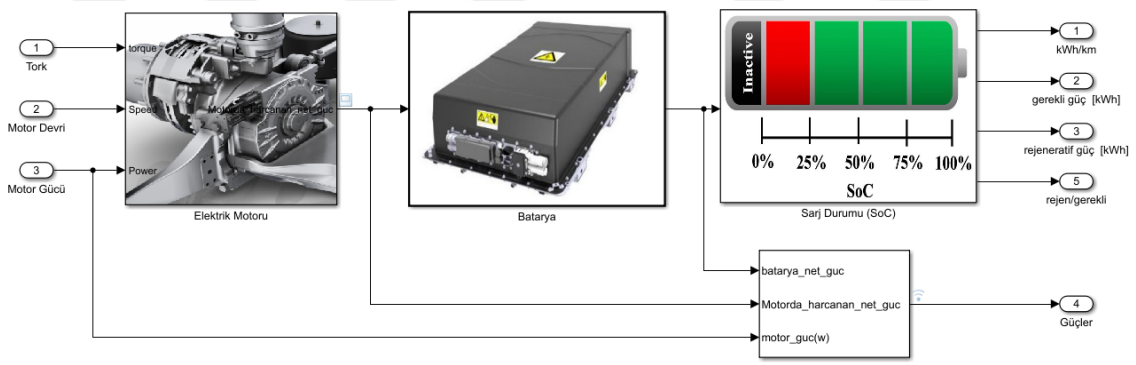
- Şekil 3.28'de üstten 3'üncü sırada aracın sürüş çevrimi boyunca zamana bağlı olarak hareket ettiği rakımı ve sağda üstte beyaz kutu içinde çevrim boyunca kat edilen mesafe gösterilmektedir.

Şekil 3.28'deki grafik detaylı incelendiğinde; hız çevrimine ve rakıma bağlı olarak motorun torku ve frenleme torkunun nasıl değiştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.28. Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç dinamiği modeli çıktıları

Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor, batarya ve şarj durumu (SoC) modeli: Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın Şekil 3.29'da motor, batarya ve şarj durumu (SoC) modeli verilmektedir. Bu modelde elektrik motoru, batarya ve şarj durumu (SoC) alt modellere ayrılmıştır. Bu alt modeller aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.



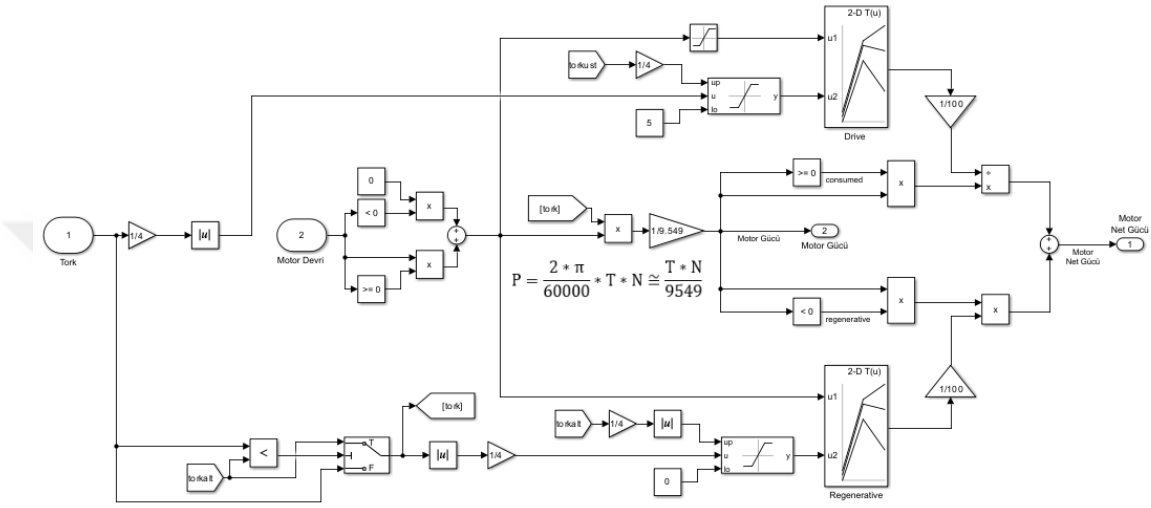
Şekil 3.29. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor, batarya ve şarj durumu modeli

Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç motor modeli: Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor modeli Şekil 3.30'da verilmektedir. Motor torku, devir hızı ve gücü araç dinamiği modelinden alınmaktadır. Elektrik motorunun aracı hareket ettirmesi için gerekli güç Denklem 3.36'de verilmektedir. Aracın frenlenmesi esnasında üretilen elektrik rejeneratif güç Denklem 3.37 ile hesaplanmaktadır. Araç motorunun harcadığı net güç ise; Denklem 3.38 ile bulunmaktadır.

$$P_{emgg} = \frac{1}{\eta e} P_{emmg} \tag{3.36}$$

$$P_{emrg} = \eta e P_{emmg} \tag{3.37}$$

$$P_{emng} = P_{emgg} + P_{emrg} \tag{3.38}$$



Şekil 3.30. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor modeli

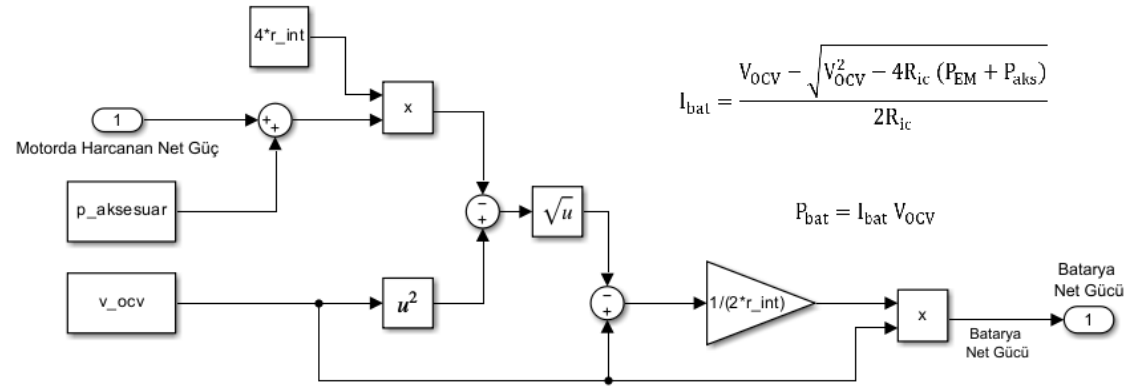
Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç batarya modeli: Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın batarya modeli Şekil 3.31'da verilmektedir. Motor tarafından harcanan net güç, motor modelinden alınmaktadır. Modelde Denklem 3.39 kullanılarak, motor tarafından harcanan net güce, araç aksesuar gücü eklenerek araç toplam elektrik gücü bulunmaktadır. Modelde açık devre voltajı, batarya iç direnci ve araç toplam elektrik gücü kullanılarak Denklem 3.40 kullanılarak batarya akımı bulunmaktadır (Larminie & Lowry, 2012).

$$P_{atg} = P_{emng} + P_{aks} \tag{3.39}$$

$$I_{bat} = \frac{V_{adv} - \sqrt{V_{adv}^2 - 4R_{bid}P_{atg}}}{2R_{bid}} \tag{3.40}$$

Model ile araçta kullanılan bataryanın gücü Denklem 3.41'de belirtildiği gibi batarya akımı ile batarya açık devre voltajı çarpımı ile elde edilir.

$$P_{bat} = I_{bat}\ V_{adv} \tag{3.41}$$



Şekil 3.31. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın batarya modeli

Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç şarj durumu (SoC) modeli: Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın şarj durumu (SoC) modeli Şekil 3.32'da verilmektedir. Batarya tarafından harcanan net güç, batarya modelinden alınmaktadır. Bataryadan güç çekilirken Denklem 3.42'de belirtilen batarya akımı ve açık devre voltajı çarpılıp, batarya verimine bölünerek batarya gerekli gücü bulunur. Bataryaya rejeneratif frenlemeden dolayı güç verilirken Denklem 3.43'te gösterilen batarya akımı, açık devre voltajı ve batarya verimi çarpılarak bataryaya ilave olan rejeneratif güç bulunur.

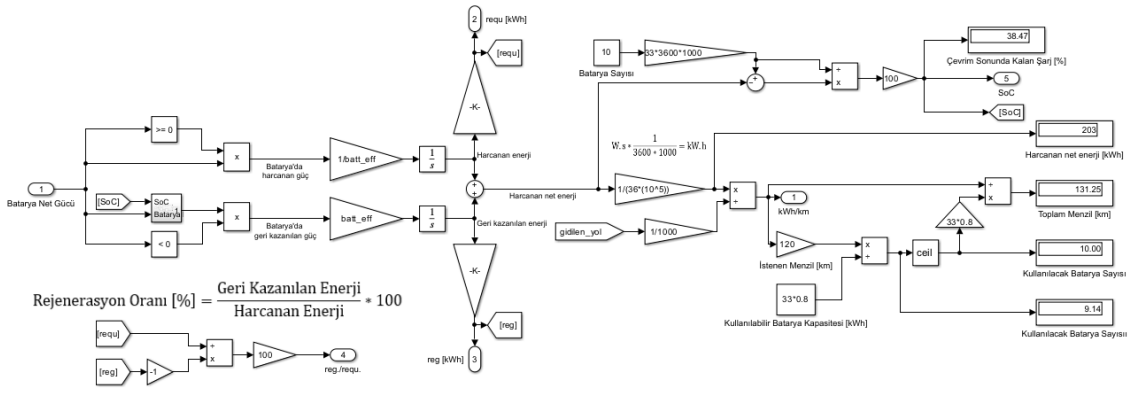
$$P_{bgg} = \frac{1}{\eta b} I_{bat}\ V_{adv} \tag{3.42}$$

$$P_{brg} = \eta b\ I_{bat}\ V_{adv} \tag{3.43}$$

Bataryadan çekilen enerji Denklem 3.44'te gösterildiği gibi bataryadan çekilen güç zamana göre integrali alındığında bulunur. Bataryaya rejeneratif frenlemeden gelen enerji Denklem 3.45'te gösterildiği gibi bataryaya rejeneratif frenlemeden gelen güç zamana göre integrali alındığında bulunur.

$$E_{bge} = \int_0^t P_{bgg} \tag{3.44}$$

$$E_{bre} = \int_0^t P_{brg} \tag{3.45}$$



Şekil 3.32. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın şarj durumu (SoC) modeli

Bataryadan çekilen enerji ve batarya rejeneratif enerjisi Denklem 3.46'da gösterildiği gibi toplanarak batarya net enerjisi elde edilir.

$$E_{bne} = E_{bge} + E_{bre} \tag{3.46}$$

Batarya Şarj Durumu (BŞD, State of Charge, SoC) Denklem 3.47'de görüldüğü gibi; batarya kapasitesinden batarya net enerjisi çıkartılıp yüz ile çarpılıp, batarya kapasitesine bölünerek bulunur.

$$BŞD\ (SoC) = \frac{(B_k - \mathrm{E_{bne}})\ 100}{B_k} \tag{3.47}$$

Aracın kilometre başına enerji tüketimi Denklem 3.48'de görüldüğü gibi; batarya net enerjisi kat edilen yola bölündüğünde elde edilir.

$$ET_{/km} = \frac{E_{bne}}{X} \tag{3.48}$$

Aracın yüz kilometre enerji tüketimi Denklem 3.49'de görüldüğü gibi; batarya net enerjisi yüz ile çarpılarak kat edilen yola bölündüğünde elde edilir.

