



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRİKLİ BİR OTOBÜSÜN FARKLI
SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNDEKİ REJENERATİF
FRENLEME ENERJİSİNİN DEĞİŞİMİNİN
İNCELENMESİ**

Mert Can KÖSEALİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ELEKTRİKLİ BİR OTOBÜSÜN FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNDEKİ REJENERATİF FRENLEME ENERJİSİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Mert Can KÖSEALİ

(523221022)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ

İSTANBUL, 2025

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araçlar için sürdürülebilir ve enerji verimli bir ulaşım çözümü sağlayan rejeneratif frenleme sistemlerinin farklı yol koşullarındaki performansını incelemektir.

Bu çalışmanın her aşamasında bana yol gösteren, sabırla ve özveriyle yardımcı olan tez danışmanım Prof. Dr. Metin Gümüş'e teşekkürlerimi sunarım. Tez süreci boyunca bana kattığı değerli bilgi ve tecrübeler, bu çalışmanın tamamlanmasını mümkün kılmıştır.

Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Oğuzkaan Deligöz, Oral Vatan ve Emir Ünsür'e teşekkür ederim. Ayrıca, bana deneysel çalışmalar için destek olan ve her zaman motive eden Barış Tüyünöklü'ye de şükranlarımı sunarım.

Bu tezin hazırlanmasında yaptıkları tavsiye ve öneriler ile tezin iyileştirilmesine katkı sunan tez jürisinde bulunan hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım. Özellikle çalışma sürecimde bana moral veren ve sabırla yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mart, 2025

Mert Can KÖSEALİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı	4
1.2. Problemin Tanımı	4
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARA GENEL BAKIŞ.....	6
2.1. Elektrikli Araç Teknolojileri	6
2.1.1. Elektrikli Araç Türleri.....	8
2.1.1.1. Tam Elektrikli Araçlar (TEA)	9
2.1.1.2 Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA).....	10
2.1.1.3 Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA)	13
2.1.1.4 Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)	14
2.1.2. Elektrik Motorları	15
2.1.2.1. Doğru Akım (DC) Motorları	16
2.1.2.2. Alternatif Akım (AC) Motorları	17
2.1.3. Batarya Teknolojileri.....	18
2.1.3.1. Lityum-İyon (Li-ion) Bataryalar	19
2.1.3.2. Nikel Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar	19
2.1.3.3. Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄) Bataryalar	19
2.1.3.4. Katı Hal Bataryaları	19
2.1.4. Rejeneratif Frenleme	20
2.1.4.1. Rejeneratif Frenleme Sistemleri	20
2.1.4.2. Geleneksel Frenleme ile Farklılıkları	21
2.1.5. Dinamik Modelleme Yöntemleri.....	22

2.1.6. Sürüş Çevrimleri	23
2.1.6.1. Standart Yol Test Döngüsü 1 (SORT-1)	23
2.1.6.2. Standart Yol Test Döngüsü 2 (SORT-2)	23
2.1.6.3. Standart Yol Test Döngüsü 3 (SORT-3)	24
2.2. Araştırmayla İlgili Günümüze Kadar Yapılan Benzer Çalışmalar.....	24
3. MATERYAL ve METOD.....	26
3.1. Araç Parametreleri	26
3.2. Gerçek Sürüş Verilerinin Toplanması.....	27
3.2.1. Ölçüm Yöntemi ve Kullanılan Cihazlar	27
3.2.2. İstanbul'daki Seçilen Otobüs Hatları	29
3.2.3. Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi.....	33
3.3. Elektrikli Otobüsün Modellenmesi	35
3.3.1. Sürüş Çevriminin Oluşturulması.....	35
3.3.2. Dinamik Model	36
3.3.3. Transmisyon Modeli	39
3.3.4. Elektrik Motor Modeli.....	42
3.3.5. Batarya Sistemi Modeli.....	45
3.3.6. Batarya Doluluk Oranı (SoC) Modeli	48
3.3.7. Modele Genel Bakış.....	51
4. ELEKTRİKLİ OTOBÜSÜN MATLAB/SIMULINK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	53
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	79
KAYNAKÇA.....	81

ÖZET

ELEKTRİKLİ BİR OTOBÜSÜN FARKLI SÜRÜŞ ÇEVİRİMLERİNDEKİ REJENERATİF FRENLEME ENERJİSİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Elektrikli araçlar, çevre dostu sıfır emisyon bir ulaşım çözümü sunarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakta ve karbon ayak izini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu bağlamda, rejeneratif frenleme sistemleri, elektrik motorunu, aracın kinetik enerjisini geri kazanmak ve bataryayı şarj etmek amacıyla kullanarak araçlar için önemli bir enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Bu çalışmada, toplu taşımada etkili olacak elektrikli otobüslerin rejeneratif frenleme sistemlerinin farklı yol ve trafik koşullarında nasıl bir performans sergilediği detaylı bir şekilde incelenmektedir. Çalışmanın başlıca hedefi, farklı hız, eğim, yol durumu ve trafik yoğunluğu gibi parametrelerin rejeneratif frenleme verimliliği üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz ederek sunmaktır. Araştırmanın sonunda, kullanılan sürüş çevrimleri İstanbul'un karakteristik yol ve trafik şartlarına benzetilecektir. Böylece elde edilen sonuçlar İstanbul bağlamında yorumlanacak olup, elektrikli otobüslerin bu şehirde hangi yol koşullarında daha verimli çalışabileceğine dair öngörüler sunulacaktır.

Kullanılan metodoloji, MATLAB/Simulink ortamında yapılan kapsamlı simülasyonlara dayanmaktadır. Bu simülasyonlar sayesinde, gerçek dünyadaki farklı sürüş senaryoları sanal koşullarda ayrıntılı bir şekilde modellenerek araca uygulanmıştır. Bulgulara göre, şehir içi sürüşlerde ve sıkışık trafik koşullarında rejeneratif frenlemenin enerji verimliliğini artırmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Çalışmanın sonunda, İstanbul'daki şehir içi toplu taşıma sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırmayı hedefleyen enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine yönelik önemli ipuçları sunulmaktadır.

Sonuç olarak, bu araştırma, elektrikli otobüslerin İstanbul gibi büyük metropollerde çevresel sürdürülebilirliği ve enerji verimliliği açısından sunduğu potansiyeli daha da güçlendirmekte ve gelecekteki tasarım ve uygulamaların şekillendirilmesine büyük ölçüde katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Rejeneratif Frenleme, Elektrikli Otobüs, MATLAB/Simulink

ABSTRACT

INVESTIGATION OF REGENERATIVE BRAKING ENERGY CHANGE IN DIFFERENT DRIVING CYCLES OF AN ELECTRIC BUS

Electric buses offer an environmentally friendly zero-emission transportation solution, significantly reducing dependence on fossil fuels and decreasing the carbon footprint. In this context, regenerative braking systems provide substantial energy savings for vehicles by utilizing the electric motor to recover the vehicle's kinetic energy and recharge the battery.

This study thoroughly examines how regenerative braking systems of electric buses, which will be effective in public transportation, perform under different road and traffic conditions. The primary objective of the study is to comprehensively analyze and present the effects of various parameters such as speed, gradient, road conditions, and traffic density on the efficiency of regenerative braking. At the end of the research, the driving cycles used will be likened to the characteristic road and traffic conditions of Istanbul. Thus, the results obtained will be interpreted in the context of Istanbul, providing insights into which road conditions electric buses can operate more efficiently in this city.

The methodology employed is based on extensive simulations conducted in the MATLAB/Simulink environment. These simulations allow for detailed modeling of different real-world driving scenarios in virtual conditions and their application to the vehicle. The findings indicate that regenerative braking is highly effective in enhancing energy efficiency during urban driving and congested traffic conditions. At the conclusion of the study, significant insights are provided for the development of energy management strategies aimed at increasing the sustainability of urban public transportation systems in Istanbul.

In conclusion, this research significantly strengthens the potential of electric buses in terms of environmental sustainability and energy efficiency in large metropolises like Istanbul and contributes greatly to shaping future designs and applications.

Keywords: Regenerative Braking, Electric Buses, MATLAB/Simulink

SEMBOLLER

A: Elektrikli Otobüs Projeksiyon Alanı (8,925 m²)

C: Batarya Kapasitesi (278,213 kWh)

c_d: Aerodinamik Sürtünme Katsayısı (1,2)

E_{BGR}: Bataryadan Çekilmesi Gereken Enerji (Wh)

E_{BRG}: Bataryaya Sağlanan Rejeneratif Enerji (Wh)

E_c: Elektrikli Otobüsün Tükettiği Enerji (Wh)

f: Yuvarlanma Direnci Katsayısı (0,01)

F_{aero}: Aero Direnç Kuvveti (N)

F_{acceleration}: Elektrikli Otobüsün İvmelenme Kuvveti (N)

F_{rolling}: Elektrikli Otobüsün Yuvarlanma Direnci Kuvveti (N)

F_{traction}: Elektrikli Otobüsün Çekiş Kuvveti (N)

F_{grade}: Elektrikli Otobüsün Eğim Kuvveti (N)

g: Yerçekimi Katsayısı (9,81 m/s²)

H: Yükseklik (3500 mm)

η_B: Batarya Verimliliği (0,96)

η_M: Motor Verimlilik Oranı

i_{top}: Elektrikli Otobüsün Tranmisyon Oranı (6,2)

L: Uzunluk (12000 mm)

m: Elektrikli Otobüsün Çevrim Ağırlığı (19.000 kg)

m_e: Efektif Atalet Kütle (1,02*m)

τ_w: Tekerlek Torku (Nm)

τ_M: Motor Torku (Nm)

n_w: Tekerlek Dönme Hızı (rpm)

n_M: Motor Dönme Hızı (rpm)

P_M: Motor Gücü (W)

P_{GME}: Motor için Gerekli Elektrik Gücü (W)

P_{MG}: Motor Mekanik Gücü (W)

P_{REG}: Motorun Rejeneratif Sistemden Elde Ettiği Elektrik Gücü (W)

P_{MTE}: Motorun Tükettiği Elektrik Gücü (W)

P_L: Elektrikli Otobüsün Tükettiği Güç (W)

P_A: Elektrikli Otobüsün Aksesuarlarının Tükettiği Güç (2000 W)

P_B: Bataryanın Toplam Gücü (W)

P_{BL}: Bataryadan Yük Altında Çekilen Güç (W)

P_{LOSS}: Bataryanın İç Direnci Nedeniyle Kaybedilen Güç (W)

P_{BGR}: Bataryadan Çekilmesi Gereken Güç (W)

P_{BRG}: Bataryaya Sağlanan Rejeneratif Güç (W)

R_{int}: Batarya İç Direnci (0,1 ohm)

r_w: Elektrikli Otobüsün Tekerlek Yarıçapı (0,48 m²)

X_c: Her Çevrimde Alınan Toplam Mesafe (km)

X_T: En Fazla Alınabilecek Toplam Mesafe (km)

V: Araç Hızı (km/h)

V_{ocv}: Batarya Açık Devre Gerilimi (618,24 V)

W: Genişlik (2550 mm)

ρ_{air}: Ortam Hava Yoğunluğu (1,2 kg/m³)

I_{Bat}: Devredeki Akım

KISALTMALAR

AA: Alternatif Akım

DA: Doğru Akım

EA: Elektrikli Araç

EM: Elektrik Motoru

EO: Elektrikli Otobüs

HEA: Hibrit Elektrikli Araç

İYM: İçten Yanmalı Motor

Li-ION: Lityum-İyon Batarya

NiMH: Nikel Metal Hidrit Batarya

PHEA: Plug-in Hibrit Elektrikli Araç

SORT: Standartlaştırılmış Yol Testi

SoC: Batarya Doluluk Oranı

TEA: Tam Elektrikli Araç

DFS: Değişken frekanslı sürücü

YHEA: Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

ECE: Birleşmiş Milletler Avrupa Birliği Komisyonu

NEDC: Avrupa Yeni Sürüş Döngüsü

UDDS: Kentsel Dinamometre Sürüş Programı

CBD: Merkezi İş Bölgesi Çevrimi

US06: Yüksek Hız ve Yüksek Hızlanma Döngüsü

FWD: Önden Çekiş

RWD: Arkadan İtiş

4WD: Dört Tekerlekten Çekiş

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Elektrikli araç satış oranları	7
Şekil 2.2. Elektrikli araçların yapısı	8
Şekil 2.3. Araç Sınıflandırması, İYM ve EA	9
Şekil 2.4. TEA konfigürasyonunun mimarisi	10
Şekil 2.5. HEA konfigürasyonunun mimarisi	10
Şekil 2.6. Seri hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı.....	11
Şekil 2.7. Paralel hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı.....	12
Şekil 2.8. Seri-paralel hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı	12
Şekil 2.9. Kompleks hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı.....	13
Şekil 2.10. PHEA konfigürasyonunun mimarisi	13
Şekil 2.11. Yakıt hücreli elektrikli araç konfigürasyonunun mimarisi	14
Şekil 2.12. Yakıt hücreli elektrikli aracın aracın çalışma yapısı	15
Şekil 2.13. AC motorun yapısı	16
Şekil 2.14. Rejeneratif frenlemenin mimarisi	21
Şekil 2.15. Geleneksel kampanalı fren çalışma prensibi.....	22
Şekil 2.16. Matematiksel Modelleme Süreci	23
Şekil 3.1. Ölçüm alınan VBox Cihazı	28
Şekil 3.2. Hız verisi alınan 12m uzunluğundaki belediye otobüsü	29
Şekil 3.3. 55T hat güzergahı.....	31
Şekil 3.4. 59N hat güzergahı.	31
Şekil 3.5. 99A hat güzergahı	31
Şekil 3.6. 55T sürüş çevriminin Yükseklik-Hız/Zaman grafiği	32
Şekil 3.7. 59N sürüş çevriminin Yükseklik-Hız/Zaman grafiği.....	32
Şekil 3.8. 99A sürüş çevriminin Yükseklik-Hız/Zaman grafiği.....	32

Şekil 3.9. 55T sürüş çevriminin Hız/Zaman grafiği.....	34
Şekil 3.10. 59N sürüş çevriminin Hız/Zaman grafiği	34
Şekil 3.11. 99A sürüş çevriminin Hız/Zaman grafiği	34
Şekil 3.12. MATLAB/Simulink’de oluşturulan sürüş çevrimleri	36
Şekil 3.13. Elektrikli otobüsün hareketiyle birlikte oluşan kuvvetler	36
Şekil 3.14. MATLAB/Simulink’de oluşturulan araç dinamik modeli	38
Şekil 3.15. MATLAB/Simulink’de oluşturulan transmisyon modeli	41
Şekil 3.16. Elektrik motorunun verim grafiği	43
Şekil 3.17. MATLAB/Simulink’de oluşturulan elektrik motor modeli	44
Şekil 3.18. Batarya sistemi için Rint eşdeğer devre modeli	45
Şekil 3.19. MATLAB/Simulink’de oluşturulan batarya modeli	47
Şekil 3.20. MATLAB/Simulink’de oluşturulan SoC modeli	50
Şekil 3.21. MATLAB/Simulink’de tamamlanan elektrikli otobüs modeli	52
Şekil 4.1. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan araç hızı – zaman grafikleri	54
Şekil 4.2. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan araç hızı – zaman grafikleri....	55
Şekil 4.3. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan ivmelenme – zaman grafikleri	57
Şekil 4.4. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan ivmelenme – zaman grafikleri	58
Şekil 4.5. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan motor torku – zaman grafikleri	60
Şekil 4.6. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan motor torku – zaman grafikleri	61
Şekil 4.7. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan motor devri – zaman grafikleri	63
Şekil 4.8. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan motor devri – zaman grafikleri	64
Şekil 4.9. SORT ve otobüs hattı çevrimleri ile oluşan motor gücü – zaman grafikleri	66

Şekil 4.10. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan motor gücü – zaman grafikleri	67
Şekil 4.11. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan rejeneratif fren enerji üretimi – zaman grafikleri.....	68
Şekil 4.12. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan rejeneratif fren enerji üretimi – zaman grafikleri.....	69
Şekil 4.13. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan kümülatif rejeneratif enerji kazancı – zaman grafikleri.....	70
Şekil 4.14. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan kümülatif rejeneratif enerji kazancı – zaman grafikleri.....	71
Şekil 4.15. SORT sürüş çevrimleri ile oluşan SoC – zaman ve rejeneratif enerji olmadan SoC- zaman grafikleri.....	73
Şekil 4.16. 55T, 59N ve 55T (ilk 300sn) sürüş çevrimleri ile oluşan SoC – zaman ve rejeneratif enerji olmadan SoC- zaman grafikleri	74
Şekil 4.17. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan SoC – zaman ve rejeneratif enerji olmadan SoC- zaman grafikleri.....	75

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı tipteki motorların karakteristik özellikleri	18
Tablo 2.2. Çeşitli tipte piller, enerji ve güç yoğunlukları	19
Tablo 3.1. Elektrikli otobüsün parametreleri	26
Tablo 3.2. Elektrikli otobüsün batarya parametreleri	27
Tablo 3.3. Seçilen otobüs hatlarının karakteristik özellikleri	29
Tablo 3.4. Veri alınan otobüs hatlarının duraklara göre yolcu sayısı	30
Tablo 3.5. Veri alınan otobüs hatlarının başlangıç ve bitiş yükseklik değerleri.....	33
Tablo 4.1. Elektrikli otobüsün çevrim sonuçları.....	77

1. GİRİŞ

Günümüzde, dünya genelinde karşılaşılan büyük sorunlardan biri olan iklim değişikliği, insan yaşamını tehdit eden olumsuz etkilere yol açmakta ve sürdürülebilir bir gelecek için çözüm yolları aranmaktadır. Bu durum, enerji tüketimi ve ulaşım gibi kritik alanlarda köklü değişiklikler gerektirmektedir. Fosil yakıtların kullanımı, sera gazı emisyonlarının artmasına, hava kirliliğine ve doğal kaynakların tükenmesine neden olmaktadır. Karbon salınımını azaltmaya yönelik çabalar, kentlerin ulaşım sistemlerini hemen her yönüyle etkilemekte ve bu bağlamda elektrikli araçlar, özellikle elektrikli otobüsler, toplu taşımada çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli otobüsler, bataryadan tekerleğe sıfır emisyon sağlamaları ve enerji verimliliklerini artırmaları sayesinde şehir içi ulaşımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu araçların geliştirilmesi, sadece çevresel etkiyi azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda toplumsal ihtiyaçlar doğrultusunda halk sağlığı ve yaşam kalitesinin artırılmasına da katkıda bulunmaktadır.

Elektrikli otobüslerin çalışma mantığı, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olarak, elektrik motoru ve batarya sistemine dayanmaktadır. Elektrikli otobüsler, enerji tasarrufu sağlamak ve işletme maliyetlerini düşürmek gibi avantajlar sunarken, aynı zamanda çevre dostu bir ulaşım seçeneği de oluşturmaktadır. Enerji verimliliği, elektrikli otobüslerin tasarımında ve hizmetinde önemli bir yer tutmaktadır. Rejeneratif frenleme, elektrikli otobüslerin performansını artıran temel teknolojilerden biri olarak dikkat çekmektedir. Rejeneratif frenleme sistemi, otobüslerin frenleme esnasında ürettikleri hareket enerjisini geri kazanmalarına olanak tanırken, bu sayede bataryaların yeniden şarj edilmesini sağlar. Bu sistem, enerji tasarrufu sağlamak ve işletme maliyetlerini düşürmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Rejeneratif frenlemenin etkinliği, yol koşullarının değişkenliğine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, dur-kalk hareketleri içeren kent içi trafik koşulları, otobüsün frenleme sıklığını artırarak daha fazla enerji geri kazanımına olanak tanırken, sabit hızda seyahat edilen uzun mesafelerde frenleme sıklığı azalmaktadır. Bu noktada, yol eğimleri, frenleme süresi, otobüsün ağırlığı gibi değişkenlerin yanı sıra yol koşulları ve trafik yoğunluğu gibi faktörlerin, rejeneratif frenlemeden elde edilebilecek enerji miktarı üzerinde direkt etkisi bulunmaktadır.

Enerji verimliliği, ulaşım sektörünün sürdürülebilirliği açısından son derece hayati bir konudur. Elektrikli otobüslerde kullanılan rejeneratif frenleme sisteminin etkinliğini artırmak, hem toplu taşıma sistemlerinin verimliliğini artırmakta hem de yarattıkları çevresel etkiyi azaltmaktadır. Elektrikli otobüslerin şehir içi ulaşımında benimsenmesi, hava kalitesinin iyileştirilmesine ve karbon ayak izinin azalmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda, rejeneratif frenlemenin verimliliği, otobüslerin tasarımında, işletim süreçlerinde ve sürüş dinamiklerinde dikkatle değerlendirilmelidir. Şehirler, dünya nüfusunun büyük bir bölümünü barındırdığından, şehir içi ulaşım sistemleri sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda şekillendirilmelidir. Bu bağlamda elektrikli otobüslerin başarısı, çevresel yararlarının yanı sıra, ekonomik faydalarıyla da güçlendirilmelidir.

Rejeneratif frenleme sistemi, aynı zamanda enerji yönetimi açısından da önemli bir rol oynamaktadır. Otobüsler, frenleme sırasında ürettikleri enerjiyi geri kazanarak alternatör ve batarya sistemleri sayesinde yeniden kullanılabilir hale getirmektedir. Bu durum, otobüslerin daha az enerji harcamasını sağlayarak, hem operasyonel maliyetleri azaltmakta hem de enerji verimliliğini artırmaktadır. Uzun vadede, bu tür sistemlerin benimsenmesi, işletmecilere mali açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Elektrikli otobüslerin gelişimi ve rejeneratif frenleme sistemlerinin etkin bir şekilde kullanımı, ulaşım sektöründeki dönüşümü hızlandırmakta ve sürdürülebilir ulaşım alternatiflerini yaygınlaştırmaktadır.