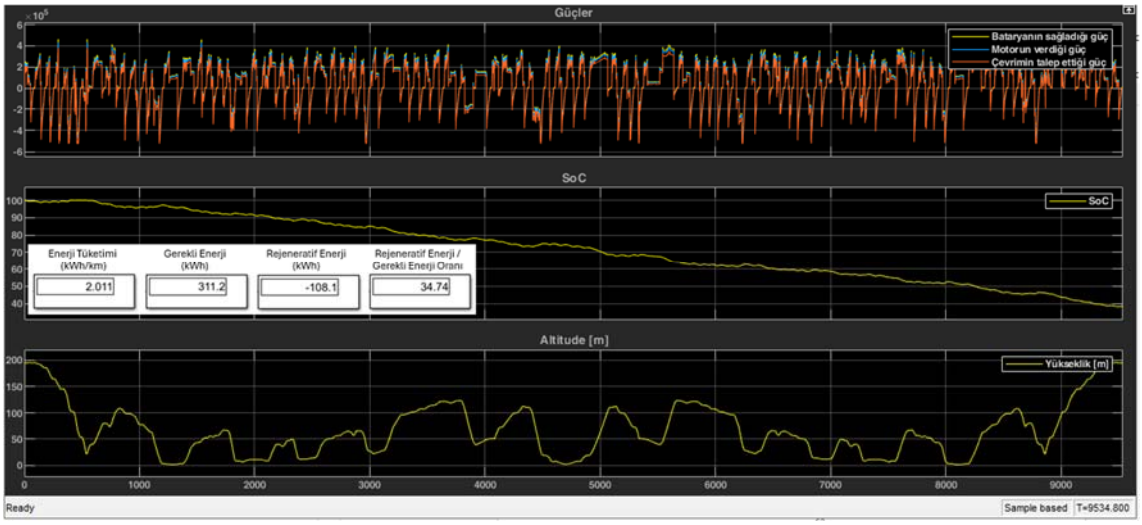
$$ET_{/100km} = \frac{E_{bne}\ 100}{X} \tag{3.49}$$

Metrobüs-03 elektrikli LF25 araç şarj durumu (SoC) modeli modelinin çıktıları Şekil 3.33'te gösterilmektedir ve aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Şekil 3.33'ün üst kısmında İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi boyunca gerekli olan güç kırmızı, motor tarafından harcanan güç mavi ve bataryadan çekilen güç ise sarı ile gösterilmiştir.

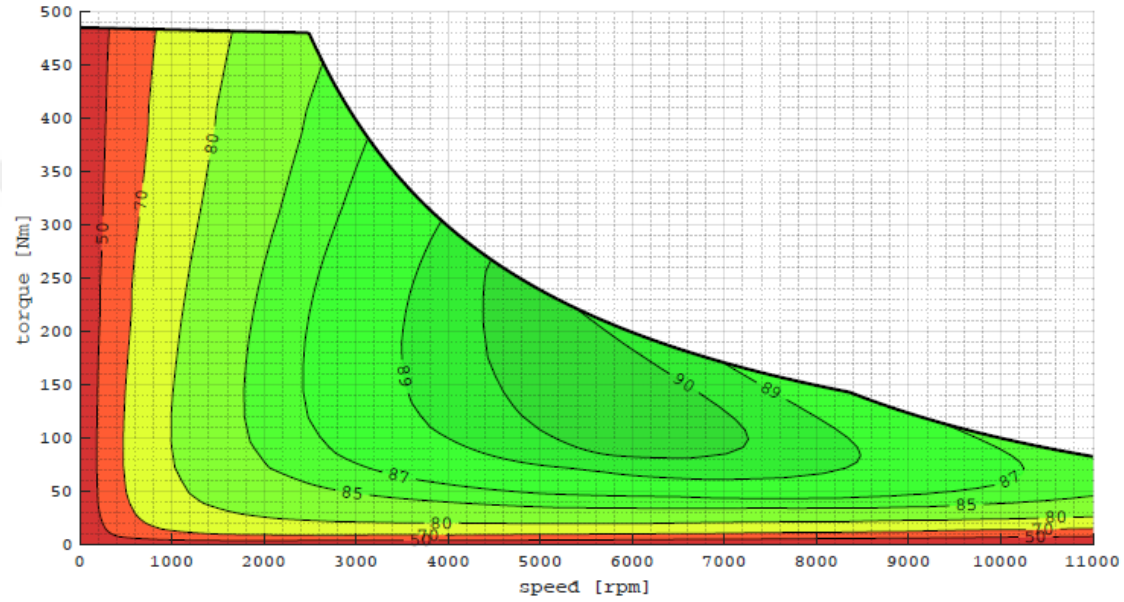
- Şekil 3.33'ün orta kısmında İstanbul Metrobüs Hattı yol çevrimi boyunca batarya şarj durumu (SoC) nasıl değiştiği gösterilmektedir. Ayrıca, orta kısımda soldan birinci kutucukta çevrime göre aracın bir km'deki enerji tüketimi, ikinci kutucukta çevrim için gerekli enerji miktarı, üçüncü kutucukta çevrim boyunca rejeneratif enerji miktarı ve dördüncü kutucukta çevrim boyunca kazanılan enerji miktarının, gerekli olan enerjiye oranı verilmektedir.

- Şekil 3.33'ün alt kısmında İstanbul Metrobüs Hattı çevriminin yola göre yüksekliği gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın motor, batarya ve şarj durumu (SoC) modeli çıktıları

L25 elektrikli araç motor verim haritasın kullanımı: Metrobüs-03 elektrikli LF25 aracın 3'üncü ve 4'üncü aksında kullanılan ZF AxTrax AVE portal aksının elektrik motoru verim haritası Şekil 3.34'te verilmektedir. Motorun en verimli bölgesinde devir 4400 – 7200 rpm arasında iken tork 80 – 270 Nm aralığındadır. Motorun bu bölgede verimi %90'ın üzerindedir. Diğer bölgelerin verimi bu bölgeyi merkez alarak düşmektedir.



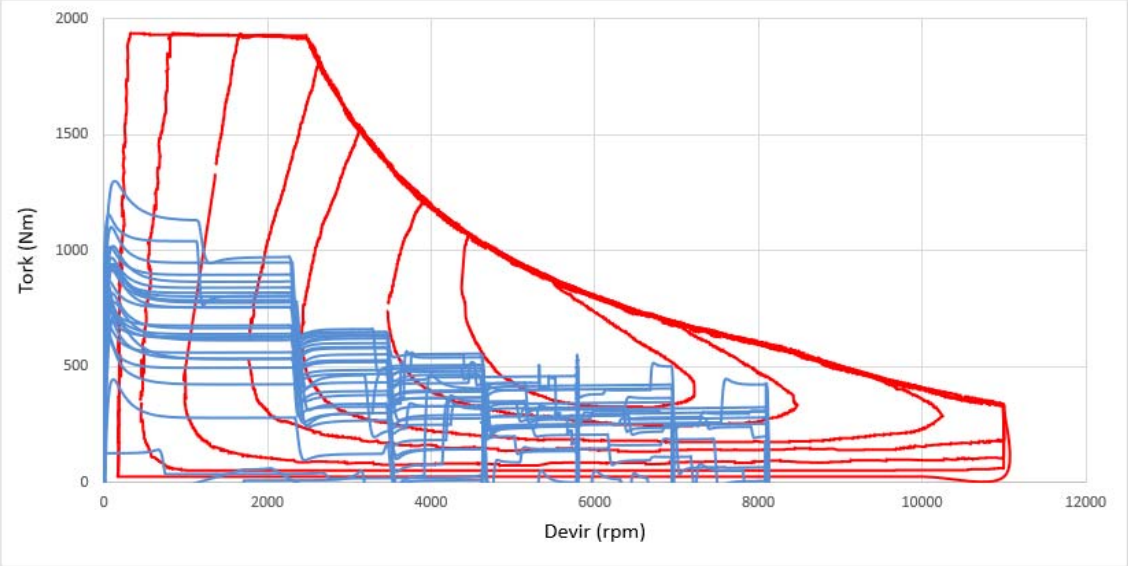
Şekil 3.34. LF25 elektrikli aracın ZF AxTrax AVE portal aksının elektrik motorun verim haritası

ZF AxTrax AVE portal aksın orijinal eşdeğer diferansiyel onarını 22,66'dır ve bu durumda araç maksimum 85 km/h hız yapabilmektedir. Eşdeğer diferansiyel oranın araç enerji tüketiminde ve verim haritasında etkisini görmek amacı ile araç maksimum 75 km/h ve 95 km/h hareket ederken Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi eşdeğer diferansiyel oranları hesaplanmıştır.

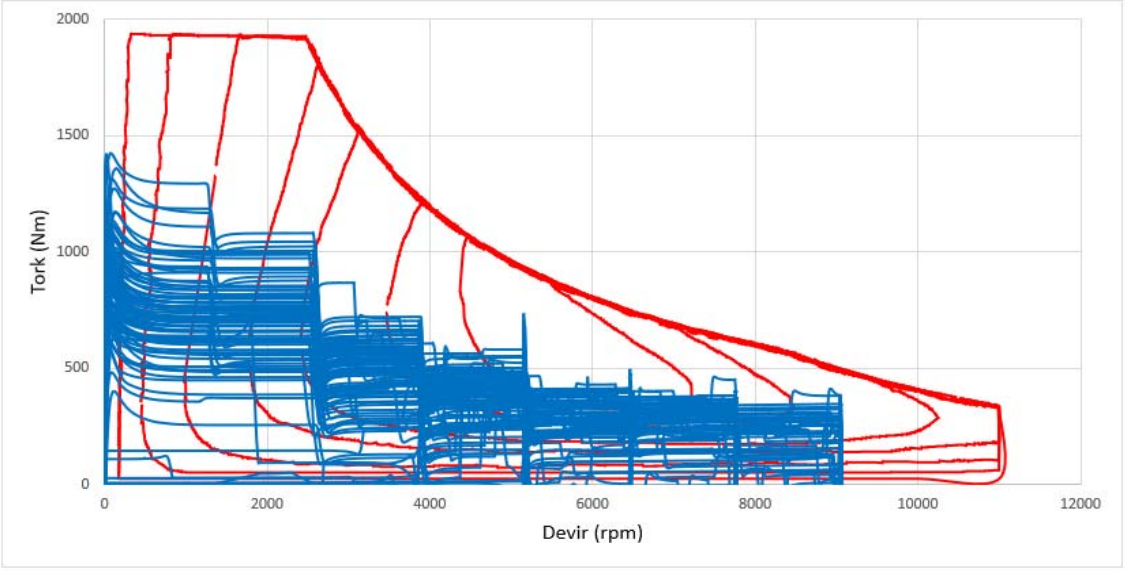
Çizelge 3.5. Metrobüs-03 elektrikli araç maksimum hıza göre eşdeğer diferansiyel oranları

$V_{mak.}$ (75 km/h)	$V_{mak.}$ (85 km/h)	$V_{mak.}$ (95 km/h)
25,71	22,66	20,28

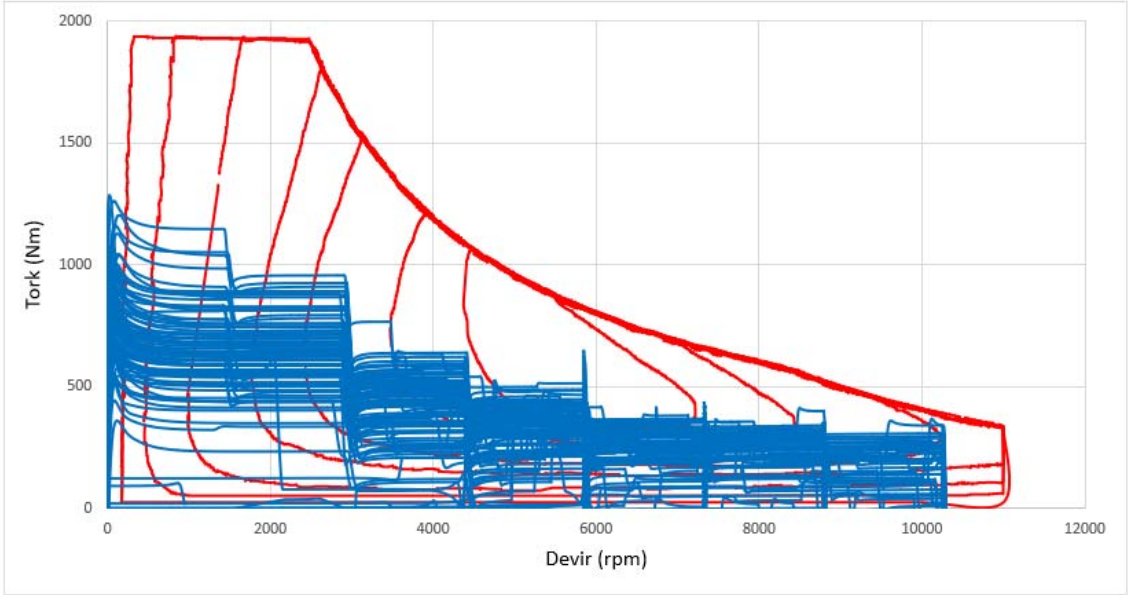
Çizelge 3.3'te verilen Metrobüs-03 elektrikli araç maksimum hıza göre eşdeğer diferansiyel oranlarına göre Şekil 3.35, Şekil 3.36 ve Şekil 3.37 hazırlanmıştır. Şekil 3.35'te eşdeğer diferansiyel oranı büyük olmasından dolayı çizgiler birbirinin üzerine gelerek Şekil 3.36 ve Şekil 3.37'den daha az yoğun olarak gözükmektedir. Her üç grafiğinde enerji tüketimleri bulgular ve tartışma kısmında verilmektedir.



Şekil 3.35. Metrobüs-03 elektrikli aracın maksimum hızı 75 km/h, eşdeğer diferansiyel oranı 25,71 iken İstanbul Metrobüs Hattında devre göre tork değerleri



Şekil 3.36. Metrobüs-03 elektrikli aracın maksimum hızı 85 km/h, eşdeğer diferansiyel oranı 22,66 iken İstanbul Metrobüs Hattında devre göre tork değerleri



Şekil 3.37. Metrobüs-03 elektrikli aracın maksimum hızı 95 km/h, eşdeğer diferansiyel oranı 20,28 iken İstanbul Metrobüs Hattında devre göre tork değerleri

Metrobüs-03 elektrikli araç MATLAB Simulink modelinin doğrulanması: Araçların yakıt ve enerji tüketimi üretici firmalar için kritik satış argümanı olduğu için direkt vermemektedirler. Verdiklerinde de idealize edilmiş şartlarda vermektedirler ve müşteri tarafından bu değerler yakalanamamaktadır. Bu neden ile yakıt, enerji tüketimi ve menzil çalışmalarında Uluslararası Toplu Taşıma Kuruluşu`nun (UITP) SORT (Standardised On-Road Test Cycles) yakıt ve enerji tüketim ölçüm standardı dikkate alınmaktadır. UITP'nin 2014 yılı yayınında, 12 m dizel araçlar için simülasyona göre hesaplanmış SORT 1, SORT 2 ve SORT 3 çevrimlerine göre yakıt sarfiyatı değerleri vardır (UITP, 2014). Ancak UITP'nin 2017 yılı yayınında 12 m elektrikli araçlar için yayında SORT 1, SORT 2 ve SORT 3 çevrimlerine göre enerji tüketim değerleri yoktur (UITP, 2017).

Hollanda Altyapı ve Çevre Bakanlığı, 2012 yılında Hollanda Uygulamalı Bilimsel Araştırma Örgütünden (TNO'dan) tam elektrikli 12 m bir otobüsün enerji tüketimi ve menzili ile ilgili pratik deneyim toplamasını istemiştir (Van Goethem vd., 2013). TNO firması 2012 yılının 24 ve 25 Kasım günlerinde SORT 1, SORT 2 ve SORT 3 testlerini Lelystad şehrinde RDW TCL test pistinde yaparak Çizelge 3.4'te verilen test sonuçlarını almıştır. UITP'nin elektrikli araçlar için tanımladığı SORT 1, SORT 2 ve SORT 3 çevrim şartlarına göre MATLAB Simulink'te yapılan simülasyon sonuçları da Çizelge 3.4'de

verilmektedir. SORT 1 test ve simülasyon değerleri birbirine çok yakındır. Fakat SORT 2 ve SORT 3 test ve simülasyon değerleri birbirlerinden bir miktar uzaktır. TNO firmasının raporunun "Analiz ve Tartışma" kısmında dizel araçların SORT 1' test sonucunun en fazla, daha sonra SORT 2 test sonucunun geldiğini ve en az SORT 3 test sonucunun olduğu belirtilmiştir. MATLAB Simulink'te yapılan simülasyon sonuçları da bu tezi doğrulamaktadır. Raporun Analiz ve Tartışma kısmında test sonuçların neden SORT 2'de ve SORT 3'te beklenenden farklı olduğu anlatılmaktadır.

Çizelge 3.6. TNO firması 12 m elektrikli araç SORT testleri sonuçları ile 12 m elektrikli araç simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Karşılaştırma Konuları	SORT 1 (kWh/km)	SORT 2 (kWh/km)	SORT 3 (kWh/km)
TNO Test Sonuçları	1,15	1,14	1,15
Simülasyon Sonuçları	1,14	1,05	1,01

Otokar firmasının elektrikli araç SORT testi rejeneratif fren yüzdesel sonucu ile 12 m elektrikli araç rejeneratif fren simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 3.5'te verilmektedir (Aydin & Oğuz, 2020). Her iki aracın SORT 1 test sonucu ve simülasyon sonucu karşılaştırıldığında %2,30 oranında fark olduğu görülür. Bu da yapılan simülasyonun doğruluğunu teyit etmektedir. Ayrıca simülasyon sonucu elde edilen SORT 2 ve SORT 3 değerleri de Çizelge 3.5'te verilmektedir.

Çizelge 3.7. Otokar firması elektrikli araç SORT testi rejeneratif fren sonuçları ile 12 m elektrikli araç rejeneratif fren simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Karşılaştırma Konuları	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Otokar Elektrikli Araç Rejeneratif Fren Oranı	%40,00	---	---
Simülasyon 12 m Elektrikli Araç Rejeneratif Fren Oranı	%36,70	%36,06	%35,91

Yukarıda belirtildiği gibi 12 m elektrikli araç için doğrulanan simülasyon modeli LF25 elektrikli aracın modeline dönüştürülerek simülasyon sonuçları alınmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada İstanbul Metrobüs Hattının incelenmesi yapılarak hattın düz, hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli ve hattın maksimum eğimli yol kesimleri tespit edilmiştir. İstanbul Metrobüs Hattına uygun olabilecek elektrikli araç için uygun olabilecek güç aktarma organları belirlenerek teorik araçlar oluşturulmuştur. Metrobüs-01 ile hattın düz, hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli ve hattın maksimum eğimli yol kesimlerinde testler yapılmıştır. Metrobüs-02, Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 teorik araçları için GAOS programı özelleştirilerek, teorik sonuçlar elde edilmiştir.

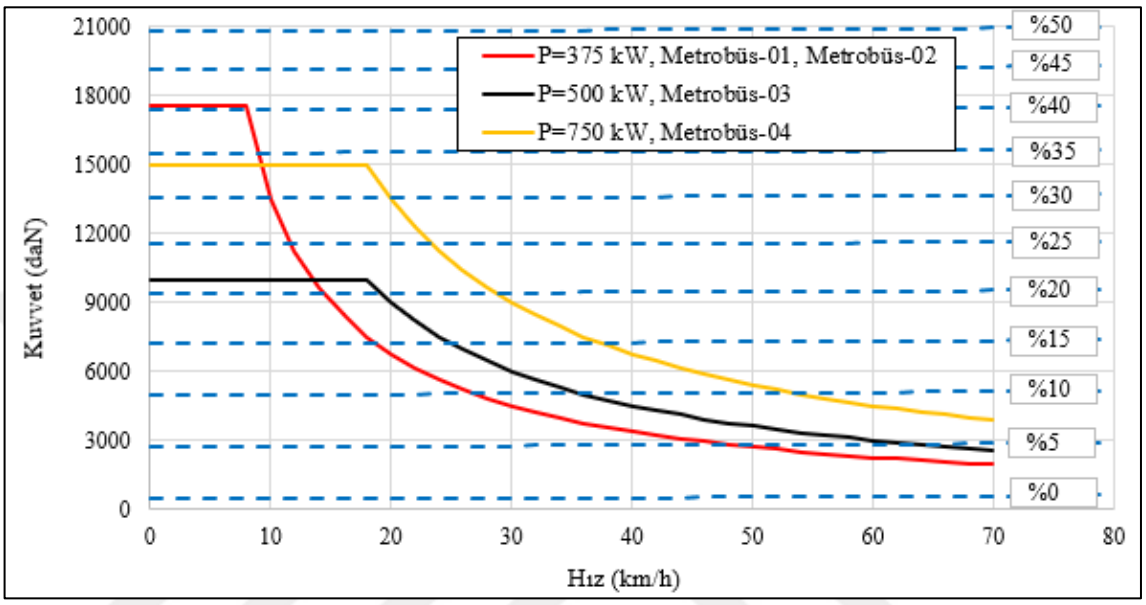
Ayrıca, İstanbul Metrobüs Hattında çalışan 132 adet LF25 dizel araçlarda telemetre bulunmaktadır. Bu araçlardan telemetre sonuçları en uygun olan 5 aracın verileri alınmıştır. Gerekli analiz ve hesaplar yapılarak İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi oluşturulmuştur. Metrobüs-02 LF25 dizel ve Metrobüs-03 elektrikli araçların MATLAB Simulink ile modelleri yapılmıştır.