Sürdürülebilir ulaşım çözümleri, sadece çevresel etkilerin azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda kentlerin ulaşım altyapısının iyileştirilmesi ve toplum sağlığının desteklenmesi açısından da önem arz etmektedir. Elektrikli otobüsler, düşük gürültü seviyesi ve daha az zararlı emisyon salınımı ile çevre dostu bir alternatif oluşturmakta ve toplu taşıma sistemlerini daha çekici hale getirmektedir. Bu potansiyelin gerçekleştirilmesi, özellikle gelişen şehirlerin ulaşım politikalarında elektrikli otobüslerin yer alma oranının artırılmasıyla mümkün olacaktır. Toplu taşıma sistemlerinin kalitesini artırmak, şehir sakinlerinin güvenli ve konforlu bir ulaşım deneyimi yaşamalarını sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Elektrikli otobüslerin geliştirilmesi, şehir içi ulaşımında yeni bir dönemi başlatacak ve bu araçların yaygınlaşması, şehirlerin trafik sorunlarını azaltacak ve hava kalitesini iyileştirecektir.

Şehir içi ulaşımda elektrikli otobüslerin artan kullanımı, enerji tasarrufunu sağlamakta ve çevreye duyarlı bir toplu taşıma ağının oluşturulmasına temel oluşturmaktadır. Bu noktada, şehirlerin toplu taşıma politikalarını gözden geçirmeleri ve elektrikli otobüsleri entegrasyonunu sağlamaları önem taşımaktadır. Gelişmiş bir ulaşım altyapısı oluşturmak, sadece çevresel fayda sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda ekonomik büyümeyi de destekleyecektir.

Rejeneratif frenleme sisteminin verimliliğini artırmanın önemli bir yolu, otobüslerin çalışma koşullarının optimize edilmesidir. Elektrikli otobüslerin enerji tüketimini etkileyen faktörler, rotaların planlanması, hızlanma ve duraklama süreleri gibi dinamikleri içermektedir. Bu bağlamda, otobüslerin sürüş modlarının belirlenmesi, enerji verimliliği açısından büyük bir önem taşımaktadır. Sık dur-kalk yapan güzergahlarda rejeneratif frenlemeden elde edilen enerji miktarı yüksek olurken, uzun ve hızlı seyahat eden güzergahlar da rejeneratif frenlemeden elde edilen enerji sınırlı olmaktadır. Dolayısıyla, şehir yöneticileri ve ulaşım otoriteleri, elektrikli otobüs güzergahlarının planlamasında bu dinamikleri dikkate almalı ve maliyet etkin çözümler geliştirmelidir.

Elektrikli otobüslerin benimsenmesine yönelik artan ilgi, sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin gelişimine katkı sağlamaktadır. Gelişen teknolojilerle birlikte, şehir içi toplu taşıma sistemleri elektrikli otobüslerle güçlendirilmektedir. Rejeneratif frenleme sisteminin etkin kullanımı, bu araçların enerji verimliliğini artırmakta ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Farklı yol çevrimlerinin rejeneratif frenleme üzerindeki etkilerini anlamak, elektrikli otobüslerin verimliliğinin artırılması açısından kritik bir önem taşımaktadır. Ayrıca, çevre dostu ulaşım çözümlerinin benimsenmesi, toplum sağlığını ve yaşam kalitesini artırmakta, şehirlerin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

Elektrikli otobüslerin gelecekteki gelişimi, dünya genelinde artan enerji talepleriyle birlikte daha belirgin hale gelmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşması, fosil yakıt tüketiminin azaltılmasına yardımcı olabileceği gibi, şehir içi trafik sorunlarının çözümünde de etkili bir mekanizma sunacaktır. Hem ekonomik hem de çevresel açıdan sağlanan avantajlar, şehirlerin ulaşım politikalarının yeniden şekillendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, elektrikli otobüslerin geliştirilmesi, sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşma noktasında önemli bir imkân sağlamaktadır. Sonuç olarak, şehir içi ulaşımda elektrikli otobüslerin rolü, sadece enerji tasarrufu sağlamakla kalmayacak, aynı

zamanda daha yaşanabilir, sürdürülebilir ve çevre dostu şehirlerin inşa edilmesine katkıda bulunacaktır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın temel amacı, elektrikli otobüslerde kullanılan rejeneratif fren sisteminin performansını, çeşitli yol çevrimlerine göre değerlendirmektir. Gelişen teknolojinin etkisiyle enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik ön plana çıkarken, elektrikli araçların frenleme sistemleri, enerji geri kazanım potansiyeli açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, farklı yol şartlarının rejeneratif frenleme verimliliği üzerindeki etkileri incelenerek, enerji geri kazanım oranlarının karşılaştırılması hedeflenmektedir. Bu araştırma, farklı yol çevrimlerinin, elektrikli otobüslerin enerji verimliliğine etkilerine dair önemli bilgiler sağlayacaktır. Otobüs filolarında elektrikli otobüs sayısı sınırlı olan yerel yönetimlerde, elektrikli otobüslerin en uygun hatlarda kullanımı sağlanarak ulaşım sektöründe sürdürülebilirliğin artırılmasına yönelik önemli bir katkı oluşturmayı amaçlamaktadır.

1.2. Problemin Tanımı

Gelişen teknoloji ile birlikte elektrikli araçların popülaritesi artmakta ve bu araçların enerji verimliliği ön planda tutulmaktadır. Elektrikli otobüslerde enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılan rejeneratif fren sistemleri, konvansiyonel fren sistemlerine göre önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin etkinliği, yol koşulları ve sürüş davranışlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Rejeneratif frenleme, frenleme sırasında kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar, ancak farklı yol çevrimlerinde bu dönüşüm oranı değişmektedir. Şehir içi, uzun mesafe ve farklı yükseltideki yol koşulları, frenleme performansı ve enerji geri kazanımındaki verimlilikte belirgin farklılıklara yol açabilmektedir. Dolayısıyla, elektrikli otobüslerin sınırlı olması durumunda rejeneratif fren sistemlerinden gerektiği gibi istifade edilebilmesi için en uygun hatların seçilmesi ve elektrikli otobüslerin bu hatlarda kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ele alınan ana problem, elektrikli otobüslerdeki rejeneratif fren sistemlerinin performansının, çeşitli yol çevrimleri altında nasıl değiştiğinin

araştırılmasıdır. Hangi yol koşulların da enerji geri kazanımının arttığı, hangi koşullar da ise bu kazanımın azaldığı, enerji yönetimi ve sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik bir sorudur. Mevcut literatürde bu konuya dair İstanbul şehri için yeterli çalışma bulunmamaktadır ve bu araştırma, elektrikli otobüslerin İstanbul topografyasına benzer şehirlerde kullanımında rejeneratif fren sisteminden en etkili şekilde nasıl istifade edilebileceğine dair önemli bilgilerin elde edilmesini amaçlamaktadır.



2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARA GENEL BAKIŞ

Elektrikli araç (EA) teknolojileri, özellikle elektrikli otobüsler ve bunların enerji verimliliğini artıran rejeneratif frenleme sistemleri, son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Çeşitli akademik çalışmalar, bu alanın fiziksel ve mühendislik yönlerini incelemiş, aynı zamanda çevresel etkileri ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından getirilerini değerlendirmiştir. Bu bölümde, mevcut literatür analiz edilerek, EA teknolojileri anlatılmıştır. Bu çalışmanın gerekliliği, literatürdeki boşluk tespit edilerek ortaya konulmuştur.

2.1. Elektrikli Araç Teknolojileri

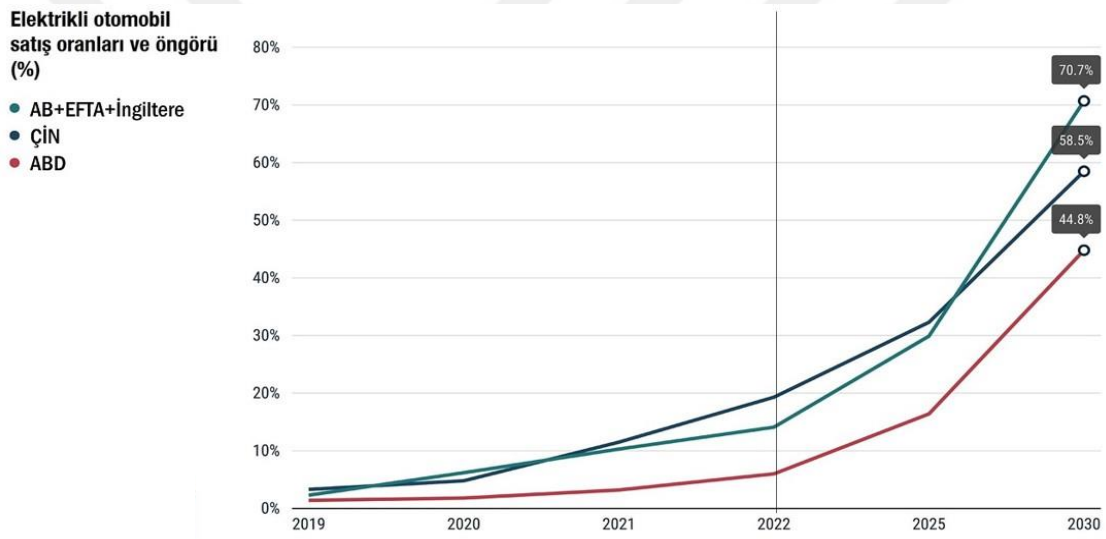
Elektrikli araç teknolojileri, otomotiv endüstrisinin en dinamik ve yenilikçi alanlarından biridir. Bu teknolojiler, araçların tamamen elektrik enerjisi ile çalışmasını sağlarken, çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmekte ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaktadır [1]. Günümüzde elektrikli araçlar, enerji verimliliği, düşük emisyon profili ve artan performans özellikleri ile geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara karşı önemli bir alternatif sunmaktadır [2]. Elektrikli araç teknolojileri, geleneksel araç teknolojilerinden farklı birkaç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; elektrik motoru, batarya sistemleri, kontrol ünitesi ve şarj altyapısıdır.

Elektrik motorları, EA'ların temel güç kaynağıdır. Bu motorlar, bataryalardan gelen elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek aracı harekete geçirir. Elektrik motorlarının verimliliği, içten yanmalı motorlara göre daha yüksektir ve anında yüksek tork üretim kabiliyetine sahiptir [3]. Bu özellik, EA'ların hızlı bir şekilde hızlanabilmesine olanak tanır. Batarya, EA teknolojilerinin en kritik bileşenidir. Genellikle lityum-iyon hücrelerden oluşan bu bataryalar, EA menzili belirleyen önemli bir faktördür. Gelişmiş batarya teknolojileri, daha yüksek kapasiteler, daha hızlı şarj süreleri ve daha uzun ömür sunarak EA kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Kontrol ünitesi, elektrik motorunun çalışmasını yönetirken enerji akışını optimize eden bir bileşendir. Bu birim, motorun hızını, torkunu ve bataryanın şarj durumunu izler; ayrıca rejeneratif frenleme gibi enerji geri kazanım sistemlerinin yönetimini de üstlenir. Şarj sistemi ise EA'ların şarj edilmesini sağlamak için geliştirilmiş bir altyapıdır. Ev tipi şarj cihazlarının yanı sıra, kamuya açık hızlı şarj istasyonları da EA kullanıcıları için erişim

kolaylığı sunmaktadır [1]. Bu şarj teknolojilerinin gelişimi, EA'ların günlük kullanımını daha pratik hale getirmektedir.

Elektrikli araç teknolojileri, 19. yüzyılda icat edilmesine rağmen, özellikle son 20 yıl içinde büyük bir gelişim göstermiştir. Çevresel kaygılar, enerji verimliliği talepleri ve teknolojik ilerlemeler, EA'ların yeniden popülerlik kazanmasında etkili olmuştur [4]. Hükümet teşvikleri ve düzenlemeleri, birçok ülkede EA'ların benimsenmesini artırmaya yönelik politikaların oluşturulmasını desteklemiştir. EA'ların pazar payı, küresel ölçekte hızla artarken, birçok otomotiv üreticisi yatırımlarını bu alana yönlendirmiştir. Bu süreçte, geleneksel otomobil üreticilerinin yanı sıra, yeni girişimcilerin elektrikli araç pazarına girmesi rekabeti artırmakta ve yenilikçi çözümlerin önünü açmaktadır.

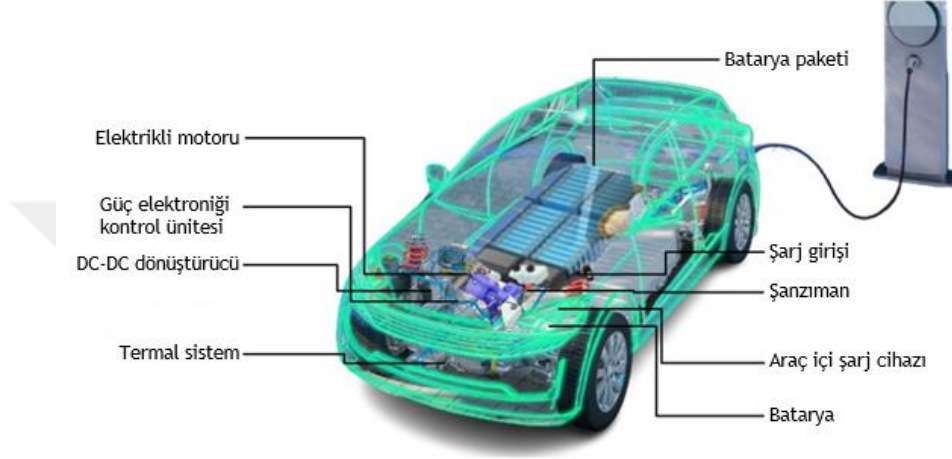


Şekil 2.1. Elektrikli araç satış oranları

Elektrikli araçların birçok avantajı bulunmaktadır. Öncelikle çevresel sürdürülebilirlik açısından katkıları dikkat çekicidir. EA'lar, sıfır emisyon salınımı gerçekleştirdiklerinden hava kirliliğini azaltmakta ve iklim değişikliği ile mücadeleye destek olmaktadır [5]. Ekonomik avantajları ise elektrik maliyetlerinin, benzin ve dizel yakıtlara göre daha düşük olması ve bakım maliyetlerinin azalması ile somutlaşmaktadır. EA'ların genellikle daha az hareketli parçaya sahip olması, yıpranma oranını azaltmakta ve bakım ihtiyacını minimumda tutmaktadır.

Ancak EA teknolojilerinin karşılaştığı bazı zorluklar da mevcuttur. Bu zorluklar arasında en önemli olanı şarj altyapısının yetersizliğidir. EA sahiplerinin güvenilir ve geniş bir şarj ağına erişim sağlaması, bu araçların benimsenmesi açısından kritik bir faktördür. Batarya

menzil sorunları ise bazı kullanıcılar için önemli bir endişe kaynağıdır; özellikle uzun yolculuklarda menzil kaygısı hissedilmektedir. Ayrıca, batarya üretimindeki çevresel etkiler de dikkat çeken bir konudur [6]. Batarya hücreleri için gereken hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesi, önemli çevresel sorunlar yaratabilir. Geri dönüşüm ve sürdürülebilir malzeme kullanımı konularında ilerlemeler kaydedilmediği takdirde, bu durum EA'ların çevre dostu imajına gölge düşürebilir.

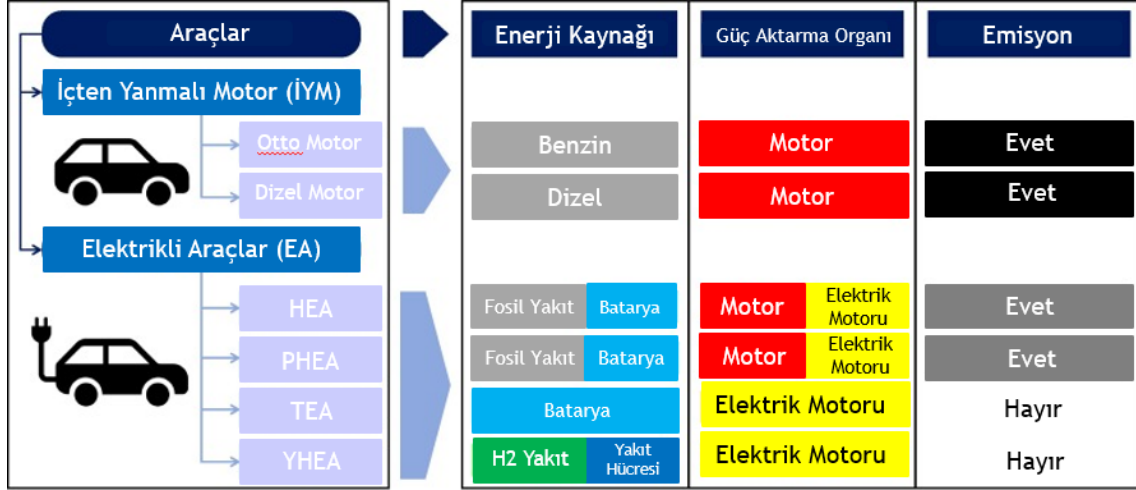


Şekil 2.2. Elektrikli araçların yapısı

Sonuç olarak, EA teknolojileri, otomotiv endüstrisinde önemli bir dönüşüm yaratan alanlardır. Sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda sağladıkları çevresel faydalar, ekonomik avantajlar ve yüksek enerji verimliliği, bu teknolojilerin benimsenmesini hızlandırmaktadır [7]. Ancak menzil problemleri, şarj altyapısı yetersizlikleri ve batarya teknolojilerinin çevresel etkileri gibi sorunların çözülmesi, elektrikli araçların yaygınlaşmasına katkıda bulunacaktır. Gelecekte, EA teknolojilerinin gelişimi, hem otomotiv endüstrisinde hem de genel sürdürülebilir ulaşım politikalarında önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

2.1.1. Elektrikli Araç Türleri

EA teknolojileri sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından önemli bir yere sahiptir. Bu teknolojiler, farklı türlerde elektrikli araçların çalıştırılmasına olanak tanımaktadır. Elektrikli araç türleri arasında Tam Elektrikli Araçlar (BEV), Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV) bulunmaktadır [8].



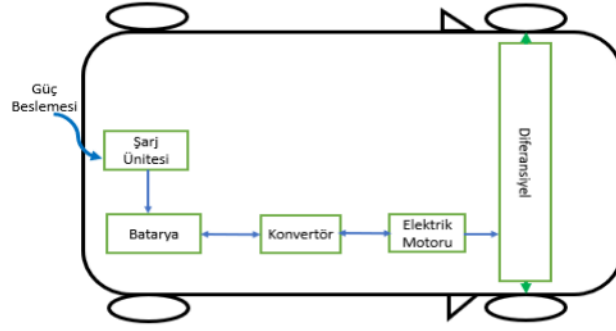
Şekil 2.3. Araç Sınıflandırması, İYM ve EA [8].

Tam Elektrikli Araçlar (TEA), tamamen elektrik enerjisi ile çalışırlar ve bataryadan tekerleğe sıfır emisyon sağlayan araçlardır. Bu araçlar, enerji depolamak için büyük kapasiteli bataryalar kullanır ve genellikle şehir içi ulaşımda tercih edilirler [1]. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA), içten yanmalı motor ve elektrik motorunu birlikte kullanarak enerji verimliliğini artırır ve emisyonları azaltırlar [9]. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA), harici bir güç kaynağından şarj edilebilen bataryalara sahip olup, hem elektrik hem de benzinle çalışabilirler. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA) ise hidrojen yakıt hücreleri kullanarak elektrik üretir ve bu sayede uzun menzil ve hızlı yakıt ikmali avantajı sunarlar.

2.1.1.1. Tam Elektrikli Araçlar (TEA)

TEA'lar, tamamen elektrik enerjisi ile çalışan ve sıfır emisyon sağlayan araçlardır. Bu araçlar, enerji depolamak için büyük kapasiteli bataryalar kullanır ve genellikle şehir içi ulaşımda tercih edilir. TEA'lar, çevresel sürdürülebilirlik ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma konularında önemli bir rol oynamaktadır [1].

Rejeneratif frenleme sistemleri, tam elektrikli araçların enerji verimliliğini artıran önemli bir teknolojidir. Bu sistemler, frenleme sırasında aracın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek bataryalara geri kazandırır. (Taci & Erdem 2018) yapmış olduğu bir çalışmada, rejeneratif frenlemenin EA'lardaki etkisini ve güç analizini ele almışlardır [2]. Bu ve benzeri çalışmalar, TEA'ların enerji tasarrufu sağlaması ve emisyonları azaltması açısından rejeneratif frenlemenin önemini ortaya koymaktadır.

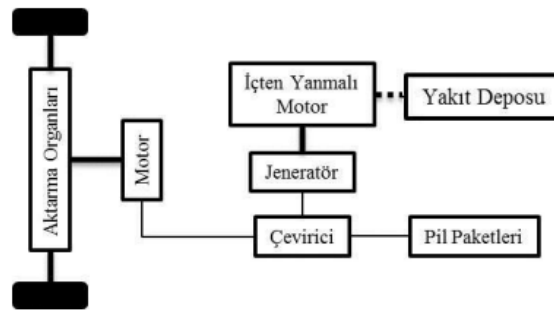


Şekil 2.4. TEA konfigürasyonunun mimarisi [10].

Kısaca, TEA'lar, sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda çevresel faydalar sağlamak ve enerji verimliliği ile ekonomik avantajlar sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, TEA'ların enerji verimliliğini artırmak için rejeneratif frenleme sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu teknolojilerin daha da geliştirilmesi, sürdürülebilir ulaşım çözümlerine katkısını geliştirecektir.

2.1.1.2 Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)

HEA'lar, içten yanmalı motor ile elektrik motorunu bir arada kullanarak enerji verimliliğini artıran ve emisyonları azaltan araçlardır. Bu araçlar, genellikle hem şehir içi hem de uzun mesafe yolculuklarında esneklik sunar. Hibrit sistemler, özellikle düşük hızlarda ve dur-kalkların çok yaşandığı trafiklerde elektrik motorunu kullanarak yakıt tüketimini azaltır [9].



Şekil 2.5. HEA konfigürasyonunun mimarisi [11].