Bu bölümde, yukarıda belirtilen araçların test sonuçları, GAOS programından ve MATLAB Simulink modelleme programından elde edilen teorik sonuçlar karşılaştırılarak detaylı tartışılmıştır.

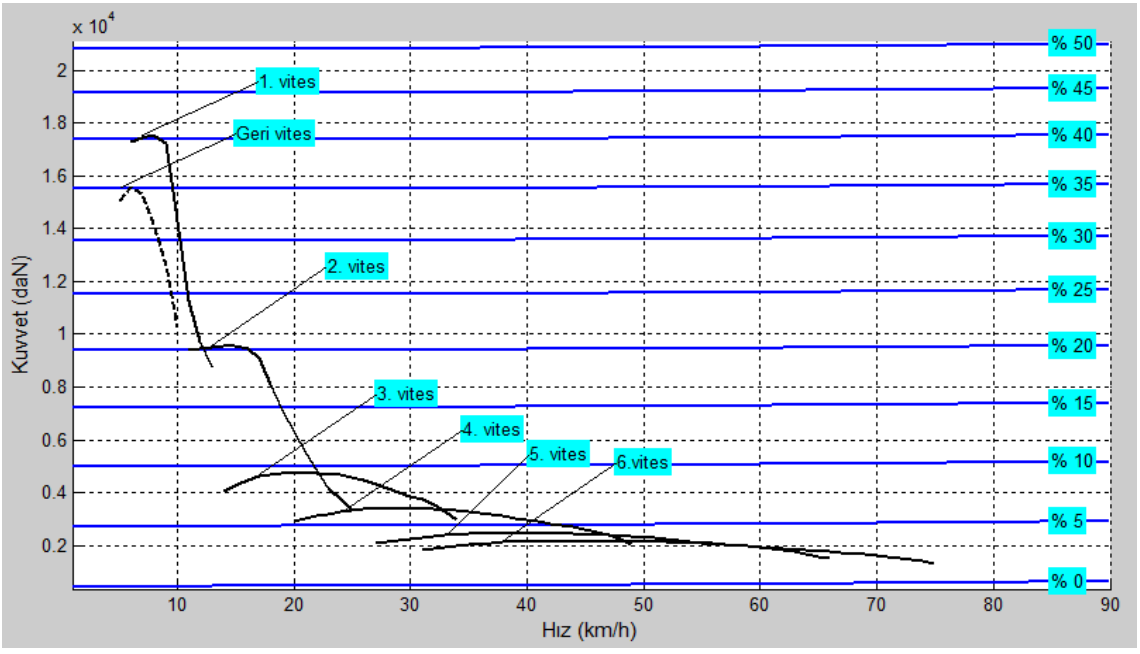
4.1. Araçların Güçlerinin ve Performanslarının Karşılaştırılması

Araçların performansı konu olduğunda en önemli madde olarak içten yanmalı ve elektrik motorun gücü öne çıkmaktadır. Araçların motor güç değerleri Çizelge 3.2'de verilmektedir. Denklem 17 ve Denklem 22 kullanılarak elde edilen Şekil 4.1'deki grafik; 375 kW gücünde olan Metrobüs-01 ve Metrobüs-02, 500 kW gücünde olan Metrobüs-03 ve 750 kW gücünde olan Metrobüs-04 araçlarının hıza göre ideal çekiş kuvvetlerini ve farklı eğimlerdeki toplam direnç kuvvetlerini göstermektedir. Kırmızı eğri Metrobüs-01 ve Metrobüs-02 araçlarına ait olup elde edilebilecek maksimum gücü göstermektedir ve 1. vitesten 6. vitese kadar tüm çekiş kuvvet eğrileri bu eğrinin altında oluşmaktadır.

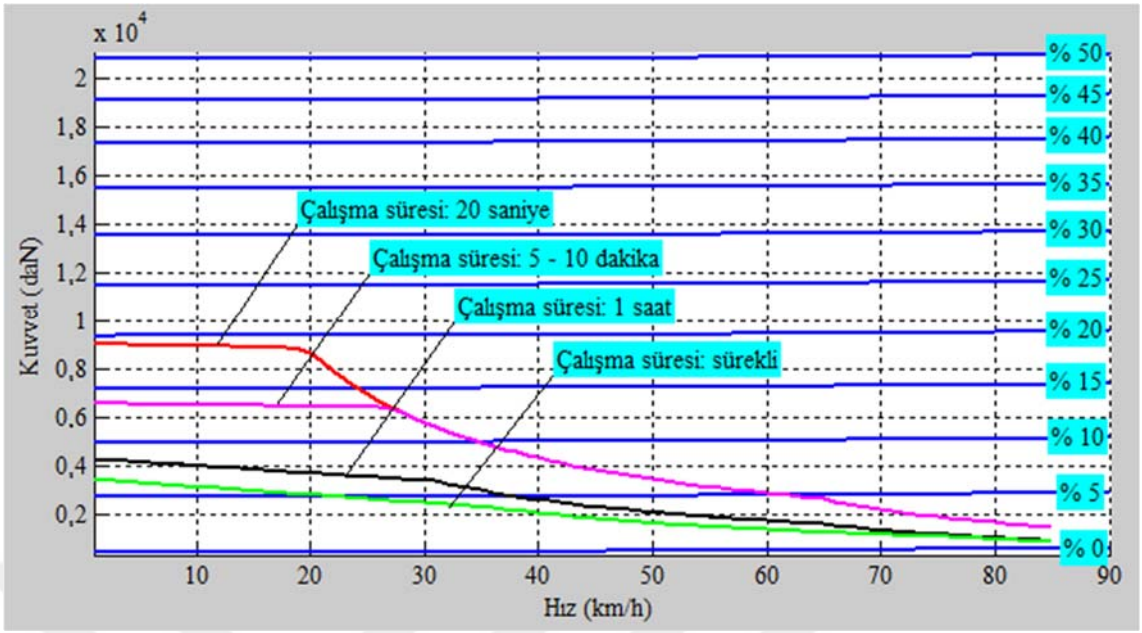
GAOS programı kullanılarak elde edilen Metrobüs-02 aracının performans grafiği Şekil 4.2'de verilmektedir. Bu grafikte her vitese karşılık gelen yatay eksende aracın hızı gösterilirken, dikey eksende aracın çekiş ve yüzdelik eğimine göre direnç kuvvetleri gösterilmektedir.



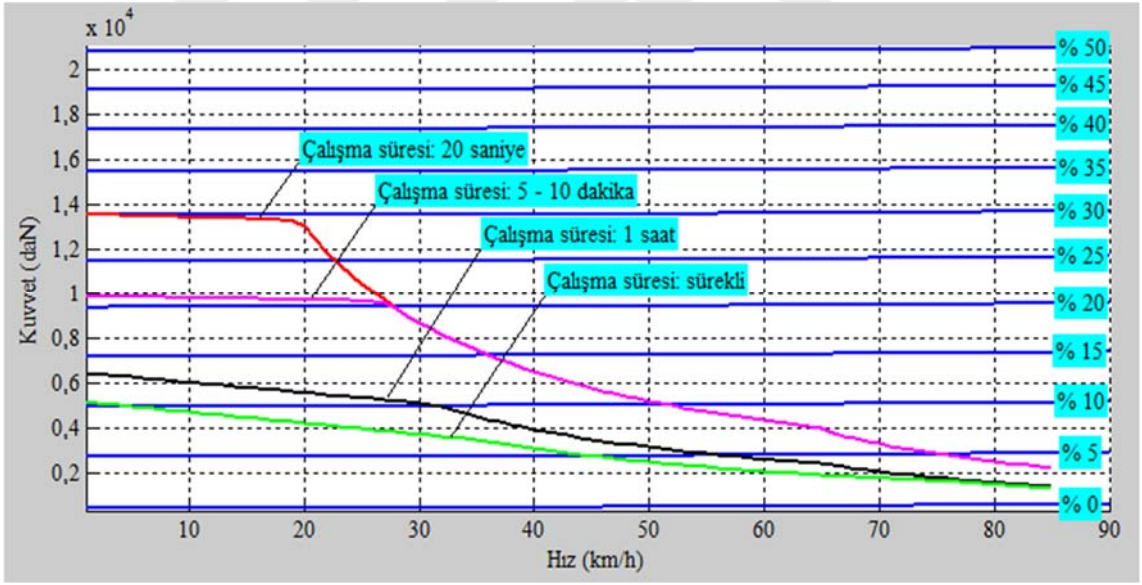
Şekil 4.1. Metrobüs araçların güç karşılaştırma grafiği



Şekil 4.2. Metrobüs-02 aracının performans grafiği



Şekil 4.3. Metrobüs-03 aracının performans grafiği



Şekil 4.4. Metrobüs-04 aracının performans grafiği

Şekil 4.2'de Metrobüs-03 ve Şekil 4.3'te Metrobüs-04 aracının performans grafikleri verilmektedir. Bu grafiklerde yatay eksen aracın hızını gösterirken, dikey eksen aracın çekiş ve farklı eğimlerdeki direnç kuvvetlerini göstermektedir. Bu araçların elektrikli olması nedeniyle dizel araçtaki gibi vitesler yoktur. Onun yerine; 20 saniye, 5-10 dakika,

1 saat ve sürekli çalışma eğrileri vardır. Bu eğriler elektrik motorunun farklı süreler içerisinde verebileceği tork değerlerini göstermektedir.

Metrobüs-01 test aracının ve Metrobüs-02, Metrobüs-03 ve Metrobüs-03 teorik araçların performansını değerlendirirken Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilen grafikleri birlikte analiz etmek gerekir. Araçlar değerlendirilirken aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır.

- Metrobüs araçları sürekli duraklarda durup kalktığı için, bu grafiklerde araçların kalkış performanslarını değerlendirmek amacıyla araçların 0 – 20 km/h hızları arasındaki performansları,
- İstanbul Metrobüs Hattında çalışan araçların ortalama hızı 40 km/h olduğu için, ortalama hızdaki performansları,
- Bu hattaki metrobüs araçların maksimum hızı, hız limitleme sistemi ile 70 km/h ile sınırlandırıldığı için, 70 km/h maksimum hızdaki performansları dikkate alınarak incelenmiştir.

Metrobüs araçlarının güçleri Şekil 4.1'de karşılaştırılmıştır. Metrobüs-01 ve Metrobüs-02 araçları ilk hareket anında en yüksek çekiş gücüne sahiptir. Ancak 8 km/saat hızdan sonra diğer araçlara göre hızla düşmektedir. Metrobüs-03 aracı, hareketin başlangıcında Metrobüs-02 aracına göre daha az kuvvet uygulamaktadır. Ancak bu kuvveti 18 km/saat hıza kadar korumaktadır. Metrobüs-04 aracı, hareketin başlangıcında Metrobüs-02 aracına göre de daha az kuvvet uygulamaktadır. Ancak bu kuvveti 18 km/saat hıza kadar korumaktadır. Şekil 4.1'de gösterilen ortalama ve maksimum hızlardaki çekiş kuvvetleri Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ile aynı olduğundan aşağıda ilgili grafiklerle birlikte anlatılmıştır.

Metrobüs-02 aracının Şekil 4.2'deki performans grafiğine bakıldığında, araç tam yüklü ve 1. viteste çalıştırma anında tam gazda iken tahrik tekerleklerine $1.75x10^4$ daN kuvvet uygulanmaktadır. Bu arada aracın maksimum tırmanma kabiliyeti %40'tır. Metrobüs hattının maksimum eğimi %12 olup, çekiş tekerleğine uygulanması gereken kuvvet

$0,7x10^4$ daN'dur. Aradaki $1.05x10^4$ daN'luk kuvvet farkı aracın ivmelenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle Metrobüs-01 test aracı ve Metrobüs-02 araçlarının hızlanma performansları yüksektir. Metrobüs-02 aracı 12 km/saat hıza ulaştığında 2. vitese geçmekte ve bu andaki çekiş kuvveti $0,95x10^4$ daN olmaktadır. Metrobüs-02 aracı 20 km/saat hıza ulaştığında halen 2. vitestedir ve çekiş kuvveti $0,63x10^4$ daN'dur. Metrobüs-02 aracı yaklaşık %5 eğime sahip bir yolda 4. viteste ortalama 40 km/saat hıza ulaşabilmektedir. Metrobüs-02 aracı %2 eğimli yolda 6. viteste maksimum 70 km/saat hıza ulaşabilmektedir.

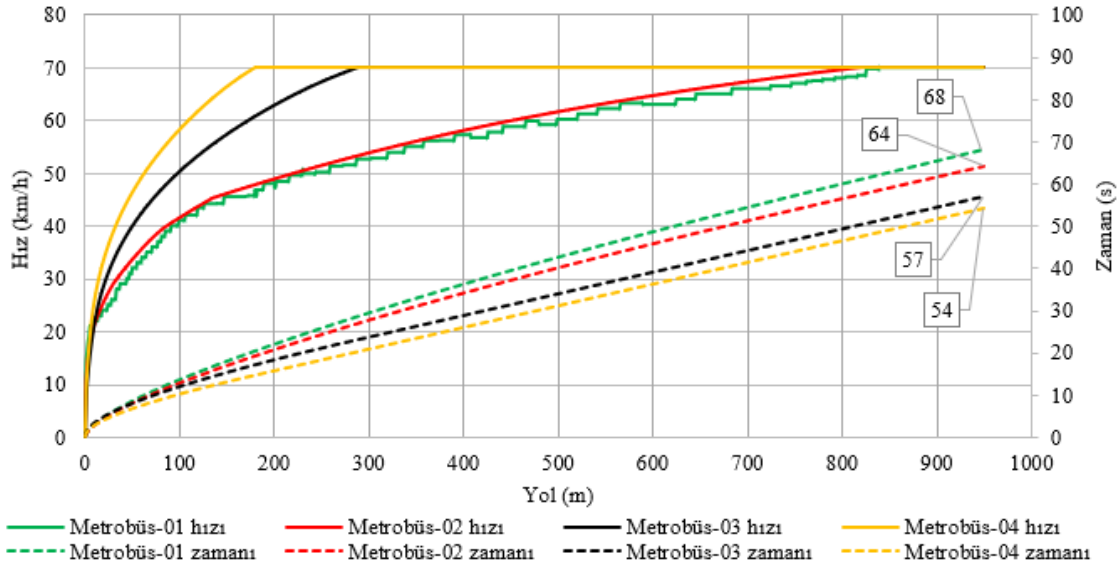
Metrobüs-03 aracının Şekil 4.3'teki performans grafiğine bakıldığında, araç tam yüklü ve kalkış anında tam gazda iken tahrik tekerleklerine $0,9x10^4$ daN'luk bir kuvvet uygulanmaktadır. Bu arada aracın maksimum tırmanma kabiliyeti %19'dur. Metrobüs hattının maksimum eğimi %12 olup, tahrik tekerleklerine uygulanması gereken minimum kuvvet $0,7x10^4$ daN'dur. Aradaki $0.2x10^4$ daN'luk kuvvet farkı aracın ivmelenmesini sağlamaktadır. Tahrik tekerleklerine uygulanan $0,9x10^4$ daN'luk kuvvet, Metrobüs-03 aracı 20 km/saat hıza ulaşana kadar neredeyse sabit kalmaktadır. Bu da aracın sürekli ivmelenmesini sağlamaktadır Metrobüs-03 aracı; 40 km/h'lik ortalama hızı 5 – 10 dakikalık eğri göz önünde bulundurulduğunda, yaklaşık %8'lik eğimli bir yolda yapabilmektedir. Metrobüs-03 aracı 70 km/h'lik maksimum hıza 5 – 10 dakikalık eğri göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık %4'lük eğimli bir yolda ulaşabilmektedir.

Metrobüs-04 aracının Şekil 4.4'teki performans grafiği incelendiğinde, kalkış anında araç tam yüklü ve tam gazda iken tahrik tekerleklerine $1,35\ x10^4$ daN'luk bir kuvvet uygulanmaktadır. Bu arada aracın maksimum tırmanma kabiliyeti %30'dur. Metrobüs hattının maksimum eğimi %12 olduğundan tahrik tekerleklerine $0,7x10^4$ daN kuvvet uygulanmaktadır. Aradaki $0.65x10^4$ daN'luk kuvvet farkı aracın ivmelenmesini sağlamaktadır. Tahrik tekerleklerine uygulanan $1,35x10^4$ daN'luk kuvvet, Metrobüs-04 aracı 20 km/saat hıza ulaşana kadar neredeyse sabit kalmaktadır. Bu, aracın sürekli ivmelenmesini sağlamaktadır. Metrobüs-04 aracı 40 km/h'lik ortalama hızı 5 – 10 dakikalık eğri göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık %13'lük eğimli bir yolda yapabilmektedir. Metrobüs-04 aracı 70 km/h'lik maksimum hıza 5 – 10 dakikalık eğri göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık %6'lık eğimli bir yolda ulaşmaktadır.

Teorik metrobüs araçların yukarıda belirtilen performansları göz önünde bulundurulduğunda; araçların kalkış performansları hariç, Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçların performansı Metrobüs-02 araçtan daha iyidir. Bu sonuçlara göre araçların toplam performansları hakkında net bir sonuç söylemek doğru değildir. Bu neden ile araçların düz yolda, hattı temsil edebilecek uygun eğimli yolda ve maksimum eğimli yolda araçların analizlerinin yapılması gerekmektedir.

4.2. Araçların Performanslarının Düz Yolda Karşılaştırılması

GAOS programı kullanılarak elde edilen verilere göre düz yolu temsil eden Şirinevler-Yenibosna yolunda Metrobüs-01, Metrobüs-02, Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçların performans grafiği Şekil 4.5'te verilmektedir. Bu grafikte yatay eksende aracın aldığı yol gösterilirken, dikey sol eksende aracın hızı ve dikey sağ eksende zaman gösterilmektedir. Metrobüs-01 test aracıdır. Metrobüs-02, Metrobüs-01 test aracının teorik aracıdır. Metrobüs-01 aracı 840 m'de 70 km/h hıza ulaşmaktadır ve 950 m mesafeyi 68 saniyede, Metrobüs-02 aracı ise; 820 m'de 70 km/h hıza ulaşmaktadır ve 950 m mesafeyi 64 saniyede tamamlamaktadır. Bu iki aracın yol-hız ve yol-zaman grafikleri karşılaştırıldığında her iki grafiğinde birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısı ile test aracının sonuçları ile teorik aracın sonucu doğrulanmaktadır. Bu da yapılan çalışmanın sağlıklı olduğunu göstermektedir. Metrobüs-03 aracı 290 m'de 70 km/h hıza ulaşmaktadır ve 950 m mesafeyi 57 saniyede tamamlamaktadır. Metrobüs-04 aracı ise; 180 m'de 70 km/h hıza ulaşmaktadır ve 950 m mesafeyi 54 saniyede almaktadır. Buradan da görüleceği üzere; düz yolda Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçların performansları Metrobüs-02 araca göre oldukça iyidir.