Hibrit araçların enerji yönetimi ve kontrol stratejileri, bu araçların performansını ve verimliliğini artırmada kritik bir rol oynar. (Biliroğlu, 2009) seri hibrit elektrikli araçların modellenmesi ve kontrolü üzerine yaptıkları çalışmada, bu araçlarda enerji yönetiminin önemini incelemişlerdir [9]. (Altındemir, 2008) ise hibrit elektrikli taşıtlarda rejeneratif

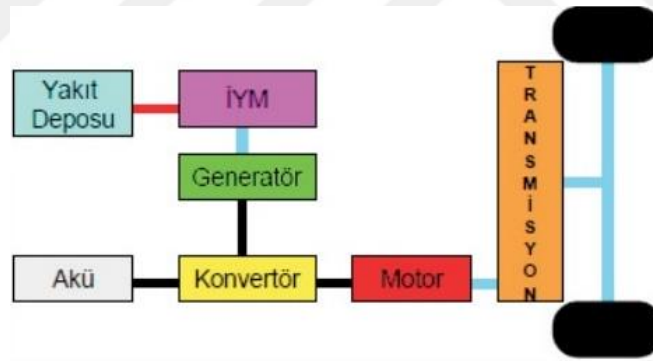
frenlemenin önemini ve bu sistemlerin enerji geri kazanımındaki verimliliğini değerlendirmişlerdir [12]. Bu çalışmalar, hibrit araçların enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından sunduğu avantajları desteklemektedir.

Hibrit araçlar, farklı sürüş koşullarına uyum sağlama yetenekleri sayesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Örneğin, şehir içi sürüşlerde elektrik motorunun daha fazla kullanılması, yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu tür araçlar, enerji verimliliği ve düşük emisyon profili ile geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara göre önemli bir alternatif sunmaktadır [2].

Ayrıca, hibrit elektrikli araçlar seri, paralel, seri-paralel ve kompleks olmak üzere farklı tahrik stratejilerine sahiptirler.

2.1.1.2.1 Seri Hibrit Elektrikli Araçlar

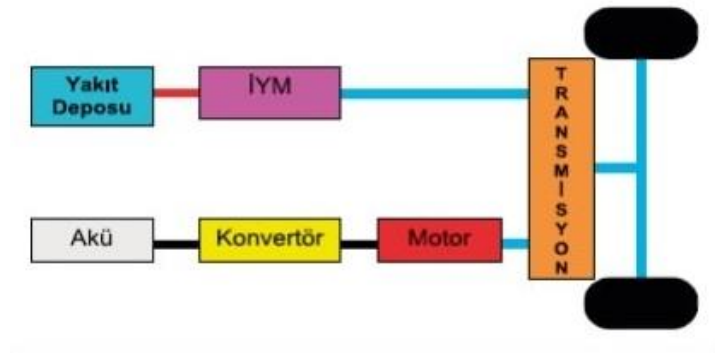
İçten yanmalı motor (İYM), mekanik olarak tekerleklere bağlı olmadan yalnızca elektrik üretmek amacıyla bir jeneratöre bağlıdır. Oluşturulan elektrik, batarya ve güç elektroniği aracılığıyla doğrudan tahrik için kullanılan elektrik motoruna iletilir.



Şekil 2.6. Seri hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı

2.1.1.2.2 Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

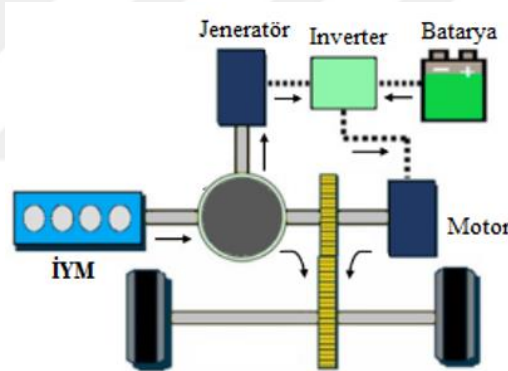
Hem içten yanmalı motor hem de elektrikli motor, doğrudan tahrik sistemine (genellikle şanzıman aracılığıyla) bağlanır. Her iki güç kaynağı, tek başına veya birlikte, tekerleklere güç sağlayabilir.



Şekil 2.7. Paralel hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı

2.1.1.2.3 Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

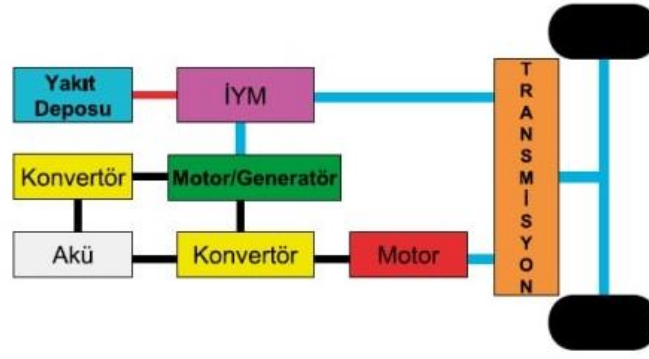
Bu mimari, seri ve paralel hibrit sistemlerin avantajlarını birleştirir. İYM, gerek elektrik üretimi için jeneratör rolü oynar, gerekse doğrudan tahrik konfigürasyonuna entegre edilerek tekerleklere güç iletebilir. Genellikle bir güç bölme ünitesi, örneğin; planet dişli seti, kullanılarak iki mod arasında geçiş sağlanır.



Şekil 2.8. Seri-paralel hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı

2.1.1.2.4 Kompleks Hibrit Elektrikli Araçlar

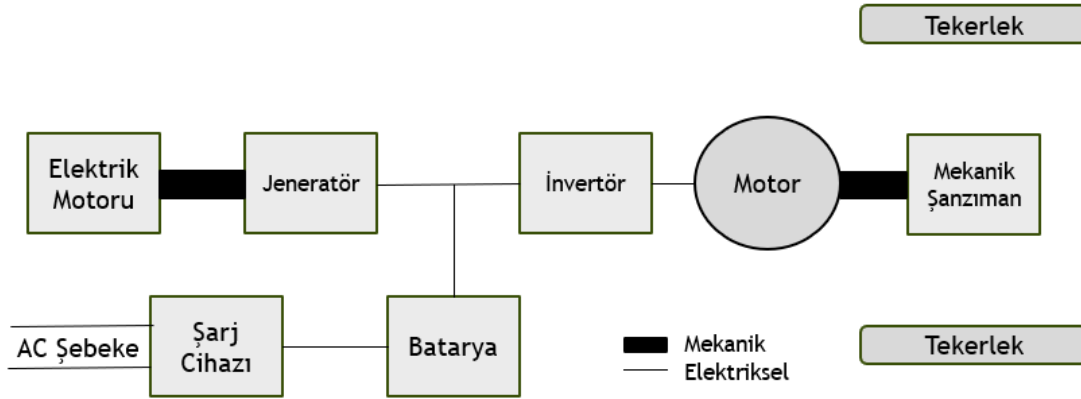
Kompleks hibrit sistemler, birden fazla hibrit stratejinin veya ekstra güç akış yollarının entegre edildiği mimarilerdir. Bu sistemlerde, ilave elektrik motorları (örneğin eksen bazında ayrı motorlar veya in-wheel motorlar) ve ek enerji depolama elemanları (batarya, süperkapasitör) kullanılarak daha yüksek verimlilik, performans ve adaptif kontrol sağlanır.



Şekil 2.9. Kompleks hibrit elektrikli aracın çalışma yapısı

2.1.1.3 Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA)

PHEA'lar, hem İYM hem de elektrik motorunu birlikte kullanarak enerji verimliliğini artıran ve emisyonları azaltan araçlardır. Ancak plug-in hibrit elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlardan farklı olarak, harici bir güç kaynağından şarj edilebilen daha büyük bir batarya kapasitesine sahiptir. Bu özellik, PHEA'ların daha uzun mesafeleri sadece elektrik enerjisi ile kat edebilmesine olanak tanır [9].



Şekil 2.10. PHEA konfigürasyonunun mimarisi [13].

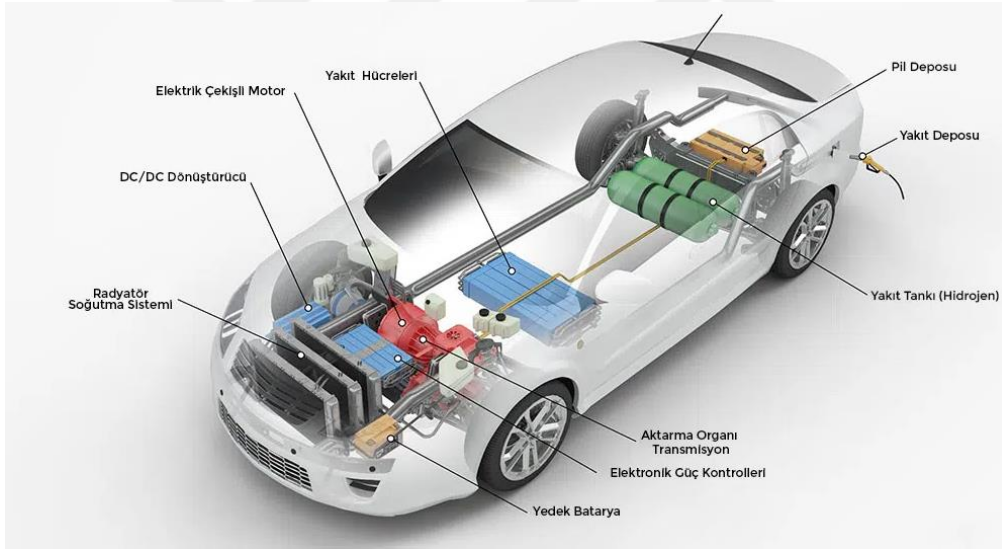
PHEA'ların enerji yönetimi ve kontrol stratejileri, bu araçların performansını ve verimliliğini artırmada kritik bir rol oynar. PHEA'lar, özellikle şehir içi sürüşlerde elektrik motorunu daha fazla kullanarak yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Bu tür araçlar, enerji verimliliği ve düşük emisyon profili ile geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara karşı önemli bir avantaj sunmaktadır.

Ayrıca, PHEA'ların batarya kapasitesi ve şarj edilebilirlik özellikleri, bu araçların enerji tasarrufu sağlamasında ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynar.

2.1.1.4 Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)

YHEA'lar, hidrojen yakıt hücrelerini kullanarak elektrik üreten ve bu elektriği araç motorunda kullanan bir sistemle çalışır. Bu araçlar, yalnızca su buharı gibi zararsız yan ürünler üreterek çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlar. Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek yüksek verimlilik sunar [4].

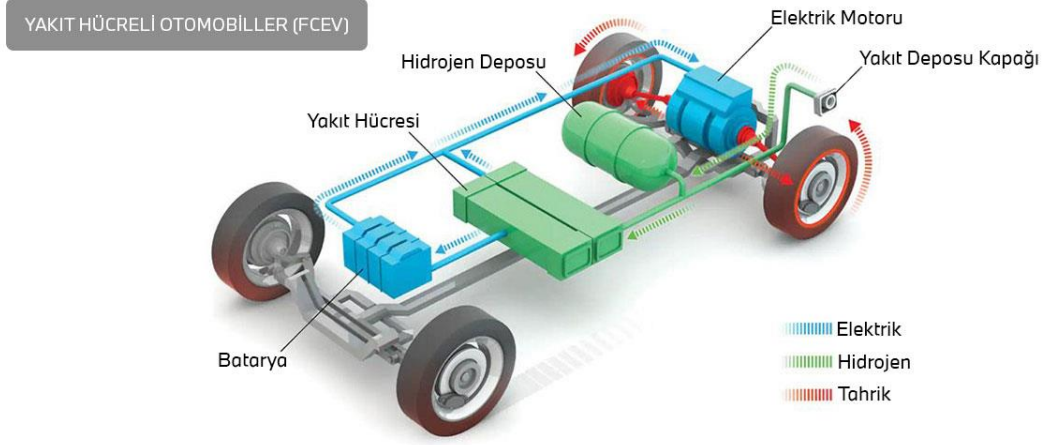
Yakıt hücreli araçlar, özellikle uzun menzil ve hızlı yakıt ikmali avantajları ile dikkat çeker. Bu özellikler, YHEA'ları uzun mesafeli yolculuklar için uygun hale getirir. Ayrıca, hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi, bu araçların karbon ayak izini daha da azaltma potansiyeline sahiptir [9].



Şekil 2.11. Yakıt hücreli elektrikli araç konfigürasyonunun mimarisi [14].

Araçtaki hidrojen, yüksek basınçlı tanklarda depolanır ve sistem devreye girdiğinde hidrojen, yakıt hücresine yönlendirilir. Bu sırada, dışarıdan alınan hava içindeki oksijenle birlikte yakıt hücresinde bulunan elektrotlarda elektrokimyasal bir reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucu doğrudan elektrik enerjisi üretilir ve yan ürün olarak su ortaya çıkar. Üretilen DC elektrik, aracın ihtiyaç duyduğu voltaj seviyesine uyarlanmak üzere bir DC-DC konvertör aracılığıyla dönüştürülür. Ardından, bu enerji batarya veya süperkapasitörde depolanır ya da doğrudan elektrikli motora iletilir; böylece elektrikli

motor, aldığı enerjiyi mekanik güce çevirerek tekerleklere aktarır ve aracın hareket etmesini sağlar.

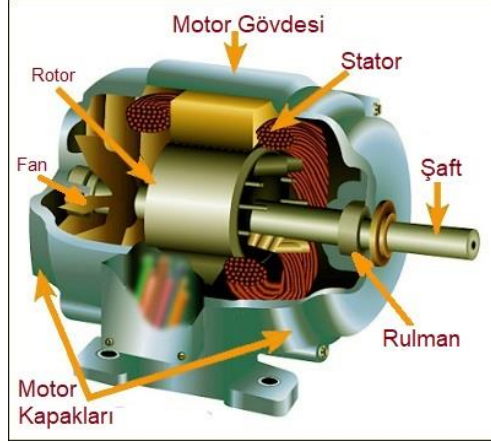


Şekil 2.12. Yakıt hücreli elektrikli aracın çalışma yapısı

2.1.2. Elektrik Motorları

Elektrikli araçların kalbinde elektrik motorları bulunmaktadır. Bu motorlar, enerji verimliliği yüksek olup temiz bir enerji kaynağından beslenirler. Geleneksel içten yanmalı motorların sunduğu performansı ve hızlanmayı sağlayabilmektedirler [15]. Elektrik motorları, EA'ların performansını ve enerji verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bileşenlerdir. Bu motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek aracın hareket etmesini sağlarlar. EA'larda genellikle DC (Doğru Akım) ve AC (Alternatif Akım) motorlar kullanılmaktadır.

DC motorlar, genellikle daha basit yapıları ve kolay kontrol edilebilirlikleri nedeniyle tercih edilirken, AC motorlar daha yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu sunarlar. AC motorlar, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. EA'larda kullanılan motorların verimliliği, aracın toplam enerji tüketimini ve dolayısıyla menzilini doğrudan etkiler. Bu nedenle, motor seçimi ve tasarımı, elektrikli araçların enerji verimliliği açısından büyük önem taşır [2].



Şekil 2.13. AC motorun yapısı

(Özek, 2020), elektrikli bir aracın genel performans simülasyonunu gerçekleştirirken, motor verimliliğinin araç performansına etkisini incelemişlerdir [1]. (Taci & Erdem 2018) EA'larda rejeneratif frenlemenin etkisi ve güç analizini yaparken, motorların enerji geri kazanımındaki rolünü değerlendirmişlerdir [2].

2.1.2.1. Doğru Akım (DC) Motorları

DC motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve genellikle daha basit yapıları ve kontrol edilebilirlikleri nedeniyle tercih edilen motor türleridir. Bu motorlar, EA'larda özellikle düşük hızlarda yüksek tork sağlama yetenekleri ile bilinirler [1].

DC motorların en önemli avantajlarından biri, hız kontrolünün kolay olmasıdır. Bu motorlar, gerilim değişiklikleri ile hız kontrolü sağlanabilen bir yapıya sahiptir. Bu özellik, elektrikli araçların farklı sürüş koşullarına hızlı bir şekilde adapte olabilmelerini sağlar [2]. Ayrıca, DC motorlar, rejeneratif frenleme sistemleri ile uyumlu çalışarak enerji geri kazanımını artırabilir [12]. Bu, EA'ların enerji verimliliğini artırarak menzilini uzatmasına yardımcı olur [16].

DC motorlar, çalışma prensiplerine göre fırçalı ve fırçasız olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Fırçalı DC motorlar, fırçaların yardımıyla akımın yönünü değiştirerek çalışır. Bu yapı, yüksek kalkış torku avantajı sağlarken; fırçanın zamanla aşınması nedeniyle düzenli bakım yapılması gerekmektedir. Öte yandan, fırçasız DC motorlar elektronik anahtarlama devreleri sayesinde çalışır; bu sayede yüksek verimlilik, düşük bakım ihtiyacı ve uzun ömür gibi özellikler sunar.

2.1.2.2. Alternatif Akım (AC) Motorları

AC motorlar, EA'larda yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu motorlar, genellikle daha karmaşık bir yapıya sahip olmalarına rağmen, daha iyi performans ve enerji verimliliği sağlamaktadır [2].

AC motorlar, özellikle yüksek hız ve güç gerektiren uygulamalarda üstün performans gösterirler. Bu motorlar, değişken frekans sürücüleri (DFS) ile kontrol edilerek hız ve tork ayarlamaları yapılabilir, bu da EA'ların farklı sürüş koşullarına uyum sağlamasına olanak tanır. Ayrıca, AC motorlar, rejeneratif frenleme sistemleri ile uyumlu çalışarak enerji geri kazanımını artırabilir, bu da EA'ların enerji verimliliğini artırarak menzilinizi uzatmasına yardımcı olur [12]. (Suvak, 2016), şehir içi sürüş çevrimlerinde TEA'ların simülasyonunu gerçekleştirirken AC motorların performansını analiz etmiştir [17].

AC motorlar ise genellikle senkron ve asenkron olmak üzere iki ana türe ayrılır. Senkron motorlar, rotorun stator tarafından üretilen manyetik alanla tam senkronize çalışması prensibi üzerine kuruludur. Bu sayede sabit hız ve hassas kontrol sağlanarak, özellikle proses kontrolü ve zamanlama gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bununla birlikte, senkron motorların düşük kalkış torku gibi dezavantajları da bulunabilir. Asenkron motorlar ise indüksiyon prensibine dayanır; rotor, stator alanının etkisi altında çalışırken hafif bir hız farkı oluşur. Her iki AC motor türü de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 2.1. Farklı tipteki motorların karakteristik özellikleri

Motor Türü	Çalışma Prensibi	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulama Alanları
DC Fırçalı Motor	Mekanik komütatör ve fırçalar aracılığıyla akım yön değiştirir	Yüksek kalkış torku, basit kontrol	Fırça ve komütatör aşınması, düzenli bakım gerektirir	Vinçler, küçük elektrikli araçlar, bazı ev aletleri
DC Fırçasız Motor	Elektronik anahtarlama ile çalışır	Yüksek verimlilik, düşük bakım, uzun ömür	Kontrol devresi maliyeti, daha karmaşık yapı	Otomotiv, robotik, havacılık, endüstriyel uygulamalar
AC Senkron Motor	Rotor, statorun oluşturduğu manyetik alanla senkronize çalışır	Sabit hız, hassas kontrol	Düşük kalkış torku, kontrol sistemi karmaşıklığı	Hassas proses kontrolü, zamanlama gerektiren uygulamalar
AC Asenkron Motor	İndüksiyon prensibiyle, rotor stator alanından faydalanır	Dayanıklı, basit yapı, düşük maliyet	Kayma nedeniyle verim düşüşü, hassas hız kontrolünde sınırlılık	Fan, pompa, genel endüstriyel makineler
Sürekli Mıknatıslı Motorlar	Alan, sabit mıknatıslar tarafından sağlanır.	Yüksek verimlilik, düşük enerji kaybı, hassas hız ve tork kontrolü.	Yüksek başlangıç maliyeti, mıknatısların sıcaklık ve çevresel koşullara duyarlılığı.	Elektrikli araçlar, robotik, havacılık, endüstriyel uygulamalar, ev aletleri.

2.1.3. Batarya Teknolojileri

Elektrikli ve hibrit araçlar gibi modern ulaşım araçları için batarya teknolojisi, aracın performansı, menzili ve şarj süreleri açısından kritik bir rol oynar. Bu teknoloji, enerji yoğunluğu, kapasite, ömür, güvenlik ve maliyet gibi birçok faktöre dayanarak sürekli gelişmekte ve yenilenmektedir. Batarya teknolojileri, EA'ların performansı, menzili ve enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan kritik bir bileşendir [18]. EA'larda yaygın olarak kullanılan batarya türleri arasında Lityum-İyon (Li-ion), Nikel Metal Hidrit (NiMH), Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄) ve Katı Hal bataryaları bulunmaktadır. Zhang,

rejeneratif frenleme sistemlerinin batarya verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir [15].

Tablo 2.2. Çeşitli tipte piller, enerji ve güç yoğunlukları [19].

Pil Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Çalışma Sıcaklığı
Li-ion	3,6	118-250	2000	-20, +60
NiMH	1,2	70-95	<3000	-20, +60
LiFePO ₄	3,2	120	>2000	-45, +70

2.1.3.1. Lityum-İyon (Li-ion) Bataryalar

Lityum-İyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürleri nedeniyle EA'larda en yaygın kullanılan batarya türüdür [9]. Bu bataryalar, hızlı şarj olabilme ve hafiflik gibi avantajlar sunar, ancak maliyetleri ve termal yönetim gereksinimleri gibi bazı dezavantajları vardır.

2.1.3.2. Nikel Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar

Nikel Metal Hidrit bataryalar ise daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, daha güvenli ve çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler.

2.1.3.3. Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄) Bataryalar

Lityum Demir Fosfat bataryalar, yüksek sıcaklıklarda kimyasal stabilite sunarak güvenlik açısından avantaj sağlar. Bu bataryalar, daha uzun ömür ve daha fazla şarj döngüsü sunar, ancak enerji yoğunlukları Li-ion bataryalara göre daha düşüktür.