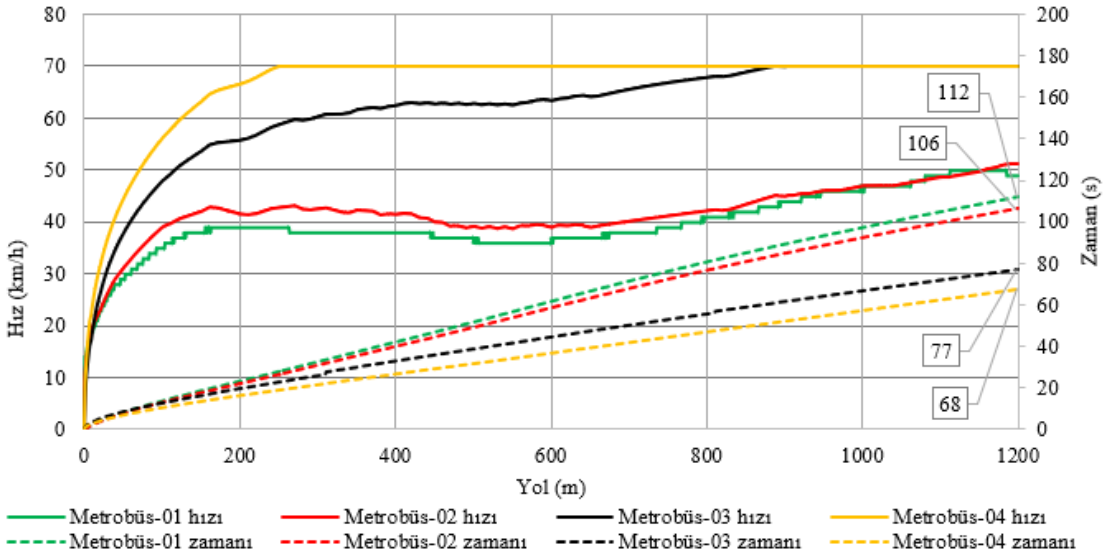


Şekil 4.5. Şirinevler-Yenibosna yolunda araçların yola göre hız ve zaman grafiği

4.3. Araçların Performanslarının Hattı Temsil Edebilecek Uygun Eğimli Yolda Karşılaştırılması

Yapılan incelemelerde Merter-Cevizlibağ durakları arasındaki yolun "hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesiti" olduğuna karar verilmiştir. Bu yolda yapılan testlere ve analizlere göre araçların performans grafiği Şekil 4.6'da verilmektedir. Bu grafikte yatay eksende aracın aldığı yol gösterilirken, dikey sol eksende aracın hızı ve dikey sağ eksende zaman gösterilmektedir. Metrobüs-01 aracı 1200 m'lik yolu 112 saniyede alırken, Metrobüs-02 aracı 1200 m'lik yolu 106 saniyede almaktadır. Metrobüs-01 ve Metrobüs-02 araçları bu yolda 70 km/h hıza ulaşamamaktadır. Bu iki aracın yol-hız ve yol-zaman grafikleri karşılaştırıldığında her iki grafiğinde birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısı ile test aracının sonucunu teorik aracın sonucu doğrulanmaktadır. Bu da yapılan çalışmanın sağlıklı olduğunu göstermektedir. Metrobüs-03 aracı 890 m'de 70 km/h hıza ulaşmaktadır ve 1200 m mesafeyi 77 saniyede tamamlamaktadır. Metrobüs-04 aracı ise; 250 m'de 70 km/h hıza ulaşmaktadır ve 1200 m mesafeyi 68 saniyede almaktadır. Buradan da görüleceği üzere; hattın büyük kısmını temsil edebilecek uygun eğimli yol kesitinde Metrobüs-03 aracın performansı Metrobüs-

02 aracından daha yüksektir. Metrobüs-04 aracın performansı da Metrobüs-03 aracından daha yüksektir.

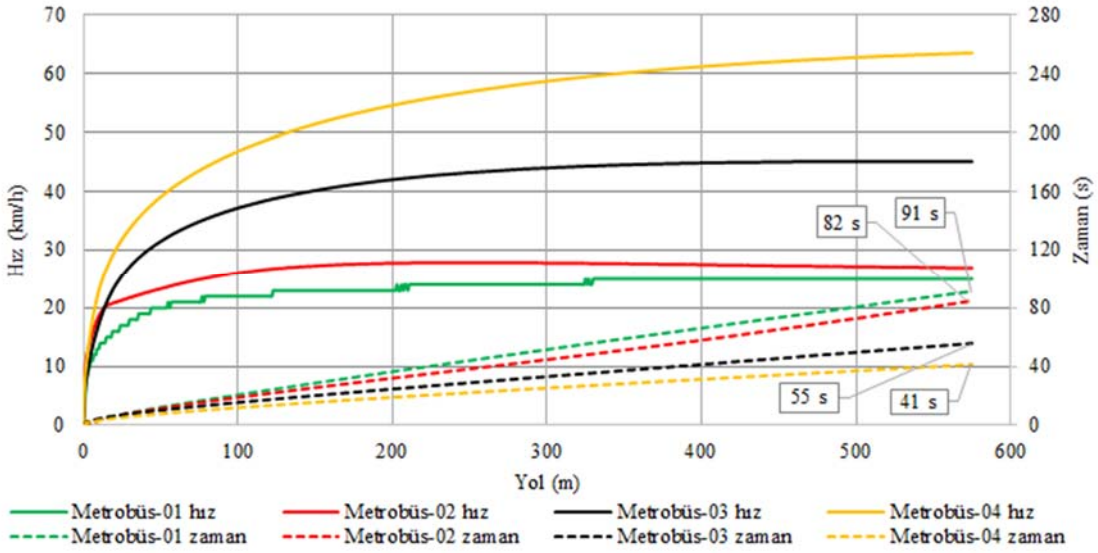


Şekil 4.6. Merter-Cevizlibağ yolunda araçların yola göre hız ve zaman grafiği

4.4. Araçların Performanslarının Maksimum Eğimli Yolda Karşılaştırılması

Metrobüs Hattının maksimum eğimli yolu Haramidere-Güzelyurt durakları arasındaki kesimdir. Bu yolda yapılan testlere ve analizlere göre araçların performans grafiği Şekil 4.6'da verilmektedir. Bu grafikte yatay eksende aracın aldığı yol gösterilirken, dikey sol eksen aracın hızını ve dikey sağ eksende zamanı göstermektedir. Metrobüs-01 aracı 575 m'lik yolu 91 saniyede giderken, Metrobüs-02 aracı aynı yolu 82 saniyede almaktadır. Metrobüs-01 aracı tam yüklü ve ayak pedalı % 100 gazda iken bu yolda maksimum 25 km/h hıza ulaşabilmektedir. Metrobüs-02 aracı bu yolda maksimum 28 km/saat hıza ulaşabilmektedir. Bu iki aracın yol-hız ve yol-zaman grafikleri karşılaştırıldığında her iki grafik de 3 km/saat toleransla birbirine yakındır. Bu da yapılan çalışmanın sağlıklı olduğunu göstermektedir. Bu yolda Metrobüs-03 aracı maksimum 46 km/h hıza ulaşırken, Metrobüs-04 aracı 64 km/h hıza ulaşmaktadır. Metrobüs-03 aracı 575 metrelik mesafeyi 55 saniyede tamamlarken, Metrobüs-04 aracı ise; aynı mesafeyi 41 saniyede almaktadır. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere; hattın maksimum eğimli yolu kesitinde

Metrobüs-03 aracın performansı Metrobüs-02 araca göre oldukça iyidir. Metrobüs-04 aracın performansı da Metrobüs-03 araca göre çok daha iyidir.



Şekil 4.7. Haramidere-Güzelyurt yolunda araçların yola göre hız ve zaman grafiği

Araçların güç karşılaştırma grafiği, performans grafikleri, yola göre hız ve zaman grafiklilerinden çıkan sonuçlara göre Metrobüs-03 aracın performansı Metrobüs-02 aracından daha yüksek ve Metrobüs-04 aracının performansı da Metrobüs-03 aracından daha yüksek çıkmıştır. Müşteri, yani İstanbul Metrobüs Hattı şoför ve yöneticileri, Metrobüs-02 aracının performansından memnundur. Metrobüs-03 aracın performansı Metrobüs-02 aracından daha iyi olduğuna göre, uygun araç olarak Metrobüs-03 seçilmelidir. Metrobüs-04 aracın performansı, Metrobüs-03 araca göre daha iyi olmasına karşın, araçta bir aks fazla olması nedeniyle, aracın maliyetini arttıracağından dolayı ve tasarımı daha karmaşık hale getireceğinden dolayı uygun bulunmamıştır.

4.5. Araçlarının Toplam Performanslarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 4'te karşılaştırılmaktadır. Buna göre tüm yollarda en performanslı araç Metrobüs-04 aracıdır. Tüm yollardaki ikinci performanslı aracı Metrobüs-03 aracıdır. Tırmanma kabiliyetleri en yüksek olmasına rağmen, tüm yollarda performans üçüncü sırayı alan araçlar Metrobüs-1 ve Metrobüs-02 araçlarıdır.

Çizelge 4.1. Metrobüs araçların tüm yollardaki performansının karşılaştırılması

Araçların karşılaştırma özellikleri	Metrobüs-01	Metrobüs-02	Metrobüs-03	Metrobüs-04
Düz bir yolda 70 km/h hıza ulaşmak için kat edilen mesafe (m)	840	820	290	180
Düz bir yolda 950 m mesafeyi kat etme süresi (s)	68	64	57	54
Çoğunluk eğimli yolda 70 km/h hıza ulaşmak için kat edilen mesafe (m)	--	--	890	250
Çoğunluk eğimli yolda 1200 m mesafeyi kat etme süresi (s)	112	106	77	68
Maksimum eğimli yolda ulaşılan maksimum hız (km/h)	25	28	46	64
Maksimum eğimli yolda 575 m mesafeyi kat etme süresi (s)	91	82	55	41
Maksimum tırmanma kabiliyeti (%)	40	40	19	30

4.6. Metrobüs-03 elektrikli araç simülasyon modelinden sonuçların alınması

Metrobüs-03 elektrikli araç simülasyon modeli İstanbul Metrobüs Hattı sürüş çevrimi için çalıştırıldığında Çizelge 4.2'de verilen sonuçlar alınmıştır. Çevrimde 100 km için enerji tüketimi 201,15 kWh ve bir km için enerji tüketimi 2,01 kWh'dir. Çevrim için gerekli toplam enerji 311,16 kWh'dir. Bu enerjinin 108,11 kWh'i rejeneratif frenden gelmektedir. Dolayısı ile rejeneratif enerjinin toplam gerekli enerjiye oranı %34,74'dir.

Çizelge 4.2. Metrobüs-03 elektrikli araç simülasyon modeli sonuçları

Enerji tüketimi (kWh/100 km)	Gerekli enerji (kWh)	Rejeneratif enerji (kWh)	Rejeneratif enerjinin gerekli enerjiye oranı
201,15	311,16	-108,11	%34,74

4.7. Metrobüs-03 elektrikli araç eşdeğer diferansiyel oranının enerji tüketimine etkisinin araştırılması

Metrobüs-03 elektrikli araçta kullanılan ZF AxTrax AVE portal aksın orijinal eşdeğer diferansiyel onarını 22,66 ve araç maksimum hızı 85 km/h'dir. Bu durumda İstanbul Metrobüs Hattı çevriminde Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi aracın 100 km'de enerji tüketimi 201,15 kWh olmaktadır. Aracın maksimum hızı 75 km/h ve eşdeğer diferansiyel oranı 25,71 olduğunda araç enerji tüketimi 204,47 kWh olmaktadır. Bu durumda orijinal aksa göre enerji tüketimi %1,65 fazla olmaktadır. Aracın maksimum hızı 95 km/h ve eşdeğer diferansiyel oranı 20,28 olduğunda araç enerji tüketimi 200,02 kWh olmaktadır. Bu durumda orijinal aksa göre enerji tüketimi %0,56 az olmaktadır. Alternatif eşdeğer diferansiyel oranları kullanıldığında enerji kazancı ve kaybı çok fazla olmamaktadır. Bu neden ile orijinal aksın kullanılması uygun bulunmuştur.

Çizelge 4.3. İstanbul Metrobüs Hattı çevriminde Metrobüs-03 elektrikli araç eşdeğer diferansiyel oranının enerji tüketimine etkisi

$V_{mak:}$ (75 km/h) Eşdeğer dif. oranı: 25,71 (kWh/100 km)	$V_{mak:}$ (85 km/h) Eşdeğer dif. oranı: 22,66 (kWh/100 km)	$V_{mak:}$ (95 km/h) Eşdeğer dif. oranı: 20,28 (kWh/100 km)
204,47	201,15	200,02

4.8. Araçların yakıt ve enerji tüketimlerinin karşılaştırılması

Metrobüs araçların işletmesi esnasında en büyük harcamalar araçların yakıt veya enerji giderlerine yapılmaktadır. Bu neden ile belediyeler işlettikleri araçların yakıt veya enerji tüketimlerine özel önem vermektedirler ve takip etmektedirler. Aşağıdaki Çizelge 4.4'te Metrobüs-01 dizel metrobüs aracın aylık ortalama araç kütlesine bağlı olarak, aylık ortalama yakıt sarfiyatı "L/100 km" olarak verilmektedir. Yedi ayın ortalaması 79,46 L/100 km'dir. Metrobüs-02 metrobüs dizel aracın simülasyon sonucuna göre yakıt sarfiyatı 77,50 L/100 km'dir. Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonucu karşılaştırıldığında yanılma payı sadece %2,53'tür. Bu da yapılan simülasyon çalışmasının doğrulamasını teyit etmektedir. Bundan aşamadan sonra yapılacak hesaplamalarda ve karşılaştırmalarda ölçüm sonuçları olduğu için Metrobüs-01 dizel aracın ölçüm verileri kullanılmaktadır.

Çizelge 4.4. Metrobüs-01 dizel aracın aylara göre yakıt sarfiyatı

Aylar	Aylık ortalama araç kütlesi (kg)	Aylara göre ortalama yakıt sarfiyatı (L/100 km)
Ekim 2023	32 923	80,83
Kasım 2023	32 782	79,51
Aralık 2023	32 847	79,72
Ocak 2024	32 793	79,72
Şubat 2024	32 830	77,58
Mart 2024	33 144	78,21
Nisan 2024	33 182	80,65
Ortalama	32 929	79,46

Metrobüs-01 mevcut L25 dizel araç günde ortalama 300 km yol yapmaktadır. Çizelge 4.5'te bu aracın günlük, aylık ve yıllık yakıt sarfiyatı verilmektedir. Aylık ve yıllık hesaplamalar yapılırken bir ayın 30 gün, bir yılın 360 gün olduğu ve araçların arıza yapmadan sürekli çalıştığı kabul edilmiştir.

Çizelge 4.5. Metrobüs-01 dizel aracın günlük, aylık ve yıllık yakıt sarfiyatı

Günlük yakıt sarfiyatı (L)	Aylık yakıt sarfiyatı (L)	Yıllık yakıt sarfiyatı (L)
238,38	7 151,40	85 816,80

Metrobüs-03, LF25 elektrikli aracın simülasyon sonuçlarına göre araç 100 km'de 201,15 kWh enerji tüketmektedir. Ticari olarak satılan şarj cihazının verimi %95 veya üzerindedir. Bu neden ile şebekeden çekilen enerji 211,74 kWh/100 km'dir. Buna göre Çizelge 4.6'da bu aracın günlük, aylık ve yıllık enerji tüketimi verilmektedir.

Çizelge 4.6. Metrobüs-03 elektrikli aracın günlük, aylık ve yıllık enerji tüketimi

Günlük enerji tüketimi (kWh)	Aylık enerji tüketimi (kWh)	Yıllık enerji tüketimi (kWh)
635,22	19 056,60	228 679,20

Metrobüs-01 dizel ve Metrobüs-03 elektrikli araçların yakıt ve enerji tüketimlerini karşılaştırmak için Çizelge 4.5'teki Metrobüs-01 yakıtını ve Çizelge 4.6'daki Metrobüs-03 enerji tüketimini Türk Lirasına çevirmek gerekmektedir. Bu çalışmada 11.06.2024

tarihli T.C. Merkez Bankası döviz satış kuru kısmında 1 USD'nin karşılığı 32,3127 TL olarak alınmıştır. Gelecekte enflasyon etkisini görmek için bu bilgiye ihtiyaç olacaktır. Bu tarihte İstanbul'da 1 litre dizel yakıt 39,28 TL'dir (Petrol Ofisi, 2024). Enerji tüketimi "EPDK Tarafından 2024 Onaylanan ve 1 Ocak Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler" listesinden "Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü" baz alınarak gündüz, puant ve gece elektrik tüketim bedellerinin ortalaması hesaplanarak 1 kWh elektrik enerjisinin fiyatı 2,90 TL alınmıştır (EPDK, 2024). Çizelge 4.7'de Metrobüs-01 yakıt tüketimi ve Metrobüs-03 enerji tüketimi karşılıklı olarak verilmektedir. Bu verilere göre; elektrik enerjisi fiyatı, dizel yakıtın fiyatının %19,67'ü kadardır.

Çizelge 4.7. Metrobüs-01 dizel ve Metrobüs-03 elektrikli araçların yakıt ve enerji tüketimleri fiyat karşılaştırması

Araçlar	Günlük yakıt ve enerji tüketimi (TL)	Aylık yakıt ve enerji tüketimi (TL)	Yıllık yakıt ve enerji tüketimi (TL)
Metrobüs-01	9 363,57	280 906,99	3 370 883,90
Metrobüs-03	1 842,14	55 264,14	663 169,68
Fiyat farkı	7 521,43	225 642.85	2 707 714,22

Ayrıca, her iki aracın yakıt ve enerji tüketimlerini, enerji cinsinde karşılaştırmak için LF25 dizel aracın 7 aylık yakıt sarfiyatı ortalaması 79,46 L/100km ve 0,7946 L/km yakıt sarfiyatını enerjiye dönüştürmek gerekir. Dizel yakıtın yoğunluğu 0,833 kg/L ve kalorifik değeri ise 43 MJ/kg'dır (BOSCH Automotive Handbook, 2022). 43 MJ/kg değerinde birim çevrimi yapıldığında 11,95 kWh/kg yapar. Dolayısı ile dizel yakıtın bir litresi 9,95 kWh/L enerjiye sahiptir. Metrobüs-01 dizel araç, bir kilometrede 7,91 kWh/km enerji harcamaktadır. Araçlar günde ortalama 300 km yol yapmaktadır ve Çizelge 4.8 buna göre hazırlanmıştır. Buna göre; elektrikli araç, dizel araca göre %73,22 oranında avantajlıdır.

Çizelge 4.8. Metrobüs-01 dizel ve Metrobüs-03 elektrikli araçların enerji tüketimleri karşılaştırması

Araçlar	Günlük enerji tüketimi (kWh)	Aylık enerji tüketimi (kWh)	Yıllık enerji tüketimi (kWh)
Metrobüs-01	2 372,00	71 160,14	853 921,63
Metrobüs-03	635,22	19 056,60	228 679,20
Enerji tüketim oranı (%)	73,22	73,22	73,22

5. SONUÇ

Bu çalışmada öncelikle İstanbul Metrobüs Hattı incelenerek hattın düz kısmı, hattı temsil edebilecek uygun eğimli kısmı ve hattın maksimum eğimli kısmı belirlenmiştir. Ulaşım firmasının LF25 dizel (Metrobüs-01) aracıyla hattın bu bölümlerinde testler yapılmıştır. Metrobüs-02 aracı, Metrobüs-01 test aracının teorik aracıdır. İstanbul Metrobüs Hattına uygun olabilecek elektrikli araçların güç aktarma organları belirlenerek Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 teorik araçları oluşturulmuş ve GAOS programı bu araçlara göre özelleştirilerek teorik sonuçlar elde edilmiştir. Metrobüs-03 ve Metrobüs-04 araçları, mevcut LF25 aracına sırasıyla 2 adet ve 3 adet ZF'nin AxTrax AVE elektrikli portal akslarının monte edildiği varsayılan teorik araçlardır. Araçların güç karşılaştırma grafiği, performans grafikleri, yola göre hız ve zaman grafikleri sonuçlarına göre Metrobüs-03 aracının performansının Metrobüs-02 aracına göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Metrobüs-04 aracının performansının da Metrobüs-03 aracına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla en iyi performansı gösteren araç BRT-04 aracıdır.

BRT-03 aracında 2 adet elektrikli portal aks, BRT-04 aracında ise 3 adet elektrikli portal aks bulunmaktadır. Dolayısıyla BRT-04 aracının maliyeti BRT-03 aracının maliyetinden daha yüksektir. Aynı zamanda BRT-04 aracının tasarımı BRT-03 aracına göre daha karmaşıktır. İstanbul BRT Hattının müşterisi, yani, şoförleri ve yöneticileri BRT-02 aracının performansından memnundur. BRT-03 aracının performansı BRT-02 aracına göre daha iyi olduğundan BRT-03 aracı İstanbul Metrobüs hattı için uygun araç olarak seçilmiştir. BRT-03 aracı LF25 aracın 3. ve 4. akslarına 2 adet ZF AxTrax AVE elektrikli portal aks monte edilen elektrikli bir araçtır.

Bu çalışmada, yukarıda anlatılan performansa dayalı güç aktarma organları seçimine ilave olarak, İstanbul Metrobüs Hattında çalışan 132 adet LF25 dizel araçların telemetresinden en uygun olan 5 aracın verileri alınıp, gerekli analiz ve hesaplar yapılarak İstanbul Metrobüs Hattı çevrimi oluşturulmuştur. LF25 dizel aracın MATLAB Simulink ile modellenmesi yapılarak 132 aracın 7 aylık ölçümü ile simülasyon sonucu karşılaştırıldığında yanılma payı sadece %2,3 olmuştur. Benzer şekilde 12 m elektrikli aracın MATLAB Simulink ile modellenmesi yapılarak SORT testleri ile karşılaştırılıp

model doğrulandıktan sonra, aynı model LF25 elektrikli aracın modeline çevrilmiştir. LF25 dizel aracın yakıt sarfiyatı ile LF25 elektrikli aracın enerji tüketimi karşılaştırıldığında elektrik enerjisi fiyatı, dizel yakıtın fiyatının %19,67'si kadardır. Araç fiyatları ve alt yapı yatırımları göz ardı edilip, dizel metrobüs araçların yakıt sarfiyatı ve elektrikli metrobüs araçların enerji tüketim fiyatı göz önünde bulundurulduğunda elektrikli araç dizel araca göre %80,33 oranında avantajlıdır.

Araç fiyatları ve alt yapı yatırımları göz ardı edilip, LF25 aracın yaktığı dizel yakıt enerjisi ile LF25 elektrikli aracın harcadığı elektrik enerjisi karşılaştırıldığında; elektrikli araç, dizel araca göre %73,22 oranında avantajlıdır.

İstanbul Metrobüs Hattına yakın gelecekte elektrikli metrobüsler alınacaktır. Bu çalışma ile LF25 araçlara uygun elektrikli güç aktarma organları seçilerek, enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu çalışma, İstanbul Metrobüs Hattı için gelecekte çıkabilecek performans problemlerini çözen ve elektrik tüketimini hesaplayarak, elektrikli aracın avantajlarını ortaya koyan özgün, inovatif ve yenilikçi bir çalışmadır.