2.1.3.4. Katı Hal Bataryaları

Katı Hal bataryaları ise, gelecekteki EA'lar için umut vadeden bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu bataryalar, daha yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik sunarken, daha hızlı şarj olabilme potansiyeline sahiptir [2].

2.1.4. Rejeneratif Frenleme

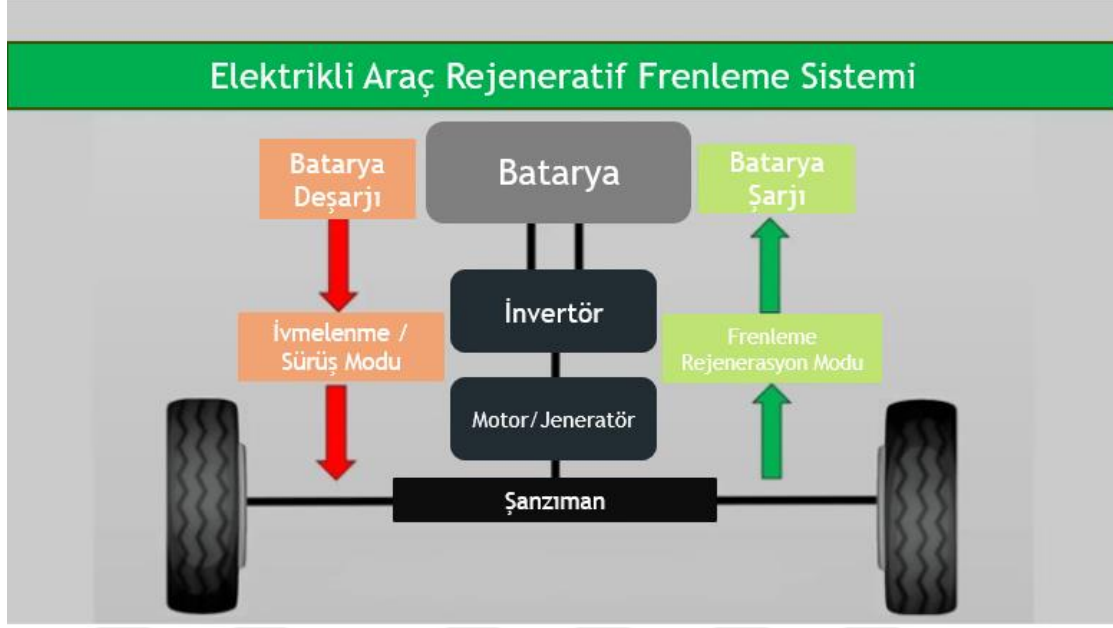
Rejeneratif frenleme, frenleme sırasında aracın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek bataryalara geri kazandıran bir sistemdir. Bu teknoloji, enerji tasarrufu sağlaması ve emisyonları azaltması açısından büyük önem taşımaktadır [20].

Rejeneratif frenleme teknolojisinin kökenleri, elektrikli trenlerde enerji geri kazanım sistemlerine dayanmaktadır. İlk örnekleri, 20. yüzyılın başlarında elektrikli tramvaylar gibi raylı sistemlerde görülmüştür. Bu sistemler, frenleme sırasında elektriği geri kazanarak enerji verimliliğini artırmayı hedeflemiştir [21]. Zaman içinde, teknolojik gelişmelerle birlikte rejeneratif frenleme, otomotiv sektörüne de adapte edilmiştir. 1990'ların sonları ve 2000'lerin başlarında hibrit araçların piyasaya sürülmesiyle, bu teknoloji daha geniş bir uygulama alanı bulmuş ve modern EA'larda standart bir özellik haline gelmiştir [5].

Rejeneratif frenleme, elektrikli ve hibrit araçların enerji verimliliğini artıran bir enerji geri kazanım yöntemidir. Sürüş sırasında motorlar, fren yapmak için kullanılan enerji ile motorun rotorunun döndürülmesi ile elektrik jeneratörü gibi davranarak kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür [22]. Bu yöntem, frenleme esnasında kaybedilen enerjinin bataryalara depolanmasını ve böylece enerjinin verimli bir şekilde yeniden kullanılmasını sağlar; aynı zamanda, araçların menzilini artırırken, fren sistemine binen yükü de azaltır. Rejeneratif frenleme sistemleri, elektrik motorunun kontrol edilebilen özellikleri ile çalışarak, sadece hareket enerjisini geri kazanmakla kalmaz, aynı zamanda frenleme performansını da iyileştirir [21].

2.1.4.1. Rejeneratif Frenleme Sistemleri

Rejeneratif frenleme sistemleri, genellikle kombinasyon halinde çalışan bir motor sürücüsü ve kontrol sistemi içerir. Bu sistemler, elektrik motorlarının çalışma modunu frenleme sırasında geri kazanım moduna geçirecek şekilde yönetir [9]. Motor, frenleme sırasında rotorunu döndürerek kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmekte ve bunu bataryalarda depolamaktadır [5].



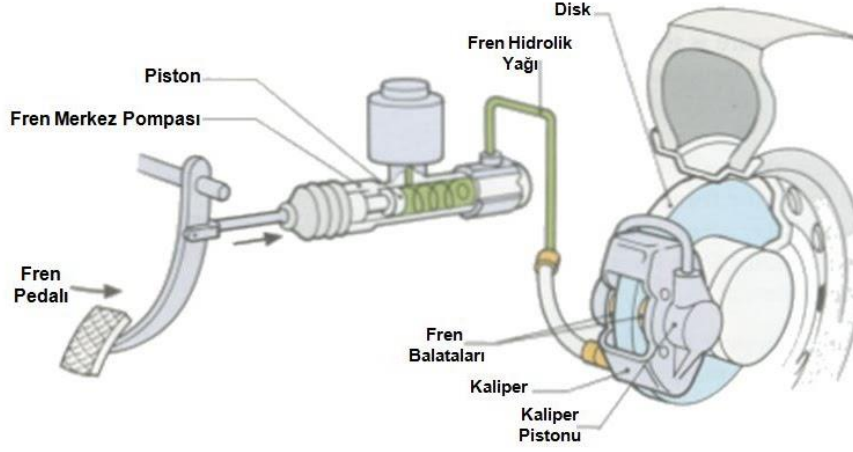
Şekil 2.14. Rejeneratif frenlemenin mimarisi

Bu tür sistemler, genellikle gelişmiş kontrol algoritmaları kullanarak motorun doğru şekilde yönetilmesini ve enerjinin maksimum verimlilikle geri kazanılmasını sağlar [23]. Rejeneratif frenleme sistemleri, bir dizi sensör ve kontrol mekanizması ile entegre edilerek, aracın hızını ve frenleme gereksinimlerini sürekli izleyerek optimal enerji geri kazanımını sağlamaktadır [12]. Bu sistemler, EA'ların enerji verimliliğini artırarak, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır [24]. Rejeneratif frenleme sistemlerinin etkinliği, farklı yol ve trafik koşullarında değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, sistemlerin performansı, çeşitli sürüş çevrimleri ve koşulları altında test edilerek optimize edilmektedir [17]. Bu optimizasyon süreci, EA'ların farklı yol çevrimlerinde daha verimli çalışmasını sağlamakta ve enerji tasarrufunu maksimize etmektedir.

2.1.4.2. Geleneksel Frenleme ile Farklılıkları

Geleneksel frenleme sistemleri, genellikle mekanik ve hidrolik sistemler kullanarak frenleme gücünü doğrudan tekerleklere iletirken, rejeneratif frenleme, elektrik motorunun geri dönüşüm yeteneklerini kullanarak kinetik enerjiyi elektriğe çevirir ve bataryalara depolar [25]. Geleneksel sistemler, fren pedalına basıldığında aracın kinetik enerjisinin ısıya dönüşmesine ve dolayısı ile balata aşınmanın artmasına neden olurken, rejeneratif frenleme enerji kaybını minimize eder ve motorun verimliliğini artırır. Rejeneratif sistem,

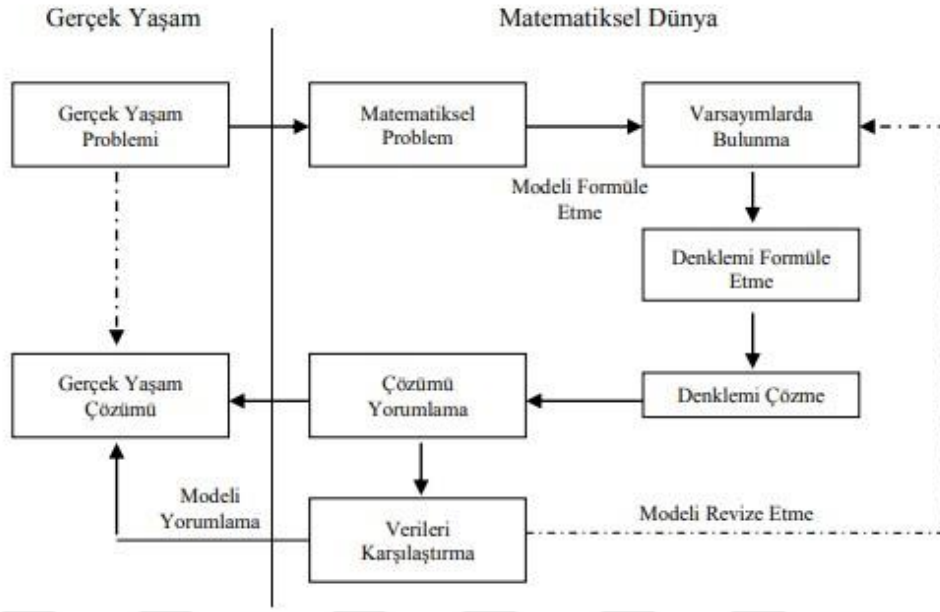
frenleme sırasında araç hızını kontrol etmenin yanı sıra, fren süresini uzatarak fren sistemindeki elemanların ömrünü uzatır ve çevresel etkiyi azaltarak enerji tasarrufu sağlar; bu yönüyle, bataryada enerji tasarrufu ve emisyon azaltımına katkıda bulunur [23].



Şekil 2.15. Geleneksel kampanalı fren çalışma prensibi

2.1.5. Dinamik Modelleme Yöntemleri

Dinamik modelleme yöntemleri, fiziksel sistemlerin zaman içindeki davranışlarını matematiksel modeller kullanarak analiz etme ve simülasyon yapma sürecidir [25]. Bu yöntemler, mühendislik ve bilim dallarında sistemlerin dinamik yanıtlarını tahmin etmek, kontrol stratejilerini değerlendirmek ve tasarım süreçlerini optimize etmek için yaygın olarak kullanılır [1]. Dinamik modelleme, sistemlerin diferansiyel denklemler veya durum uzayı gösterimleri gibi matematiksel formülasyonlara dayalı olarak temsil edilmesiyle gerçekleştirilir [26]. EA'ların enerji tüketimini, hızlanma ve frenleme performansını, batarya durumunu ve diğer önemli parametreleri analiz etmeye olanak tanır. Bu tür modelleme, araçların farklı yol çevrimlerinde nasıl performans gösterdiğini anlamak için kritik öneme sahiptir [17]. Modelleme sürecinde, sistemin parametrik özelliklerini belirlemek için gerçek dünya verileri kullanılır ve modellerin doğruluğu, simülasyon sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması yoluyla doğrulanır.



Şekil 2.16. Matematiksel Modelleme Süreci [26].

2.1.6. Sürüş Çevrimleri

Sürüş çevrimleri, araçların farklı sürüş koşullarında nasıl performans gösterdiğini anlamak için kullanılan test prosedürleridir. Bu çevrimler, araçların enerji tüketimini, emisyonlarını ve genel performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir [18]. Ayrıca bir aracın şehir içi, şehirler arası ve kırsal koşulları gibi çeşitli sürüş koşullarını simüle etmek için tasarlanmıştır. Her bir sürüş çevrimi genellikle hız, ivmelenme, yavaşlama ve duraklama gibi fazları içeren farklı zaman dilimlerini kapsar [24].

2.1.6.1. Standart Yol Test Döngüsü 1 (SORT-1)

SORT-1, özellikle otobüsler için geliştirilmiş bir Avrupa sürüş çevrimidir ve şehir içi sürüş koşullarını simüle eder. Düşük hızlarda sık duraklamaları içerebilir ve bu da rejeneratif frenleme potansiyelini artırır [2]. Ani ivmelenme ve düşük maksimum hızlar tipiktir.

2.1.6.2. Standart Yol Test Döngüsü 2 (SORT-2)

SORT-2, şehir merkezlerine yakın alanlarda veya yavaş akan trafiğin olduğu bölgelerde bir otobüsün sürüş çevrimini temsil eder. Bu çevrim, SORT-1'e göre biraz daha yüksek

hızlar içerir ancak yine de sık dur-kalk bölgeleri bulunur. Yavaş ivmelenme hızları ve daha az sıklıktaki duraklamalar karakteristiktir.

2.1.6.3. Standart Yol Test Döngüsü 3 (SORT-3)

SORT-3, genellikle banliyö veya şehirlerarası yollar için tipik olan daha yüksek hızları ve daha az sık duraklamaları simüle eder. Özellikle yüksek hızlarda ve daha az dur-kalk içeren şehirlerarası ve otoyol sürüş koşullarını simüle eder. SORT seri çevrimleri arasında en hızlısı olup, daha uzun mesafeler arasında sabit hızda seyahat eder.

2.2. Araştırmayla İlgili Günümüze Kadar Yapılan Benzer Çalışmalar

Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda, (Özek, 2020) tarafından yapılan çalışmada prototip elektrikli bir aracın matematiksel modeli oluşturulmuş, taşıt parametreleri belirlenmiş ve Avrupa Yeni Sürüş Döngüsü (NEDC) yol koşullarında MATLAB/SIMULINK ortamında simülasyon gerçekleştirilmiştir. Tasarımın doğrulanabilmesi için aracın imalatı gerçekleştirilmiş ve üç elektrik motoru ile tahrik edilen bir taşıt üretilmiştir. Çalışmada, farklı tahrik sistemlerinin (Dört tekerlekten çekiş, Arkadan itiş, Önden çekiş) performansları karşılaştırılmış ve dört tekerlekten çekiş sisteminin daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, taşıtın motor performansına etki eden faktörler incelenmiştir.

(Taci & Erdem 2018) tarafından yapılmış bir çalışmada EA'larda rejeneratif frenlemenin etkisi ve güç analizi incelenmiştir. Araştırmalarını, 75 kW AC asenkron motor ve 25 kW kurşun asit bataryaya sahip bir EA modeli üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonu NEDC, Kentsel Dinamometre Sürüş Programı (UDDS) ve Yüksek Hız ve Yüksek Hızlanma Döngüsü (US06) çevrimlerinde gerçekleştirmişlerdir. Farklı eğim koşullarında frenleme sırasında motor ve batarya sistemleri üzerindeki enerji akışları analiz edilmiştir. Rejeneratif frenleme ile bataryalara enerji sağlandığı ve özellikle yokuş aşağı eğimlerde daha fazla enerjinin depolandığı gösterilmiştir. Ayrıca, rejeneratif frenlemenin menzile katkısı incelenmiş ve ortalama %9 oranında menzile artışı sağlandığı görülmüştür.

(Biliroğlu, 2009) tarafından yapılan bir çalışmada şehir içi toplu taşımacılıkta kullanılmak üzere tasarlanan seri hibrit elektrikli bir otobüsün modellenmesi, kontrolü ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, MATLAB/Simulink ortamında

aracın modeli oluşturulmuştur. Ayrıca, hibrit elektrikli araçta ECE ve CBD çevrimlerinde performans ve verimlilik gibi parametreler değerlendirilmiştir. Rejeneratif frenleme gibi enerji geri kazanım yöntemleri de ele alınmış ve değerlendirilmiştir.

(Barın, 2023) tarafından seçilen E sınıf elektrikli SUV üzerinde, farklı sürüş çevrimleri (şehir, otoyol ve hibrit) altında rejeneratif frenlemenin enerji geri kazanım oranını detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Hesaplamalar; hız, ivme, motor hızı, çekiş ve frenleme enerjileri gibi parametreler üzerinden yapılarak, frenleme/çekiş oranları belirlenmiştir. Sonuçlar, şehir içi sürüşlerde rejeneratif frenlemenin daha verimli olduğunu, otoyol koşullarında ise bu verimin önemli ölçüde düştüğünü göstermiştir.

(Suvak, 2016), yapmış olduğu çalışmada elektrikli bir aracın MATLAB üzerinde modellenmesini ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelde, aracın hareketini sağlamak için bir DC motor ve enerji kaynağı olarak yeterli kapasiteye sahip bir batarya kullanılmıştır. Simülasyon, UDSS hız çevrimi kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, elektrik motorunun tork, güç ve akım değişimleri belirlenmiştir.

Günümüze kadar yapılan mevcut araştırmalara bakıldığında elektrikli bir şehir içi otobüsün farklı sürüş çevrimlerine göre yeterince incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmada elektrikli bir şehir içi otobüsün SORT-1, SORT-2, SORT-3 ve İstanbul topografyasını/yol koşullarını simüle eden 3 farklı (55T, 59N ve 99A) sürüş çevrimlerindeki performans değerleri ve rejeneratif frenleme ile kazanılan enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar yapılırken sürüş çevrimleri farklı sürücü karakteristikleri ile değerlendirilmiştir. Elektrikli bir otobüste sürüş çevrimlerinin rejeneratif enerji kazanımına etkisi incelenmiştir. En iyi koşullar belirlenerek, İstanbul'da elektrikli otobüslerin kullanılması durumunda hangi hatların tercih edilmesi gerektiğine yönelik önerilerde bulunulmuştur.

3. MATERYAL ve METOD

Bu bölümde, elektrikli bir otobüsün farklı yol çevrimlerindeki rejeneratif frenleme performansını değerlendirmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında bir dinamik model geliştirilmiştir. İlk olarak, otobüsün teknik özellikleri ve rejeneratif frenlemede etkili olan batarya parametreleri belirlenmiş ve bu parametreler kullanılarak sanal bir model oluşturulmuştur. Model, SORT ve İstanbul otobüs hatlarından alınan hız bilgileriyle oluşturulan sürüş çevrimleri gibi farklı sürüş koşullarını simüle edecek şekilde yapılandırılmıştır. Simülasyonlar aracılığıyla bu çevrimlerdeki frenleme süreci, geri kazanılan enerji miktarı ve batarya durumu gibi parametreler analiz edilerek, rejeneratif frenlemenin farklı sürüş çevrimlerindeki etkinliği incelenmiştir. Elde edilen bulgular, elektrikli otobüslerin enerji verimliliğini artırmaya yönelik öneriler geliştirmek amacıyla değerlendirilmiştir. Bu sayede, fiziksel deneye ihtiyaç duymadan, teorik bilgiler ile enerji tasarrufu ve çevresel etkileri artırmaya yönelik bulgular elde edilmiştir.

3.1. Araç Parametreleri

Modellenen elektrikli otobüsün teknik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu özellikler, aracın genel tasarımını, enerji verimliliğini ve kullanıcı deneyimini etkileyen önemli unsurları içerir.

Tablo 3.1. Elektrikli otobüsün teknik özellikleri

Parametre	Birim	Değer
Uzunluk (L)	mm	12000
Genişlik (W)	mm	2550
Yükseklik (H)	mm	3500
Boş Kütlesi	kg	12000
Yüklü Araç Kütlesi	kg	19000
55T Araç Kütlesi	kg	13095
59N Araç Kütlesi	kg	14047
99A Araç Kütlesi	kg	12687
Projeksiyon Alanı	m ²	8,925
Transmisyon	-	6,2
Teker Yarıçapı	m	0,48

Aracın toplam kütlesi, ECE R107 regülasyonunda belirtilen yolcu ve şoförün kütlelerine göre hesaplanmaktadır. Bu regülasyona göre, her bir yolcunun ağırlığı 68 kg, şoförün

ağırlığı ise 75 kg olarak kabul edilir. Dolayısıyla aracın toplam kütlesi, araçtaki yolcu kapasitesine bağlı olarak bu standarttaki belirtilen değerlere göre belirlenmiştir.

Tablo 3.2. Elektrikli otobüsün batarya parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Batarya Kapasitesi	kWh	278
Batarya Gerilim	V	618,24
Batarya İç Direnci	Ohm	0,1
Batarya Verimliliği	-	0,96
Kapasite	Ah	450

3.2. Gerçek Sürüş Verilerinin Toplanması

Bu bölümde, elektrikli otobüslerin rejeneratif frenleme performansını daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmek amacıyla İstanbul'daki üç farklı otobüs hattında saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçek sürüş verilerini oluşturabilmek için otobüslerin çeşitli trafik ve yol koşulları altında hız-zaman davranışları ve yükseklik değişimleri ölçülmüştür. Ölçümler sırasında hız, yükseklik ve zaman parametreleri kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak hız çevrimleri oluşturulmuştur.

Toplanan veriler, farklı trafik yoğunlukları ve yol eğimleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiş ve MATLAB/Simulink ortamında hazırlanan modelde kullanılmıştır. Bu süreç, literatürde yaygın olarak kullanılan standart sürüş çevrimleri ile gerçek yol verilerinin karşılaştırılmasına imkân tanımış, böylece rejeneratif frenlemenin farklı senaryolardaki etkisi daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bu bölümde, kullanılan ölçüm yöntemleri, seçilen otobüs hatlarının özellikleri, veri analiz süreçleri detaylı olarak ele alınmıştır.

3.2.1. Ölçüm Yöntemi ve Kullanılan Cihazlar

Bu çalışmada, gerçek yol verilerini toplamak amacıyla otobüslerin içinde Racelogic VBox veri kaydedici kullanılarak uydudan hız ve yükseklik bilgileri kaydedilmiştir. Cihaz, her saniyede bir hız verisi kaydetme kapasitesine sahiptir. Ölçümler, otobüslerin hız profillerini, eğim değişimlerini ve dur-kalk davranışlarını doğru şekilde analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Ölçüm alınan VBox Cihazı

Veri kaydı sırasında aşağıdaki parametreler ölçülmüştür:

Hız (km/h): Anlık hız değerleri, otobüsün hareket dinamiklerini belirlemek için kaydedilmiştir.

Yükseklik (m): Yol eğimi ve rejeneratif frenleme performansına etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır.

Zaman (s): Verilerin zamana göre değişimini belirlemek için kaydedilmiştir.

Ölçümler, her otobüs hattında aracın başlangıç durağından son durağına kadar geçen sürede alınmıştır. Ölçümler güneşli hava koşullarında gerçekleştirilmiş olup, her hattaki ortalama yolcu sayısı şu şekildedir:

55T (Gaziosmanpaşa-Taksim): Durak başı ortalama 15 yolcu

99A (Gaziosmanpaşa-Eminönü): Durak başı ortalama 10 yolcu

59N (Fatih Sultan Mehmet-Şişli): Durak başı ortalama 28 yolcu



Şekil 3.2. Hız verisi alınan 12 m uzunluğundaki belediye otobüsü

3.2.2. İstanbul'daki Seçilen Otobüs Hatları

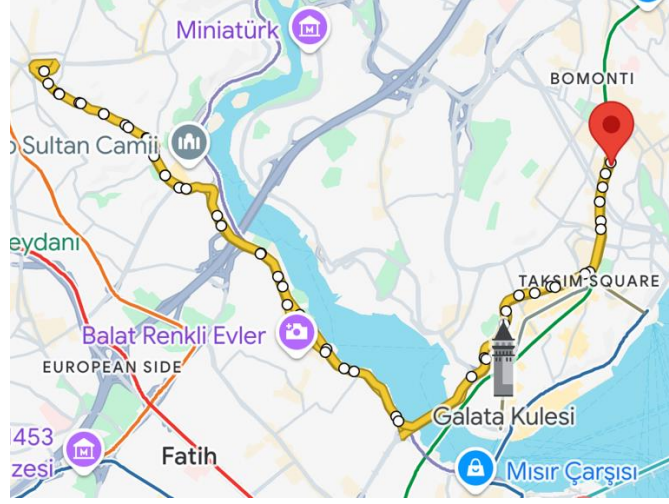
Gerçek sürüş çevrimlerini belirlemek için İstanbul'daki üç farklı otobüs hattında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Seçilen hatlar, farklı yol ve trafik karakteristiklerini temsil edecek şekilde belirlenmiştir:

Tablo 3.3. Seçilen otobüs hatlarının karakteristik özellikleri

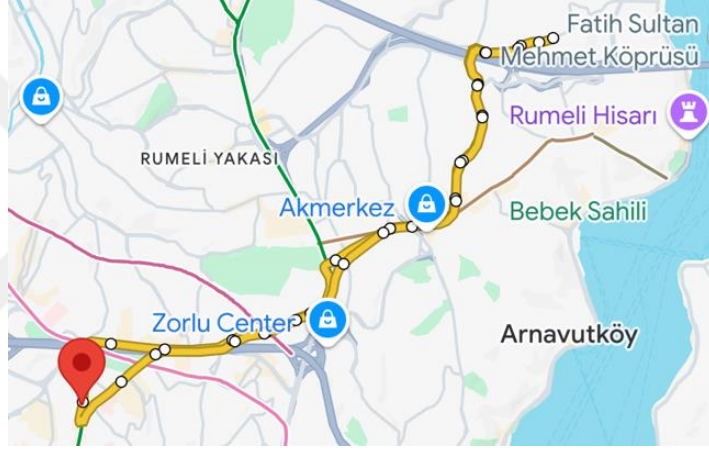
Hat	Toplam Mesafe (km)	Yol Profili	Ölçüm Saati	Güzergah Şekli
55T	9,1	Yokuş aşağı, düz ve yokuş yukarı	08:00-09:00	Şehir içi, orta trafik yoğunluğu
59N	6,35	Nispeden düz	16:00-17:00	Yoğun trafik ve sık dur-kalk
99A	6,39	Düz, virajlı ve yokuş yukarı	08:00-09:00	Daha az dur-kalk

Tablo 3.4. Veri alınan otobüs hatlarının duraklara göre yolcu sayısı

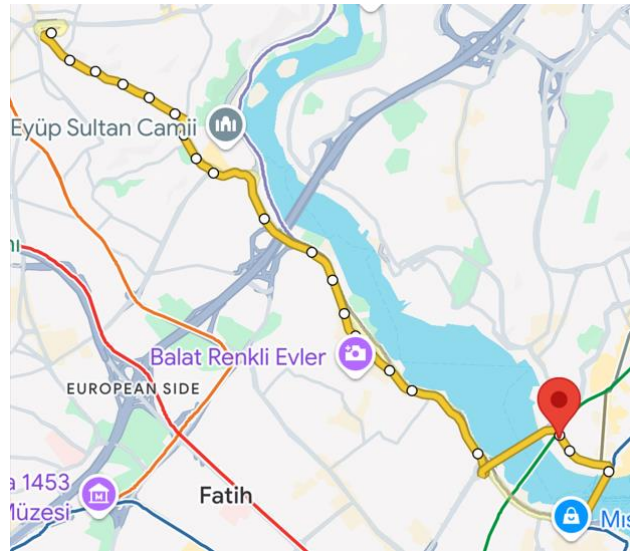
55T			
Durak No.	Yolcu Sayısı	Durak No.	Yolcu Sayısı
1	10	13	19
2	10	14	21
3	10	15	23
4	10	16	27
5	10	17	27
6	10	18	19
7	12	19	17
8	12	20	18
9	18	21	18
10	18	22	18
11	18	23	5
12	18	24	5
		25	5
		Ortalama Yolcu	≈ 15
59N			
Durak No.	Yolcu Sayısı	Durak No.	Yolcu Sayısı
1	8	9	45
2	13	10	40
3	18	11	37
4	24	12	34
5	33	13	35
6	34	14	34
7	37	15	26
8	40	16	17
		17	17
		Ortalama Yolcu	≈ 29
99A			
Durak No.	Yolcu Sayısı	Durak No.	Yolcu Sayısı
1	7	9	8
2	8	10	10
3	8	11	11
4	8	12	10
5	10	13	10
6	10	14	9
7	10	15	9
8	9	16	9
		17	9
		Ortalama Yolcu	≈ 9



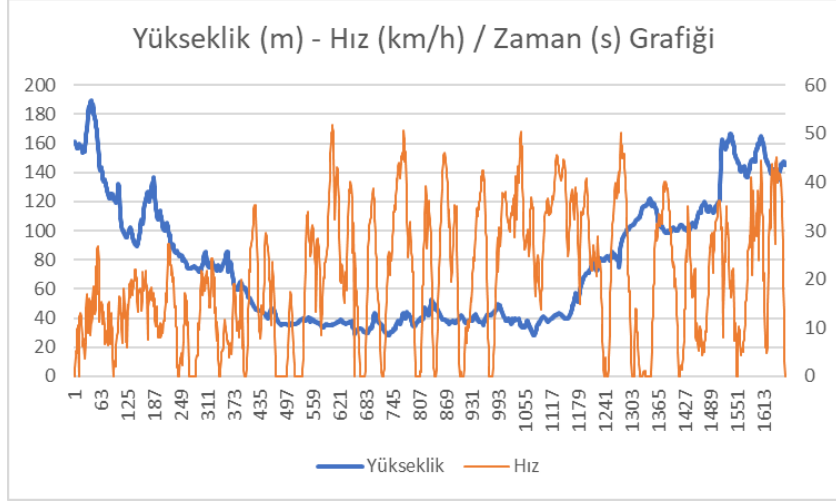
Şekil 3.3. 55T hat güzergahı



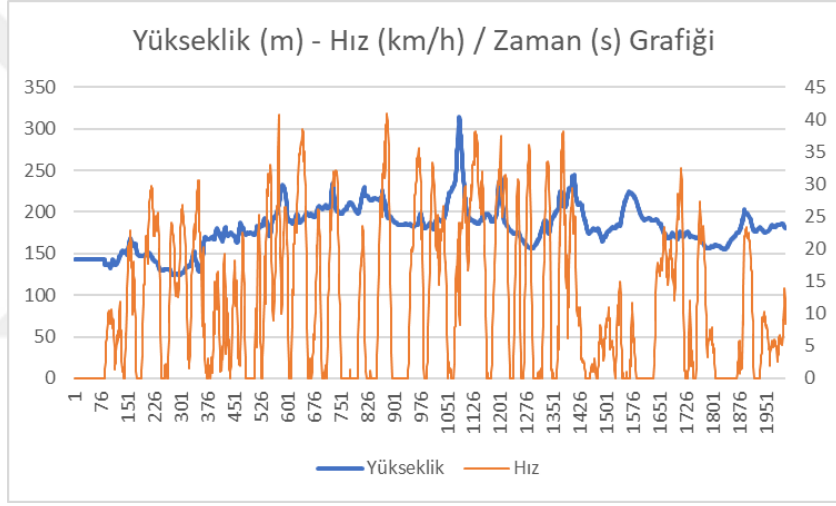
Şekil 3.4. 59N hat güzergahı



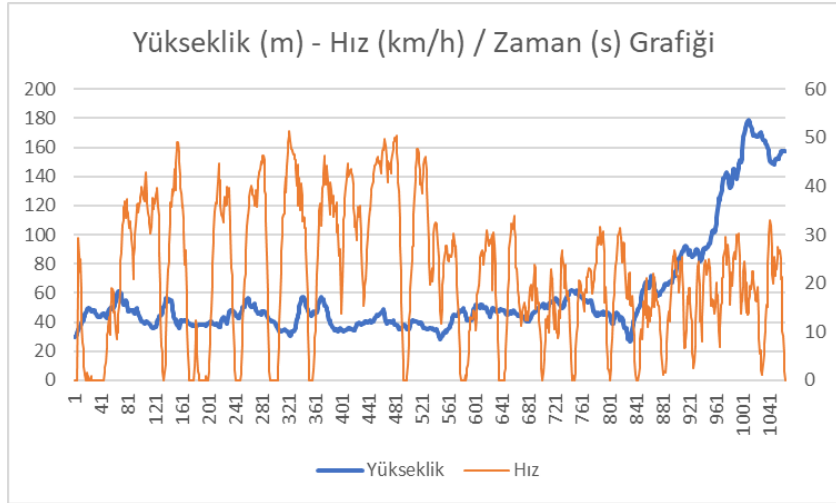
Şekil 3.5. 99A hat güzergahı



Şekil 3.6. 55T sürüş çevriminin Yükseklik-Hız/Zaman grafiği



Şekil 3.7. 59N sürüş çevriminin Yükseklik-Hız/Zaman grafiği



Şekil 3.8. 99A sürüş çevriminin Yükseklik-Hız/Zaman grafiği

55T hattı yokuş aşağı, düz ve yokuş yukarı seyreden bir yola sahiptir. Yol boyunca izlenen yükseklik değişimi “Şekil 3.6.’da” gösterilmiştir.

59N hattı çoğunlukla eğimin az olduğu düz bir yola sahiptir. Yol boyunca izlenen yükseklik değişimi “Şekil 3.7.’de” gösterilmiştir.

99A hattı nispeten düz, virajlı ve yokuş yukarı seyreden bir yola sahiptir. Yol boyunca izlenen yükseklik değişimi “Şekil 3.8.’de” gösterilmiştir.

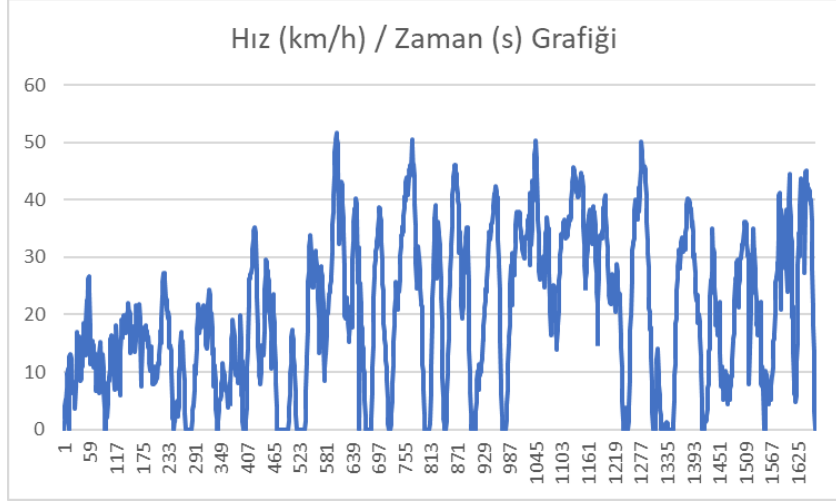
Bu hatların seçilme nedeni, farklı trafik yoğunlukları ve farklı yol eğimlerinin rejeneratif frenleme performansına olan etkilerini incelemek içindir.

Tablo 3.5. Veri alınan otobüs hatlarının başlangıç ve bitiş yükseklik değerleri

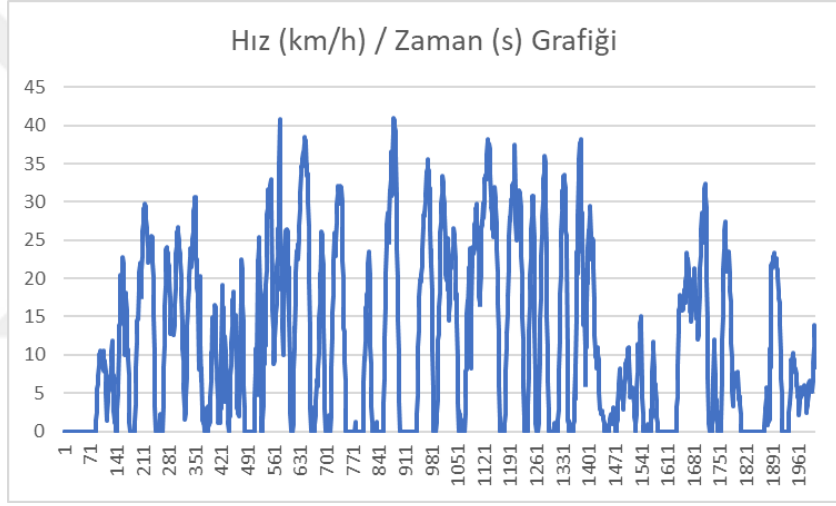
Hat	Başlangıç Noktası Yükseklik (m)	Bitiş Noktası Yükseklik (m)	Fark (m)
55T (Gaziosmanpaşa-Taksim)	161,25 m	145,2 m	-16,05 m
59N (Fatih Sultan Mehmet-Şişli)	143,67 m	180,4 m	+36,73 m
99A (Gaziosmanpaşa-Eminönü)	29,99 m	157,49 m	+127,5 m

3.2.3. Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

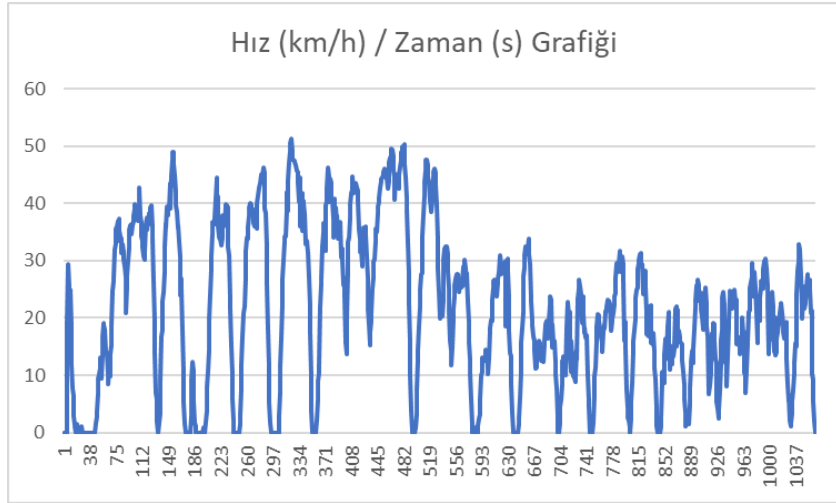
Ölçümler sonucunda elde edilen hız verileri, MATLAB ortamında işlenerek her hat için ayrı bir sürüş çevrimi oluşturulmuştur. Verilerin analizi şu adımlarla gerçekleştirilmiştir: Veri temizleme ve senkronizasyon ile hatalı veya eksik veriler ayıklanmıştır. Hız, yükseklik ve zaman verileri senkronize edilmiştir. Hız çevrimlerinin oluşturulması için toplanan ham veriler kullanılarak hız profilleri çıkarılmıştır. Trafik yoğunluğu ve yol eğimlerinin hız profiline etkileri değerlendirilmiştir. Ölçülen veriler, VBox Setup programına aktarılmış ve buradan okunmuştur. Hız-zaman verileri Excel ortamına taşınarak listelenmiştir. Excel’de oluşturulan hız (km/h) - zaman (s) grafikleri, Simulink programı içindeki sürüş çevrimi bloğuna aktarılmış ve hız çevrimleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. 55T sürüş çevriminin Hız/Zaman grafiği



Şekil 3.10. 59N sürüş çevriminin Hız/Zaman grafiği



Şekil 3.11. 99A sürüş çevriminin Hız/Zaman grafiği

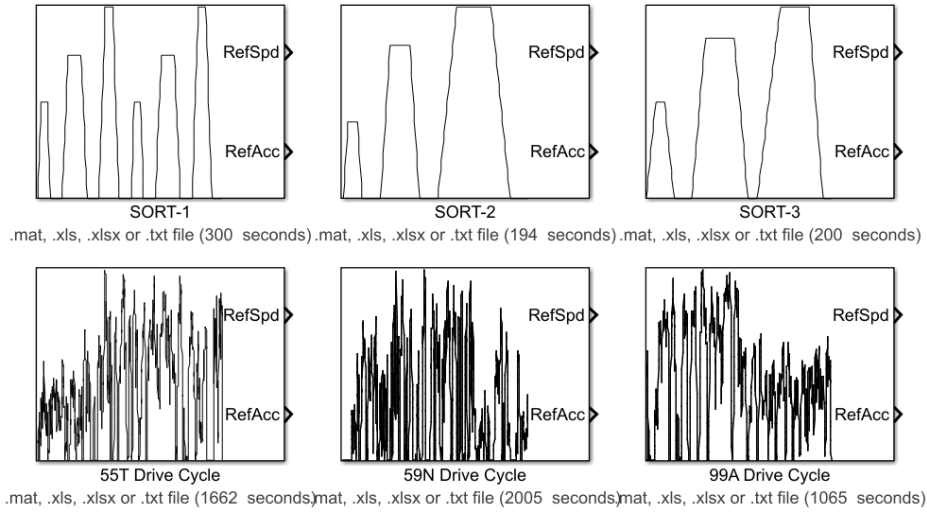
Bu analizler sonucunda, İstanbul'daki bazı otobüs hatlarının karakteristik hız profilleri çıkarılmış ve bir sonraki adımda rejeneratif frenlemenin farklı yol koşullarında nasıl değiştiğini değerlendirme imkânı olmuştur.

3.3. Elektrikli Otobüsün Modellenmesi

Elektrikli otobüsün modellenmesi, aracın dinamik performansını ve enerji tüketimini öngörmek için gerekli olan karmaşık sistemlerin dijital bir temsilinin oluşturulması sürecini ifade eder. Bu modelleme, otobüsün güç aktarma organları, batarya yönetim sistemi, rejeneratif frenleme mekanizmaları ve aerodinamik özellikler gibi kritik bileşenlerinin matematiksel ve simülasyon tabanlı yöntemlerle detaylandırılmasını içermektedir. Bu modelleme, MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu sayede farklı sürüş koşulları altında otobüsün davranışını belirleme ve performans optimizasyonu sağlama imkânı oluşturmuştur. Bu çalışmanın konusu olan elektrikli otobüs modeli; dinamik, transmisyon, elektrik motoru, batarya sistemi ve SoC alt modellerinden oluşturulmuştur.

3.3.1. Sürüş Çevriminin Oluşturulması

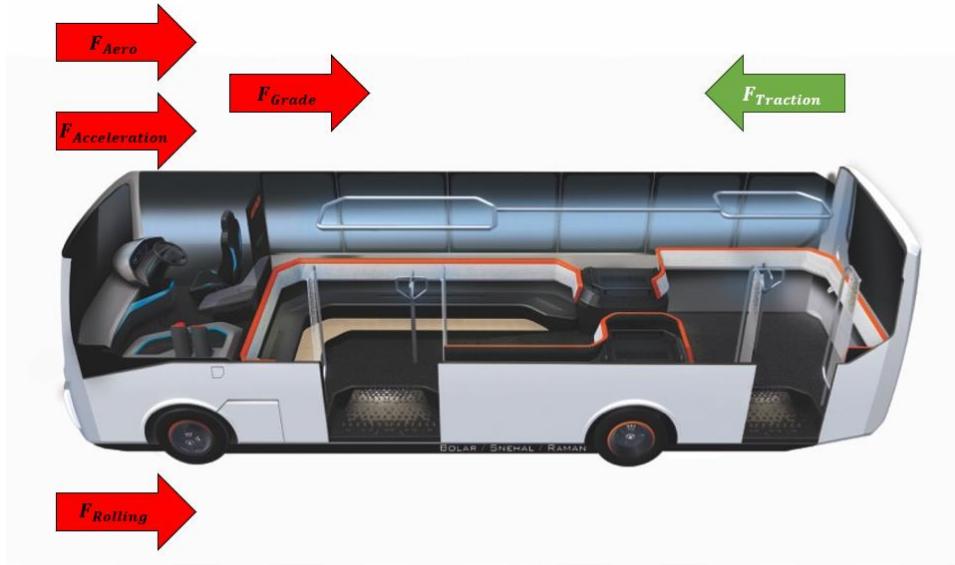
Modellemesi tamamlanan elektrikli otobüsün kullanılacağı 55T, 59N ve 99A güzergahları ile SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 sürüş çevrimleri MATLAB/Simulink üzerinde oluşturulmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda sürüş çevrimleri önce Excel ortamında düzenlenmiş daha sonra da MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. Bu çevrimlerde elektrikli otobüsün gerekli hızlanma, sabit hızla ilerleme, yavaşlama ve durma noktaları tanımlanmıştır. MATLAB/Simulink ortamına yüklenen yol modelleri Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. MATLAB/Simulink’de oluşturulan sürüş çevrimleri

3.3.2. Dinamik Model

Dinamik model başlığı altında aşağıdaki Şekil 3.13.’de belirtilen kuvvetler doğrultusunda net kuvvet denklemi oluşturularak, aracın maruz kaldığı kuvvetlerin denklemleri MATLAB/Simulink ortamında modellenerek aracın dinamik modeli oluşturuldu.