KAYNAKLAR

Aguilar, P., & Groß, B. (2022). Battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles, an analysis of alternative powertrains as a mean to decarbonise the transport sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *53*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102624

Altay, A. (2017). *Techno-economic analysis of using electric buses at metrobus line*. Yildiz Technical University Institute of Science.

Arias, C., Castro, A., Martins, W. C., Custodio, P., Diaz, J. C., Fjellstrom, K., Hidalgo, D., Hook, W., King, M., Wei, L., Litman, T., Menckhoff, G., Midgley, P., Pardo, C. F., Sandoval, E. E., Szasz, P., Tiwari, G., Vlasak, J., Willumsen, L. P., … Zimmerman, S. (2007). *Bus Rapid Transit Planning Guide*.

Arifoğlu, U. (2016). *MATLAB Simulink ve Mühendislik Uygulamaları*. Alfa Basım ve Yayın Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

Automeris. (2024). *AI assisted data extraction from charts using WebPlotDigitizer*. https://automeris.io/

Aydınonat, N. E. (2014, Aralık 31). *TEPAV | Phileas'ı hatırlayanınız var mı?* https://www.tepav.org.tr/tr/blog/s/5050

Aydin, S., & Oğuz, O. (2020). Yeni Nesil Elektrikli Otobüsün Şasi Dinamometreli Klimatik Test Odası Ortamında Enerji Tüketim Ölçüm Çalışmaları. *OTEKON*.

Balket, S. F., & Asmael, N. M. (2021). Selecting the best route location for bus rapid transit using geographic information system (gis): Kut city is a case study. *Journal of Physics: Conference Series*, *1895*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012029

BOSCH Automotive Handbook. (2022). 11th addition. *p (583-589)*

Brdulak, A., Chaberek, G., & Jagodzinski, J. (2020). Development forecasts for the zero-emission bus fleet in servicing public transport in chosen EU member countries. *Energies*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/en13164239

Changyu, L., Ran, G., Xiangcheng, W., & Alaa, K. (2023). Optimal Placement of Bus Stops using Particle Swarm Optimization. *2023 IEEE International Conference on Smart Mobility, SM 2023*, 15-20. https://doi.org/10.1109/SM57895.2023.10112283

Cunanan, C., Tran, M. K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., & Fowler, M. (2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*, *3*(2), 474-489. https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028

Çağatay Bayindir, K., Gözüküçük, M. A., & Teke, A. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, *52*(2), 1305-1313. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.028

EPDK. (2024). *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*. https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-1/elektriktarifeler

Gao, D., Jin, Z., Zhang, J., Li, J., & Ouyang, M. (2016). Development and performance analysis of a hybrid fuel cell/battery bus with an axle integrated electric motor drive system. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(2), 1161-1169. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.046

Gao, Z., Laclair, T. J., Nawaz, K., Wu, G., Hao, P., Boriboonsomsin, K., Todd, M., Barth, M., & Goodarzi, A. (2022). Comprehensive powertrain modeling for heavy-duty

applications: A study of plug-in hybrid electric bus. *Energy Conversion and Management*, *252*, 115071. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115071

Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics* (S. Taheri, C. Sandu, & B. L. Duprey, Ed.; Revised Edition).

Global BRT Data. (2024a). *Oceania*. https://brtdata.org/location/oceania

Global BRT Data. (2024b, Ocak 11). *Europe*. https://brtdata.org/location/europe

Global BRT Data. (2024c, Ocak 11). *Global BRT Data*. https://brtdata.org/

Global BRT Data. (2024d, Ocak 11). *Sao Paulo BRT*. https://brtdata.org/location/latin_america/brazil/sao_paulo

Jiang, S., Wang, C., Zhang, C., Bai, H., & Xu, L. (2019). Adaptive estimation of road slope and vehicle mass of fuel cell vehicle. *eTransportation*. https://doi.org/10.1016/j.etran.2019.100023

Kaymaz, H. (2018). *Development of driving cycle for hybrid and electrical BRT vehicle*. Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Science.

Kaymaz, H., Korkmaz, H., & Erdal, H. (2019). Development of a driving cycle for Istanbul bus rapid transit based on real-world data using stratified sampling method. *Transportation Research Part D*. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.023

Keskin, H. (2019). *The cost-effectiveness analysis of transition from brt system to bi-articulated trolleybus system in İstanbul*. Sabanci University Graduate School of Social Sciences.

Kim, M. (2017). Component matching of a series hybrid electric bus using nonlinear programming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *18*(7), 1043-1056. https://doi.org/10.1007/s12541-017-0123-3

Kumar, L., & Jain, S. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. Içinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 29, ss. 924-940). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.014

Larminie, James., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons.

Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., Rutherford, S., Smith, R. L., Cracknell, J., & Soberman, R. (2003). *Bus Rapid Transit Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit Sponsored by the Federal Transit Administration*. www.TRB.org

Luman, R. (2021, Eylül 29). *All aboard Europe's electric bus revolution | Article | ING Think*. https://think.ing.com/articles/all-aboard-europes-electric-bus-revolution-290921

Mahmoud, M., Garnett, R., Ferguson, M., & Kanaroglou, P. (2016). Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 673-684. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019

MathWorks. (2024a). *Curve Fitting - MATLAB & Simulink*. https://www.mathworks.com/help/curvefit/curve-fitting.html

MathWorks. (2024b). *Electric Vehicle - MATLAB & Simulink*. https://www.mathworks.com/solutions/automotive/electric-vehicle.html

Naranjo, W., Camargo, L. E. M., Pereda, J. E., & Cortes, C. (2017). Design of Electric Buses of Rapid Transit Using Hybrid Energy Storage and Local Traffic Parameters. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *66*(7), 5551-5563. https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2616401

Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J., Novak, W., & Fietkau, P. (2011). Automotive transmissions: Fundamentals, selection, design and application. Içinde *Automotive*

Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16214-5

NTV. (2009, Nisan 20). *Metrobüsler neden garajda! - Son Dakika Türkiye Haberleri | NTV Haber*. https://www.ntv.com.tr/turkiye/metrobusler-neden-garajda,MhII7hqTvEC-hnaECn-x0g

Pajares, R. G. (2020). *Nantes E-Mobility - MySMARTLife*. https://www.mysmartlife.eu/interventions/nantes-e-mobility/

Petrol Ofisi. (2024). *İstanbul Benzin, Akaryakıt ve LPG Fiyatları*. Petrol Ofisi. https://www.petrolofisi.com.tr/akaryakit-fiyatlari/istanbul-akaryakit-fiyatlari

Sezer, V. (2018). Design of Hybrid Power Transmission Architecture and Power Management Strategy for Metrobus Shaft Torque Limitation. *Journal of Gümüşhane University Institute of Science and Technology*. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.316190

Smallbone, A., Jia, B., Atkins, P., & Roskilly, A. P. (2020). The impact of disruptive powertrain technologies on energy consumption and carbon dioxide emissions from heavy-duty vehicles. *Energy Conversion and Management: X*, *6*. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100030

Sustainable Bus. (2021, Ekim 29). *Solaris to deliver 14 bi-articulated e-buses in Denmark. They're powered by two motors and over 700 kWh battery*. https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/solaris-bi-articulated-e-buses-tide-bus/

Sustainable Bus. (2024a, Ocak 11). *481 buses for Bogotà: it's Scania largest gas bus delivery ever*. https://www.sustainable-bus.com/cng-lng-bus/scania-largest-gas-bus-delivery-for-brt-transmilenio-bogota/

Sustainable Bus. (2024b, Ocak 11). *Over 61,000 e-buses sold by Chinese bus makers in 2020. Production went down 20%*. https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/chinese-new-energy-bus-market-2020/

Tabbache, B., Djebarri, S., Kheloui, A., Benbouzid, M., & Benbouzid, M. A. (2013). Power Presizing Methodology for Electric Vehicle Traction Motors. *International Review on Modelling and Simula-tions*, *6*(1), 29-32. https://hal.science/hal-00874371

Tanyeri, M. N. (2019). *An electrification solution for Istanbul metrobus line*. Graduate School of Science and Engineering of Hacettepe University.

Timuçin, B. (2016). *Modelling of the drive system and design of powertrain at hybrid electric vehicles (PHILEAS)*. Yildiz Technical University Institute of Science.

Tran, M.-K., Akinsanya, M., Panchal, S., Fraser, R., & Fowler, M. (2021). Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance Optimization Considering Various Powertrain Components and Configurations. *Vehicles*, *3*, 20-32. https://doi.org/10.3390/vehicles

UITP. (2014). *Project "SORT" Standardised On-Road Test Cycles*.

UITP. (2017). *Project E-SORT Cycles for electric vehicles*. www.uitp.org

Ulasim. (2024). *Ulasim LF25 BRT*. https://www.ulasim-as.com/tr/LF25

Urban Transport Magazine. (2022). *Brisbane Metro BRT: The first vehicle has arrived! - Urban Transport Magazine*. https://www.urban-transport-magazine.com/en/brisbane-metro-brt-the-first-vehicle-has-arrived/

Van Goethem, S., Koornneef, G., & Spronkmans, S. (2013). *Performance of Battery Electric Buses in Practice: Energy Consumption and Range*. www.tno.nl

Verbruggen, F. J. R., Silvas, E., & Hofman, T. (2020). Electric powertrain topology analysis and design for heavy-duty trucks. *Energies*, *13*(10). https://doi.org/10.3390/en13102434

Vikipedi. (2024, Ocak 10). *Metrobüs (İstanbul)*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Metrob%C3%BCs_(%C4%B0stanbul)

Wang, J., Chen, Y., & Chen, Q. (2006). A fuel cell city bus with three drivetrain configurations. *Journal of Power Sources*, *159*(2), 1205-1213. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.031

Wolff, S., Kalt, S., Bstieler, M., & Lienkamp, M. (2021). Influence of powertrain topology and electric machine design on efficiency of battery electric trucks—a simulative case-study. *Energies*, *14*(2). https://doi.org/10.3390/en14020328

x-engineer. (2024). *Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)*. https://x-engineer.org/brake-specific-fuel-consumption-bsfc/

Yılmaz, A. (2016). Powertrain Sizing, Power and Energy Management of 18 Meters Series Hybrid Electric Brt for Metrobus İstanbul. *OTEKON'16*.

Yiğit, B. H. (2017). *Developing a program for the selection of main components used in the powertrain of buses*. Sakarya University Institute of Science.

ZF. (2024). *AxTrax AVE – Electric portal axle*. https://www.zf.com/products/en/cv/products_76370.html

Zhang, L. P., Qi, B. N., Zhang, R. S., Liu, J. C., & Wang, L. Q. (2016). Powertrain design and energy management of a novel coaxial series-parallel plug-in hybrid electric vehicle. *Science China Technological Sciences*, *59*(4), 618-630. https://doi.org/10.1007/s11431-016-6009-2

Zhou, X., Sun, C., Sun, F., & Zhang, C. (2023). Commuting-pattern-oriented stochastic optimization of electric powertrains for revealing contributions of topology modifications to the powertrain energy efficiency. *Applied Energy*, *344*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121061