Şekil 3.13. Elektrikli otobüsün hareketiyle birlikte oluşan kuvvetler

Aracın üzerindeki kuvvetler formülleştirilerek aşağıdaki denklem dizisi oluşturulmuştur.

Araç dinamiğinde, bir aracın boylamsal hareketi Newton'un ikinci yasası ile açıklanır [29]. Bu bağlamda net kuvvet aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sum F = m \cdot a \quad (1)$$

Burada m [kg] aracın kütlesi, a [m/s²] ise ivmesidir. Aracın hareketine etki eden temel kuvvetler; çekiş kuvveti $F_{Traction}$ [N], yuvarlanma direnci $F_{Rolling}$ [N], aerodinamik sürüklenme F_{Aero} [N] ve eğim direncidir F_{Grade} [N]. Bu kuvvetler göz önüne alındığında net kuvvet şu şekilde yazılır:

$$F_{Traction} - F_{Rolling} - F_{Aero} - F_{Grade} = F_{Acceleration} \quad (2)$$

Söz konusu kuvvetler tek tek ele alındığında, aşağıdaki gibi tanımlanırlar.

$$F_{Rolling} = f \cdot m \cdot g \quad (3)$$

Burada f yuvarlanma direnç katsayısını, g [m/s²] ise yerçekimi ivmesini göstermektedir.

$$F_{Aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Air} \cdot c_d \cdot A \cdot v^2 \quad (4)$$

Burada ρ_{Air} [kg/m³] havanın yoğunluğu, c_d sürüklenme katsayısı, A [m²] aracın ön kesit alanı ve v [km/h] hızdır.

$$F_{Grade} = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (5)$$

Burada θ yolun eğim açısını ifade eder. Eğimin negatif olduğu anlarda $-\theta$ uygulanır.

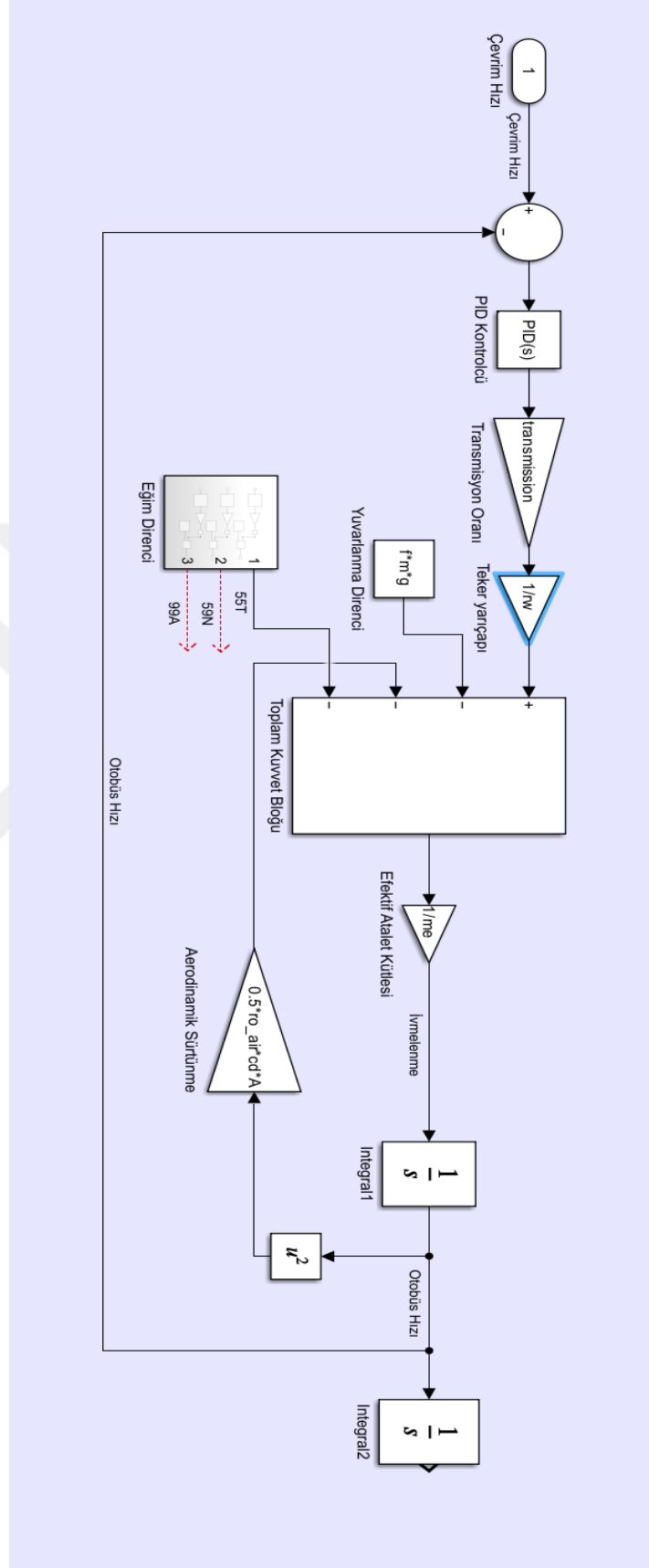
$$F_{Acceleration} = \lambda \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

Burada $\frac{dv}{dt}$ aracın boylamsal hızının zamana göre türevi (ivme) olup, λ çarpanı jant ve lastik gibi dönen kütlelerin atalet etkisini yaklaşık olarak hesaba katmak için kullanılan bir katsayıdır [30]. **1,02** olarak kabul edilmiştir.

Bu tanımlarla birlikte, net kuvvet denkliği aşağıdaki gibi elde edilir:

$$F_{Traction} - f \cdot m \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho_{Air} \cdot c_d \cdot A \cdot v^2 - m \cdot g \cdot \sin \theta = 1.02 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Bu denklem, bir aracın boylamsal hareketinde çekiş kuvveti, yuvarlanma direnci, aerodinamik sürüklenme ve eğim etkisi gibi kuvvetlerin nasıl dengelendiğini ve sonuçta aracın ivmesini nasıl belirlediğini göstermektedir. Bu denklem dizisi MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak Şekil 3.14.'deki gibi modellenmiştir.



Şekil 3.14. MATLAB/Simulink’de oluşturulan araç dinamik modeli

Bu modelde ilk olarak sürüş çevriminden gelen hedef hız bilgisi, bir PID kontrolcüsünden geçerek motor torkunu veya gaz pedalını düzenleyen bir sinyal üretir. Bu sinyal, şanzıman bloğuna iletilerek uygun dişli oranı seçilir ve tekerleklere aktarılan tork hesaplanır. Tekerleklere uygulanan tork, araç kütlesi, yuvarlanma direnci, aerodinamik sürüklenme ve yol eğimi gibi dış kuvvetlerle birlikte değerlendirilerek aracın ivmesi bulunur. İvme değeri, hız ve konum bilgisine ulaşmak için sırasıyla birleştirilmiş integratör bloklarından geçirilir. Elde edilen hız değeri, hem görüntüleme amaçlı kullanılır hem de PID kontrolcüsüne geri besleme olarak dönerek kapalı döngü kontrolünü oluşturur. Bu sayede model, sürücü talebinden aracın hız ve ivme çıktısına kadar olan tüm süreci kapsayan bir araç dinamiği simülasyonu sunar.

3.3.3. Transmisyon Modeli

Elektrikli otobüsün transmisyon (şanzıman) modellemesi, aracın tahrik sisteminin performansını analiz etmek için önemlidir. Bu modellemede, elektrik motorunun tork değişimi üzerine yoğunlaşılır. Elektrikli otobüsün transmisyon modeli için motor torku, gücü ve dönme hızı sırasıyla aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

Aşağıdaki her bir denklem, araç güç aktarım mekanizmasındaki temel değişkenleri tanımlamaktadır.

Araç dinamiğinde çekiş kuvveti $F_{Traction}$ [N] ile tekerlek torku τ_w [Nm] arasındaki ilişki, tekerlek yarıçapı göz önüne alınarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [29].

$$F_{Traction} \cdot r_w = \tau_w \quad (8)$$

Motor torku τ_M [Nm] ile tekerlek torku τ_w [Nm] arasındaki bağlantı, şanzıman ve diferansiyel gibi güç aktarım organlarının toplam dişli oranı üzerinden aşağıdaki gibi verilir:

$$\tau_M \cdot i_{top} = \tau_w \quad (9)$$

Tekerleğin açısal hızı veya devri n_w ise araç hızı V [km/h] ve tekerlek yarıçapı r_w [m] kullanılarak belirlenir. Tekerleğin dakikadaki devir sayısı [rpm] cinsinden ifade edildiğinde,

$$n_w = \left(\frac{V}{\frac{r_w}{2 \cdot \frac{\pi}{60}}} \right) = \left(\frac{30 \cdot V}{\pi \cdot r_w} \right) \quad (10)$$

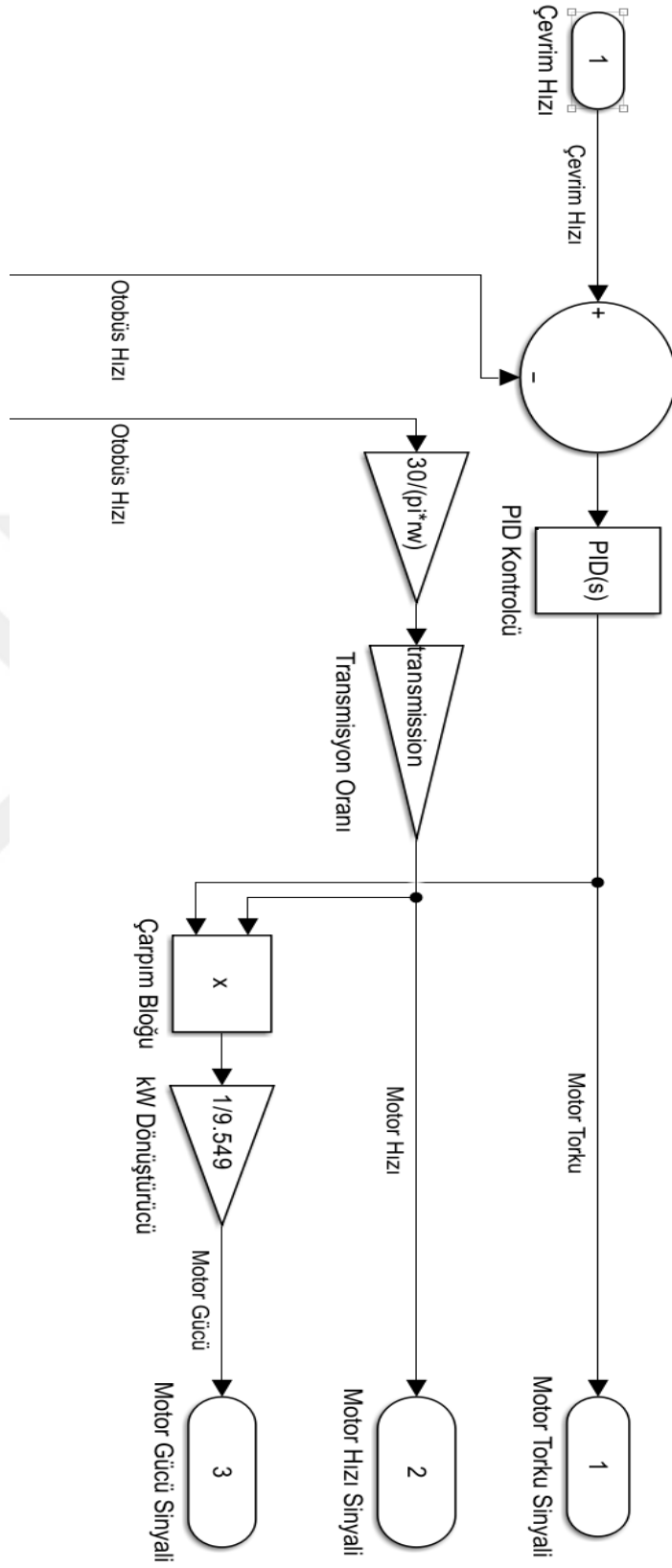
Motor devri n_M , tekerlek devrinin toplam dişli oranı i_{top} ile çarpılması sonucu elde edilir:

$$n_M = n_W \cdot i_{top} \quad (11)$$

Son olarak, motor gücü P_M [W] tork ve açısal hız çarpımına dayanmaktadır. Uluslararası birim sistemi dışında (örneğin rpm ve Nm) güç ifadesini kW cinsine çevirmek için kullanılan sabit (9.549) dikkate alınarak,

$$P_M = \tau_M \cdot \frac{n_M}{9.549} \quad (12)$$

Bu denklemler, motor torkunun tekerleklerde üretilen çekiş kuvvetine dönüşümünü, tekerlek ve motor hızları arasındaki ilişkiyi ve nihayetinde motorun ürettiği gücün hesaplanmasını göstererek araç güç aktarım sisteminin temel çalışma prensibini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.15. MATLAB/Simulink’de oluşturulan transmisyon modeli

Bu modelde önce çevrimin hız sinyali, PID kontrolcüsüne girerek motor torkunu belirleyen bir kontrol sinyali üretilir. Eş zamanlı olarak aracın hızı transmisyon oranı ile çarpılarak motor hızı sinyalini oluşturur. Son aşamada, bu iki büyüklük bir çarpma bloğunda 9.549 sabiti ile çarpılarak kW cinsinden motor gücü sinyali elde edilir. Böylece model, çevrim hızından başlayıp PID tabanlı kontrolcü üzerinden motorun tork, hız ve güç değerlerini gerçek zamanlı olarak hesaplayan bütünleşik bir akış sunar.

3.3.4. Elektrik Motor Modeli

Elektrikli otobüsün motor performansını ve verimliliğini anlamak için ihtiyaç duyulan dinamik ve matematiksel bir temsilin oluşturulması yapılmıştır. Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek otobüsün hareketini sağlar ve bu nedenle motorun tork, güç ve hız karakteristikleri büyük önem taşır. Modelleme sürecinde, otobüste kullanılan elektrik motorunun verim grafiği üreticiden alınmıştır. Elektrik motorunun tork-hız matrisi excel üzerinden MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. Elektrik motorunu modellerken aşağıdaki formülizasyon sırasıyla uygulanmıştır.

Güç aktarım sistemlerinde, motor çıkış gücü P_{MG} [W], motor verim oranı η_M aracılığıyla gerekli elektrik gücü ve rejeneratif elektrik gücüne dönüştürülmesi, aşağıdaki denklemlerle gösterilmiştir.

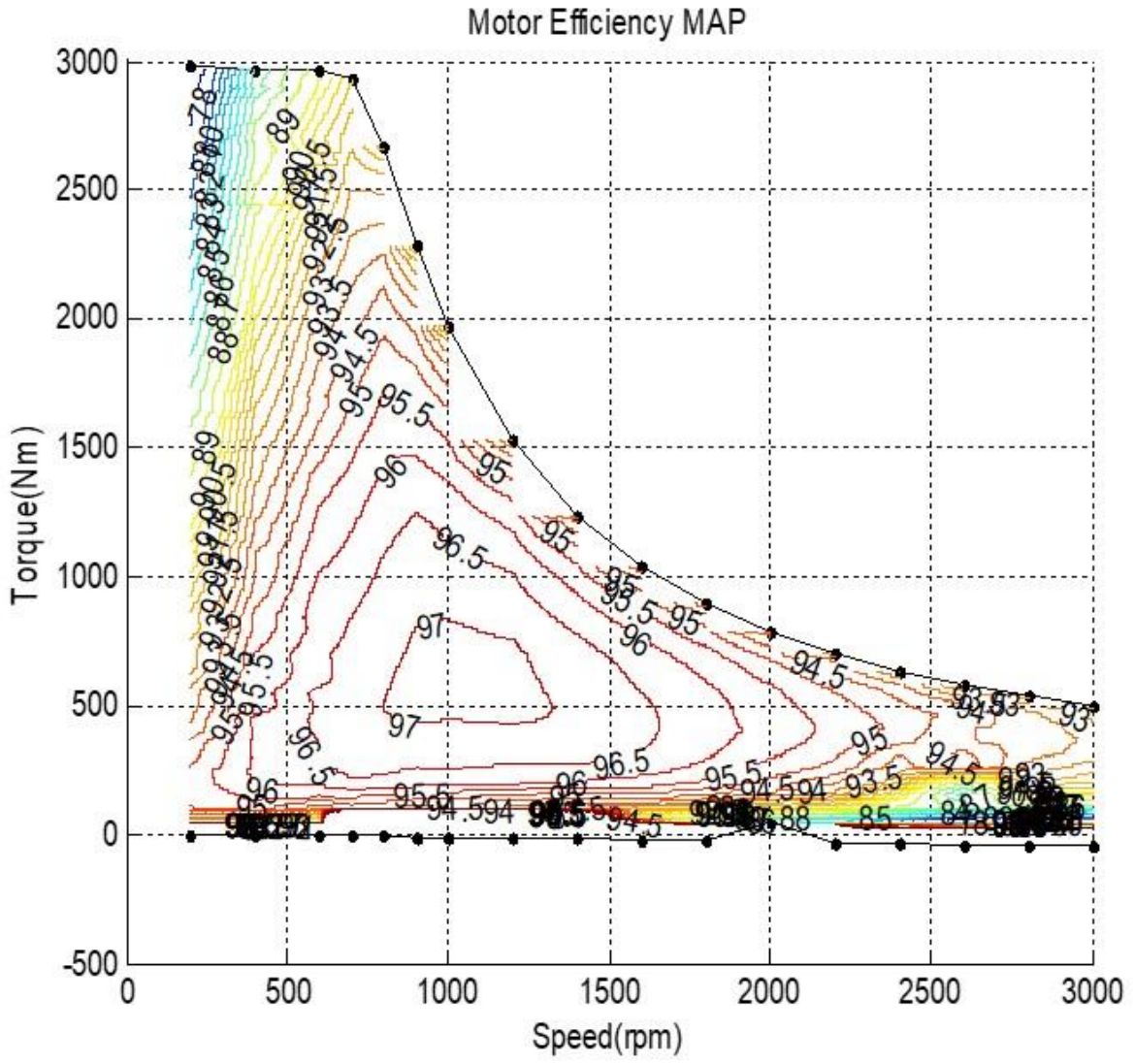
$$P_{GME} = \frac{1}{\eta_M} \cdot P_{MG} \quad (13)$$

$$P_{REG} = \eta_M \cdot P_{MG} \quad (14)$$

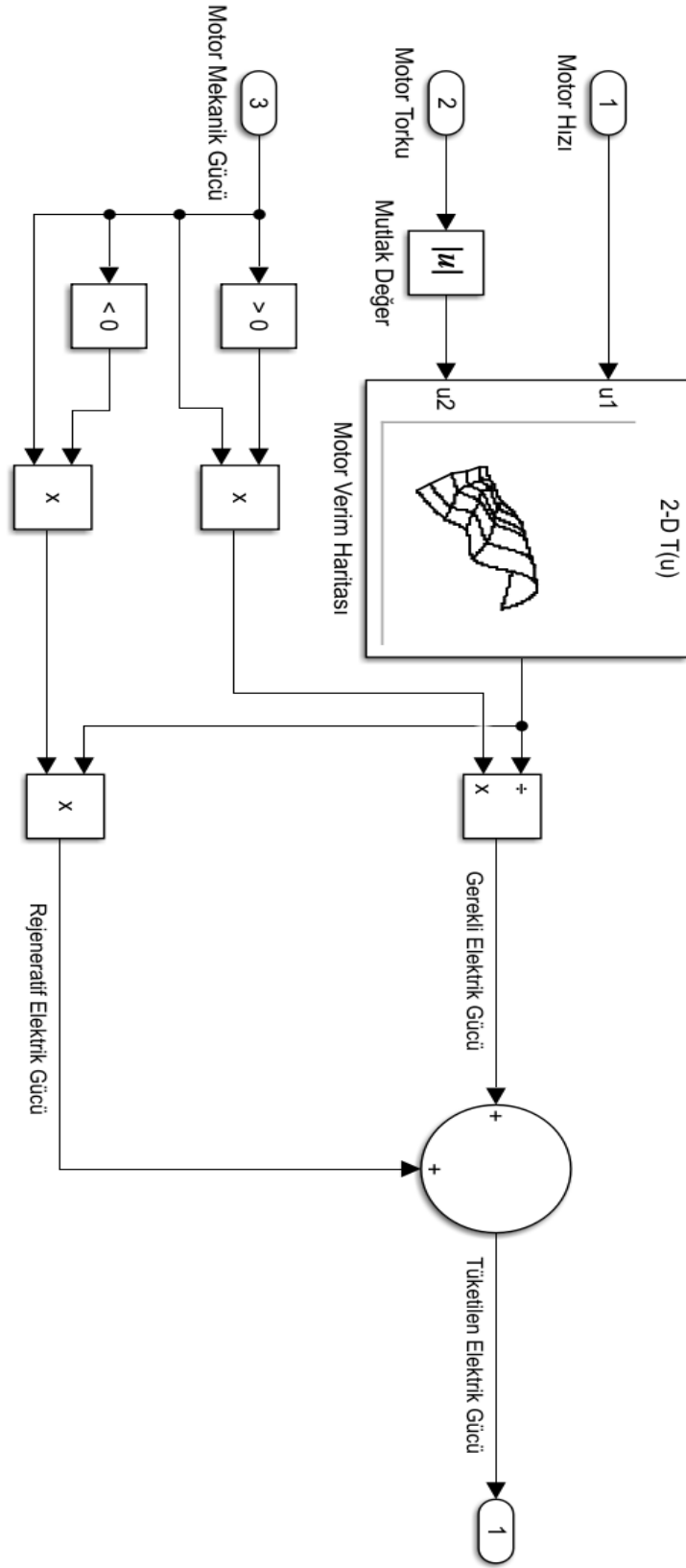
$$P_{MTE} = P_{REG} + P_{GME} \quad (15)$$

Burada, P_{MG} [W] motorun mekanik çıkış gücünü, η_M motorun verim haritasındaki hız-tork matrisinden elde edilen verimi, P_{GME} [W] motorun pozitif etkisini temsil eden güç bileşenini, P_{REG} [W] motorun negatif etkisini temsil eden güç bileşenini, P_{MTE} [W] ise sistemdeki toplam tüketilen gücü göstermektedir.

Bu denklemler, motor çıkış gücünün farklı verim oranları ile nasıl dönüştürüldüğünü ve sonuçta oluşan güç bileşenlerinin birbirleriyle toplanarak sistemin toplam çıktı gücünün nasıl hesaplandığını ifade eder.



Şekil 3.16. Elektrik motorunun verim grafiği

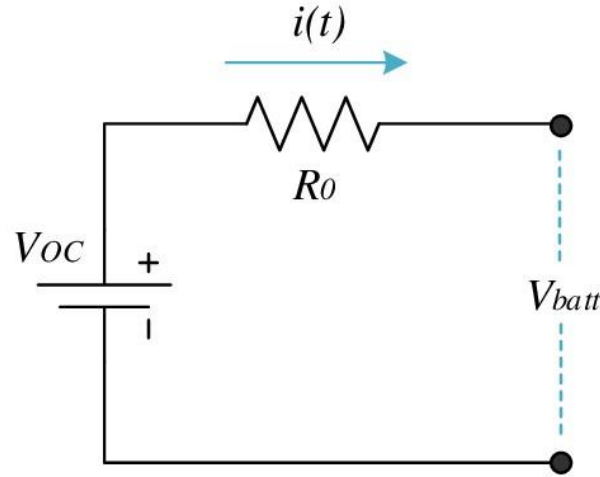


Şekil 3.17. MATLAB/Simulink’de oluşturulan elektrik motor modeli

Bu modelde önce motor torku ve motor hızı sinyalleri birleştirilerek motorun verimi hesaplanır. Motor verim haritası (2 boyutlu bir lookup tablo) yardımıyla ilgili tork ve hız değerlerine karşılık gelen verim (η) bilgisine dönüştürülür. Elde edilen verim değeri, mekanik gücün elde edilmesi için gereken veya geri kazanılabilecek (rejeneratif) elektrik gücünü belirlemek amacıyla kullanılır. Modelde, hesaplanan mekanik güç ve verim değerleri çarpılarak gerekli elektrik gücü bulunur, rejeneratif frenleme durumunda ise rejeneratif elektrik gücü hesaplanır. Son aşamada bu iki değer toplanarak tüketilen elektrik gücü sinyali üretilir. Böylece motorun anlık çalışma durumuna göre hem enerji tüketimi hem de geri kazanımı (rejenerasyon) tek bir akış içerisinde modellenmiş olur.

3.3.5. Batarya Sistemi Modeli

Elektrikli otobüsün çevrimleri tamamlayabilmesi için elektrik motorunun kullanacağı enerjiyi depolayan batarya sisteminin modellenmesi gerekmektedir. Batarya sistemi Şekil 3.18.'deki gösterilen R_{int} modeli esas alınarak yapılmıştır. Bu modellemeyi yaparken elektrikli otobüste kullanılan bataryanın parametreleri kullanılmıştır. Batarya sistemini MATLAB/Simülink üzerinde modellerken aşağıdaki formülasyon takip edilmiştir.



Şekil 3.18. Batarya sistemi için Rint eşdeğer devre modeli [37].

Elektrikli araçlar veya enerji depolama sistemlerinde kullanılan bir batarya modeli, basitleştirilmiş olarak açık devre gerilimi V_{ocv} [V] ve iç direnç R_{int} [Ω] ile temsil edilir [31]. Bu çerçevede, bataryaya yapılacak güç talebi P_L [W] mekanik ve yardımcı sistem güçlerinin toplamı olarak ifade edilir:

$$P_{BL} = P_{MC} + P_A \quad (16)$$

Burada P_{MC} [W] motor tarafından çekilen mekanik gücü, P_A [W] ise araçtaki aksesuarların güç ihtiyacını göstermektedir. Bataryanın gücü P_B [W] ise yüklenme esnasındaki toplam talep P_{BL} [W] ile kayıpların P_{Loss} [W] toplamına eşittir:

$$P_B = P_{BL} + P_{Loss} \quad (17)$$

Bataryanın çıkış akımı I_{Bat} [A], açık devre gerilimi V_{ocv} [V] ve iç direnç R_{int} [Ω] kullanılarak elde edilebilir. Bataryadan çekilen güç, basitleştirilmiş bir iç modelde şu şekilde ifade edilir:

$$I_{Bat} \cdot V_{ocv} = P_{BL} + I_{Bat}^2 \cdot R_{int} \quad (18)$$

veya eşdeğer biçimde,

$$0 = I_{Bat} \cdot V_{ocv} - P_{BL} - I_{Bat}^2 \cdot R_{int} \quad (19)$$

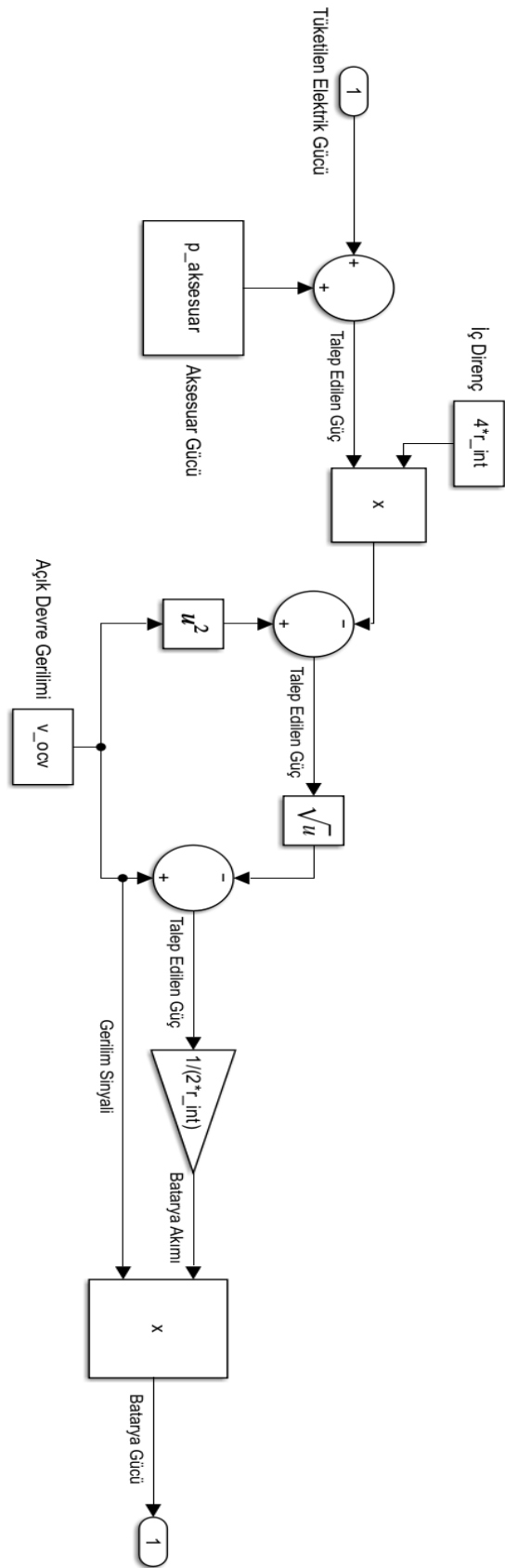
Bu denklem çözülerek batarya akımı I_{Bat} [A] aşağıdaki kapalı formda elde edilir:

$$I_{Bat} = \frac{V_{ocv} - \sqrt{V_{ocv}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{BL}}}{2 \cdot R_{int}} \quad (20)$$

Burada $\sqrt{V_{ocv}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{Loss}}$ ifadesi, yük talebi P_{Loss} [W] ile bataryanın iç parametreleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Son olarak, bataryanın sağladığı gerçek güç P_B [W] akım ve açık devre geriliminin çarpımıyla verilir:

$$P_B = I_{Bat} \cdot V_{ocv} \quad (21)$$

Bu denklemle, basit bir iç direnç modeline dayanan batarya akımının ve batarya çıkış gücünün yük gücü talebiyle nasıl belirlendiğini matematiksel olarak açıklamaktadır [31]. Böylece, hem bataryanın anlık elektriksel çıktısı hem de iç kayıpları (dirençsel kayıplar) hesaba katılarak sistemin enerji akışı değerlendirilmiştir.



Şekil 3.19. MATLAB/Simulink’de oluşturulan batarya modeli

Bu modelde, önce tüketilen elektrik gücü ile aksesuar gücü birleştirilerek bataryadan istenen toplam güç (talep edilen güç) belirlenir. Ardından bataryanın açık devre gerilimi V_{ocv} [V] ve iç direnci R_{int} [Ω] dikkate alınarak, çekilen batarya akımı hesaplanır. Son olarak, batarya akımı gerilimin çarpımı batarya gücü olarak modelin çıkışında yer alır. Böylece model, bataryanın iç direnç kaynaklı kayıplarını ve açık devre gerilimini hesaba katarak, gerçekçi bir güç akışı simülasyonu sağlar.

3.3.6. Batarya Doluluk Oranı (SoC) Modeli

SoC, bataryanın doluluk oranını ifade eden önemli bir parametre olup, aracın menziline, performansını ve enerji verimliliğini doğrudan etkiler [32]. Batarya modeli tamamlandıktan sonra elektrikli otobüsün bataryadan ne kadar enerji tükettiğini gözlemleyebilmek için SoC modellenmesi yapılmıştır. Aracın enerji depolama sisteminin mevcut enerji seviyesini belirlemek ve bataryayı yönetmek için kullanılan bir süreçtir. Bu modelleme, bataryanın şarj/deşarj dinamiklerini dikkate alarak gerçek zamanlı enerjinin izlenmesini ve yönetimini sağlar. SoC değerinin modellenmesi için kullanılan formülasyon aşağıda sırasıyla gösterilmiştir.

Elektrikli araçlarda bataryanın açık devre gerilimi V_{ocv} [V] ve çekilen akım I_{Bat} [A] üzerinden batarya gücü P_B [W] belirlenir [31]. Ek olarak, batarya verimliliğini temsil eden boyutsuz bir katsayı η_B sistemde meydana gelen verim kayıplarını hesaba katmak amacıyla modele dahil edilir. Rejeneratif koşullarda P_{BRG} [W] ve normaldeşarj koşullarında P_{BGR} [W] ayrı ayrı ifade edilen güç değerleri şu şekilde verilir.

$$P_{BGR} = \frac{1}{\eta_B} \cdot I_{Bat} \cdot V_{ocv} \quad (22)$$

$$P_{BRG} = \eta_B \cdot I_{Bat} \cdot V_{ocv} \quad (23)$$

Bu denklemler, sırasıyla normal kullanım ve rejeneratif kazanımda bataryadan çekilen veya bataryaya eklenen güçleri temsil etmektedir. Bu güç değerlerinin zaman integralleri, ilgili rejenerasyon ya dadeşarj durumunda bataryadan çekilen veya geri kazanılan toplam enerjiyi gösterir:

$$E_{BGR} = \int_0^t P_{BGR} \quad (24)$$

$$E_{BRG} = \int_0^t P_{BRG} \quad (25)$$

Toplam tüketilen ve geri kazanılan enerji E_c [Wh] bu iki bileşenin toplanmasıyla elde edilir:

$$E_c = E_{BGR} + E_{BRG} \quad (26)$$

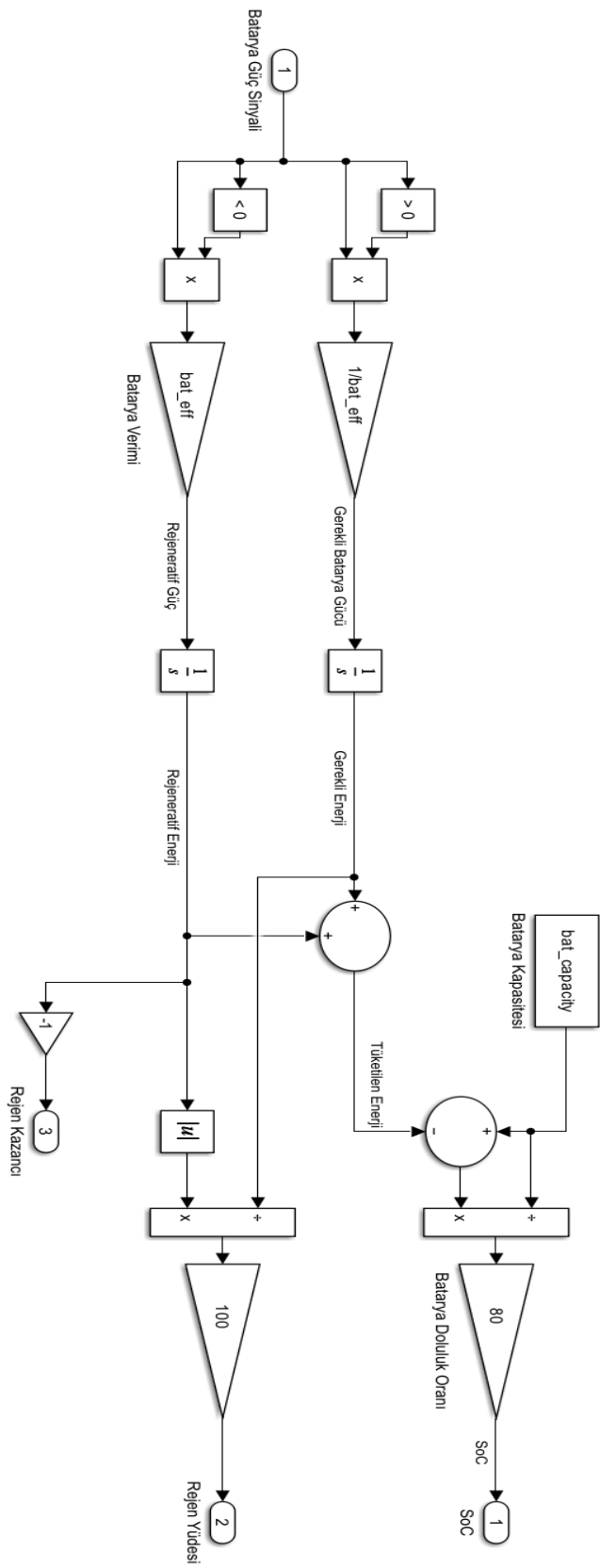
Batarya doluluk oranı (State of Charge, SoC) ise toplam kapasite B_c [Wh] içinden çekilen veya eklenen toplam enerjiyi E_c [Wh] çıkartarak hesaplanır. Yüzde cinsinden ifade edildiğinde:

$$SoC(State\ of\ Charge\ \%) = \frac{B_c - E_c}{B_c} \cdot 100 \quad (27)$$

Rejeneratif frenleme ile kazanılan toplam enerji ise aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Rejeneratif\ Enerji(\%) = \frac{E_{BRG}}{E_{GER}} \cdot 100 \quad (28)$$

Böylece bataryanın rejeneratif frenleme ve normal deşarj koşullarındaki güç akışı, birlikte değerlendirilerek hesaplanabilir.

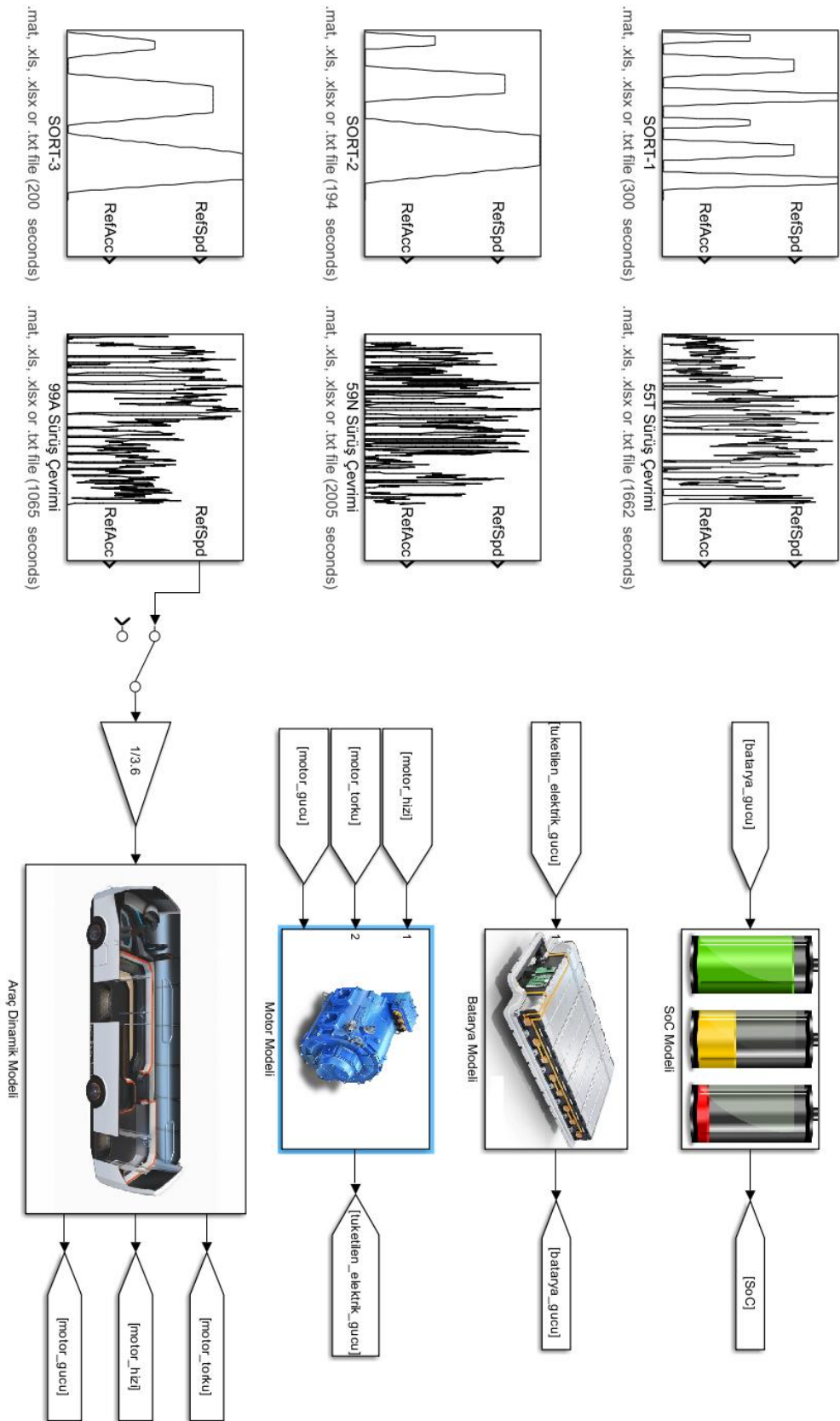


Şekil 3.20. MATLAB/Simulink’de oluşturulan SoC modeli

Bu modelde önce batarya güç sinyali, batarya verimi η_B dikkate alınarak iki ayrı kola ayrılır: normal kullanım ve rejeneratif kullanım. Normal kullanım kolunda güç sinyali $\frac{1}{\eta_B}$ katsayısıyla çarpılarak “genel batarya gücü” elde edilir ve zamanla integrali alınarak tüketilen enerji bulunur. Diğer kolda, rejeneratif kullanımda güç sinyali η_B ile çarpılır ve benzer şekilde integral alınarak rejeneratif enerji hesaplanır. Ardından bataryanın nominal kapasitesi B_c [Wh] ile tüketilen enerji arasındaki fark, batarya doluluk oranı (SoC) hesabında kullanılır ve sonuç yüzde cinsinden ekranda gösterilir. Aynı zamanda rejeneratif yoldan kazanılan enerji de ayrı bir yüzde olarak hesaplanarak, sistemin hem anlık şarj durumu hem de rejeneratif kazanç tek bir akış içerisinde izlenir.

3.3.7. Modele Genel Bakış

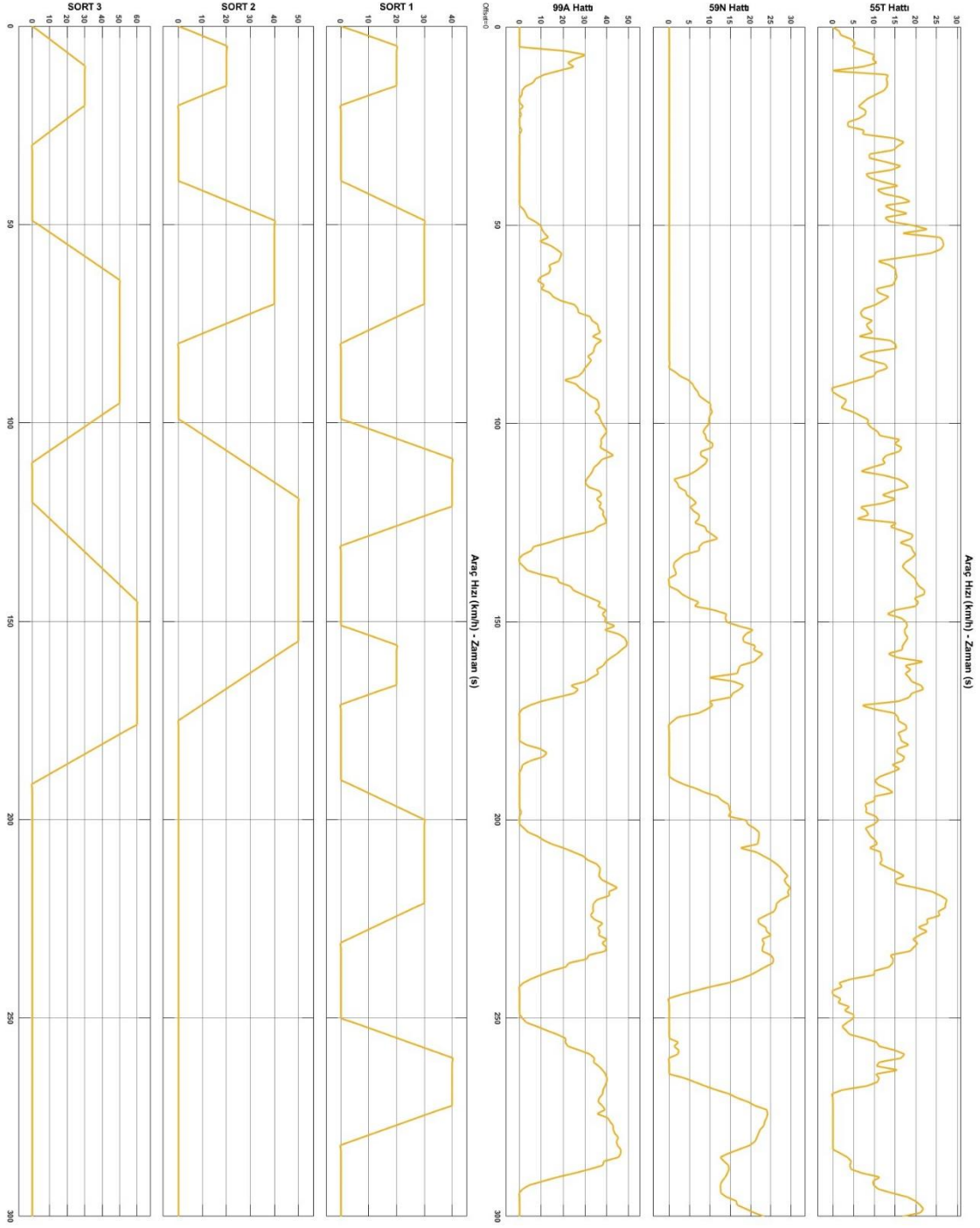
Bu genel bakış şemasında, araç, batarya ve elektrik motoru gibi temel bileşenler bir bütün olarak gösterilmektedir. Bu modelde oluşturulan sürüş çevrimlerinden elde edilen hız bilgisi, araç dinamik modeli içinde işlenerek tork ve güç değerleri anlık olarak hesaplanır. Hesaplanan bu değerler motor modeli içerisinde işlenerek gerekli batarya gücü hesaplanır. Aynı zamanda bataryanın şarj durumu (SoC) da zamana bağlı olarak takip edilerek hem enerji tüketimi hem de rejeneratif kazançlar gözlemlenmektedir. Böylece, araç dinamiğinden başlayarak batarya yönetimine kadar tüm sürecin verileri tek bir akışta toplanıp izlenebilmekte, modelin performansı ile enerji kullanımını bütüncül bir bakışla değerlendirilebilmektedir.



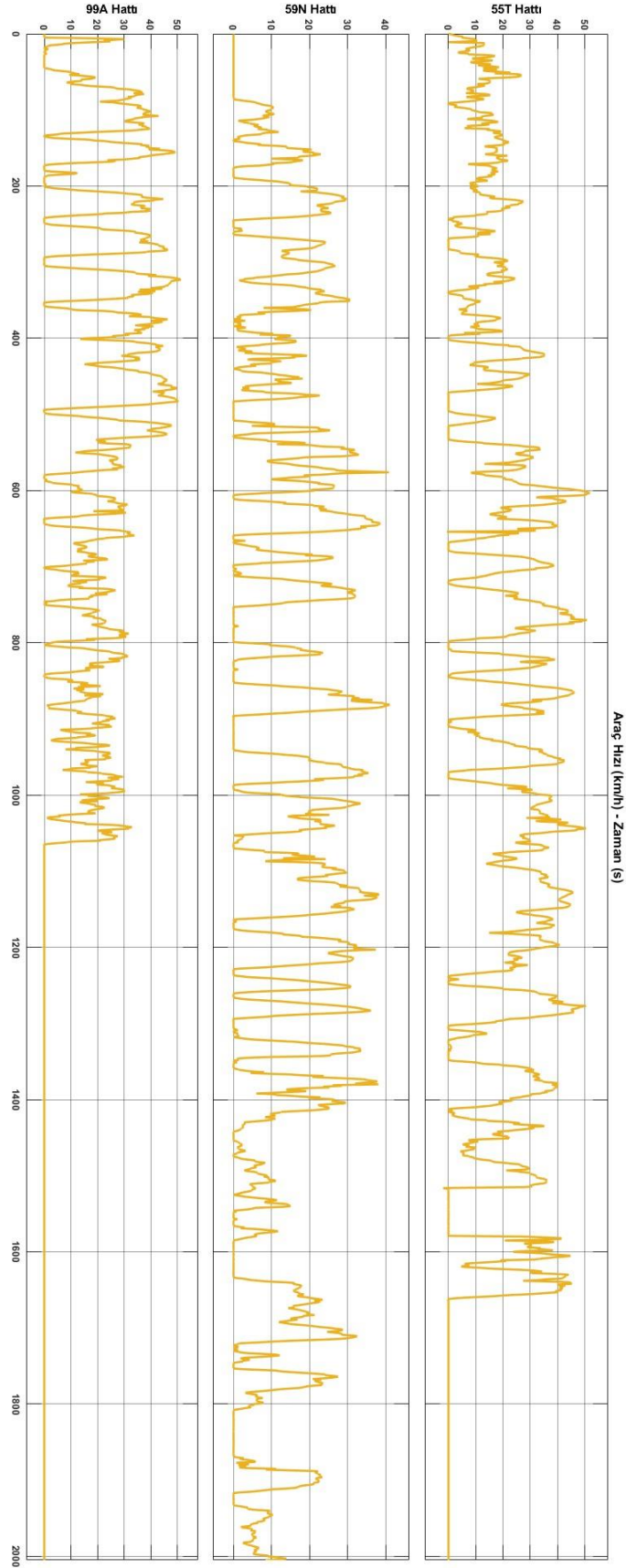
Şekil 3.21. MATLAB/Simulink’de tamamlanan elektrikli otobüs modeli

4. ELEKTRİKLİ OTOBÜSÜN MATLAB/SIMULINK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, farklı yol çevrimleri kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve hesaplamalar sonucunda, elektrikli otobüsün rejeneratif fren sistemine ilişkin performans parametreleri incelenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında yürütülen simülasyonlar çerçevesinde, aracın hız, motor torku, ivmelenme ve enerji geri kazanım oranı gibi kritik parametrelerindeki dinamik değişimler göz önüne alınarak, çeşitli yol ve trafik koşullarının rejeneratif frenleme performansına etkisi detaylı bir biçimde incelenmiştir. Elde edilen grafiksel veriler, frenleme sürecinde ortaya çıkan ani ivmelenme ve yavaşlama durumları, enerji dönüşüm oranları ve sistem verimliliğini somut rakamlarla ortaya koyarken, her bir grafik, ilgili süreci detaylı göstermektedir. Bu analizler, farklı yol çevrimlerinin ve koşulların, rejeneratif frenleme verimliliğini nasıl etkilediğini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak sağlamış; özellikle şehir içi yoğun trafik, yokuşlu yol ve sabit hız senaryolarındaki performans farklılıkları belirgin hale getirilmiştir. Elde edilen bulguların, sistemin optimize edilebilecek yönlerinin ortaya çıkarılmasına yönelik önemli ipuçları sunduğu bu çalışma, ilerleyen kısımlarda sonuçların daha anlaşılır ve karşılaştırmalı bir biçimde sunulabilmesi amacıyla tablo halinde özetlenmiştir.



Şekil 4.1. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan araç hızı – zaman grafikleri



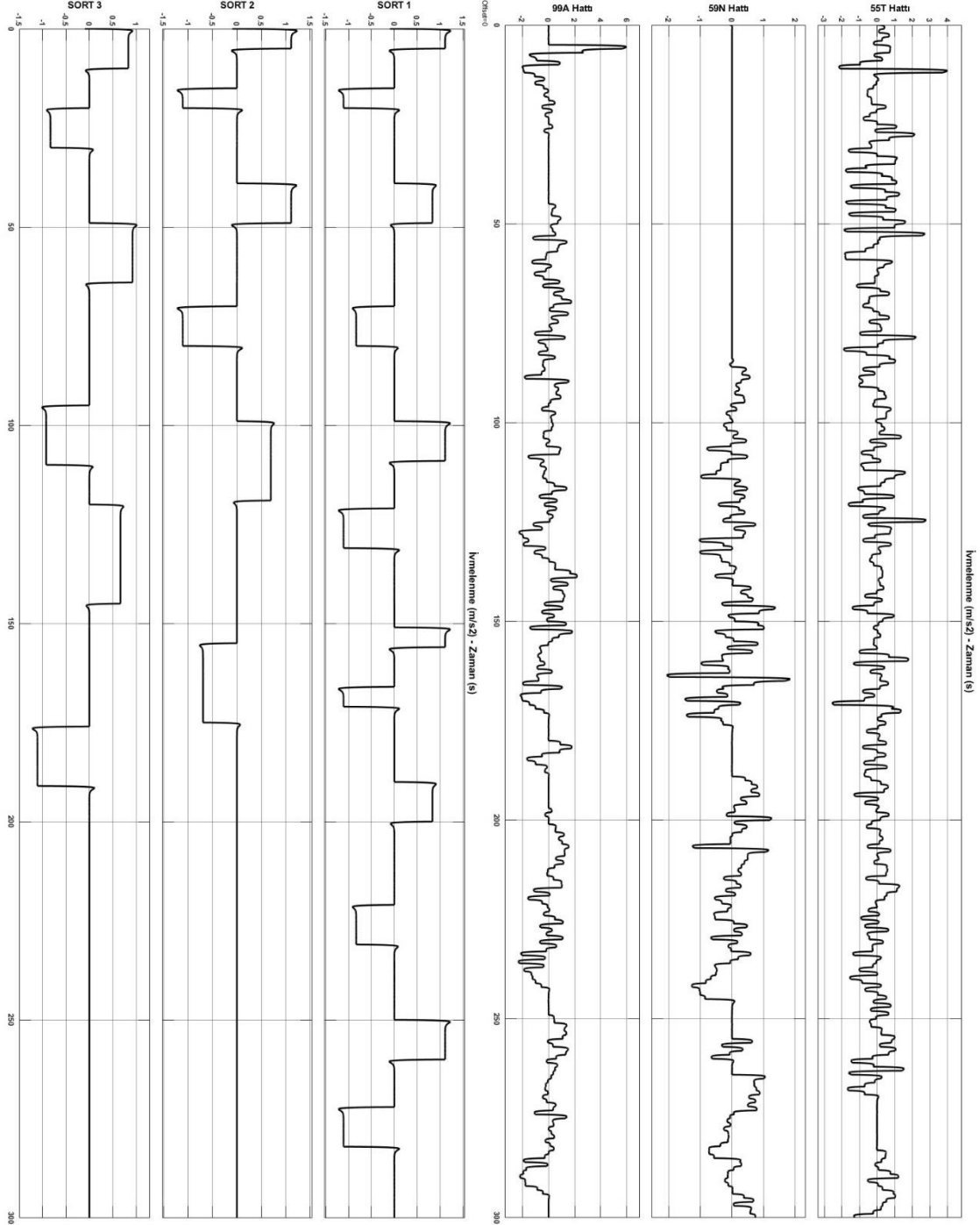
Şekil 4.2. 55T, 59N ve 99A sürüş çevrimleri ile oluşan araç hızı – zaman grafikleri

Çevrimlerdeki hız değişimleri Şekil 4.1. ve Şekil 4.2. de gösterilmiştir. SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 sürüş çevrimleri, belirli hız profillerine sahiptir. SORT-1 çevriminde maksimum hız yaklaşık 45 km/h civarına ulaşırken, minimum hız 0 km/h olarak görülmektedir, yani belirli periyotlarla tam durmaları içermektedir. SORT-2 çevriminde maksimum hız biraz daha yüksek olup 50 km/h seviyelerine çıkmakta ve hızın artış ve düşüş periyotları daha uzun süreli devam etmektedir. SORT-3 çevrimi ise en yüksek hızlara çıkabilen test döngüsü olup, maksimum hızı 60 km/h seviyelerine ulaşmaktadır. Bu üç çevrimde de hız değişimleri oldukça düzenli ve belirli periyotlarla gerçekleştiği için, sürüş boyunca frenleme ve hızlanma döngüleri öngörülebilir bir yapıdadır.

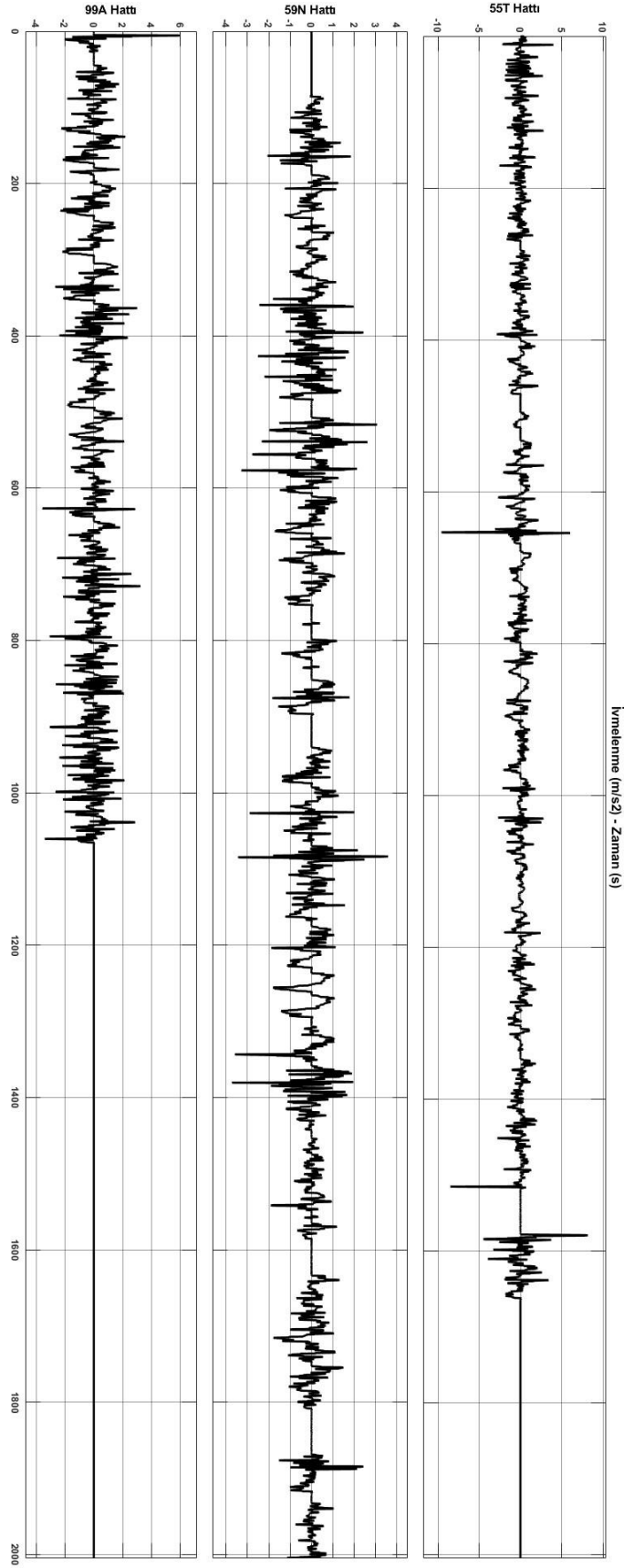
İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimleri incelendiğinde hız-zaman grafiklerinde ise çok daha düzensiz bir hız profili gözlemlenmektedir. 99A hattında maksimum hız 55 km/h civarına çıkarken, grafik boyunca hızın 0 km/h seviyesine düştüğü birçok nokta gözlemlenmektedir. Bu hat, SORT çevrimlerine kıyasla daha akıcı bir seyir profili sunmasına rağmen, belirli noktalarda duraklama ve hız değişimleri oldukça belirgindir. 59N hattı daha değişken bir hız profiline sahiptir ve grafikte belirgin hız düşüşleri mevcuttur. Bu hatta maksimum hız 50 km/h civarında olup, sık sık 0 km/h seviyesine düşen bölgeler görülmektedir. Bu durum, hattın yoğun dur-kalk trafiğine sahip olduğunu ve rejeneratif frenlemenin yüksek verimle çalışabileceği bir sürüş senaryosu sunduğunu göstermektedir. 55T hattı ise en karmaşık hız profiline sahip olup, maksimum hızı 45-50 km/h seviyelerine ulaşırken, grafik boyunca çok fazla ani hız değişimi ve keskin düşüşler gözlemlenmektedir. Bu hattın en belirgin özelliği, hız grafiğinin oldukça düzensiz olmasıdır; bu da hattın yoğun trafik ve sık duraklamalara sahip olduğunu göstermektedir.

İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimleri ile SORT çevrimleri karşılaştırıldığında, simüle edilen sürüş çevrimlerinin çok daha düzenli olduğu, hız artış ve azalışlarının belirli kalıplara göre gerçekleştiği görülmektedir. Gerçek hatlarda ise hız profili çok daha karmaşıktır; 55T hattı gibi yoğun trafik içeren hatlarda anlık dalgalanmalar çok fazladır. Bu durum, rejeneratif frenleme açısından büyük bir fark yaratmaktadır. SORT çevrimlerinde frenleme noktaları belirli periyotlarla geldiği için enerji geri kazanımı hesaplamaları daha öngörülebilir şekilde yapılabilir. Ancak, 99A, 59N ve özellikle 55T hatlarında düzensiz hız değişimleri nedeniyle rejeneratif frenleme periyotları daha sık ancak daha kısa süreli olabilir. Özellikle 55T hattında 0 km/h

seviyesine sık sık inilmesi, rejeneratif frenleme potansiyelinin çok yüksek olduğu anlamına gelir. 99A hattı, daha uzun mesafeli seyir ve daha az dur-kalk içerdiği için rejeneratif frenleme verimliliği açısından SORT-3 çevrimini andırmaktadır.



Şekil 4.3. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan ivmelenme – zaman grafikleri

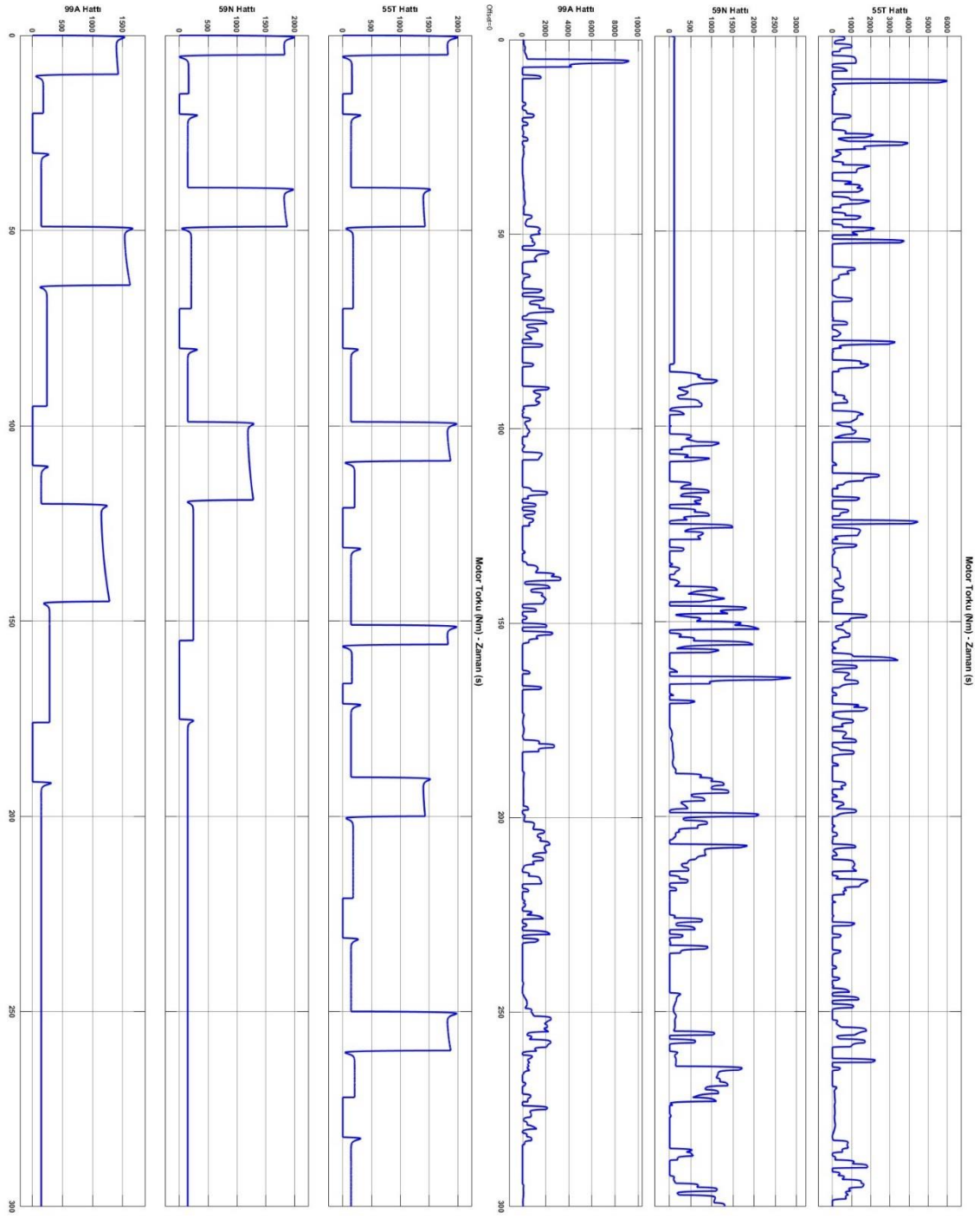


Şekil 4.4. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan ivmelenme – zaman grafikleri

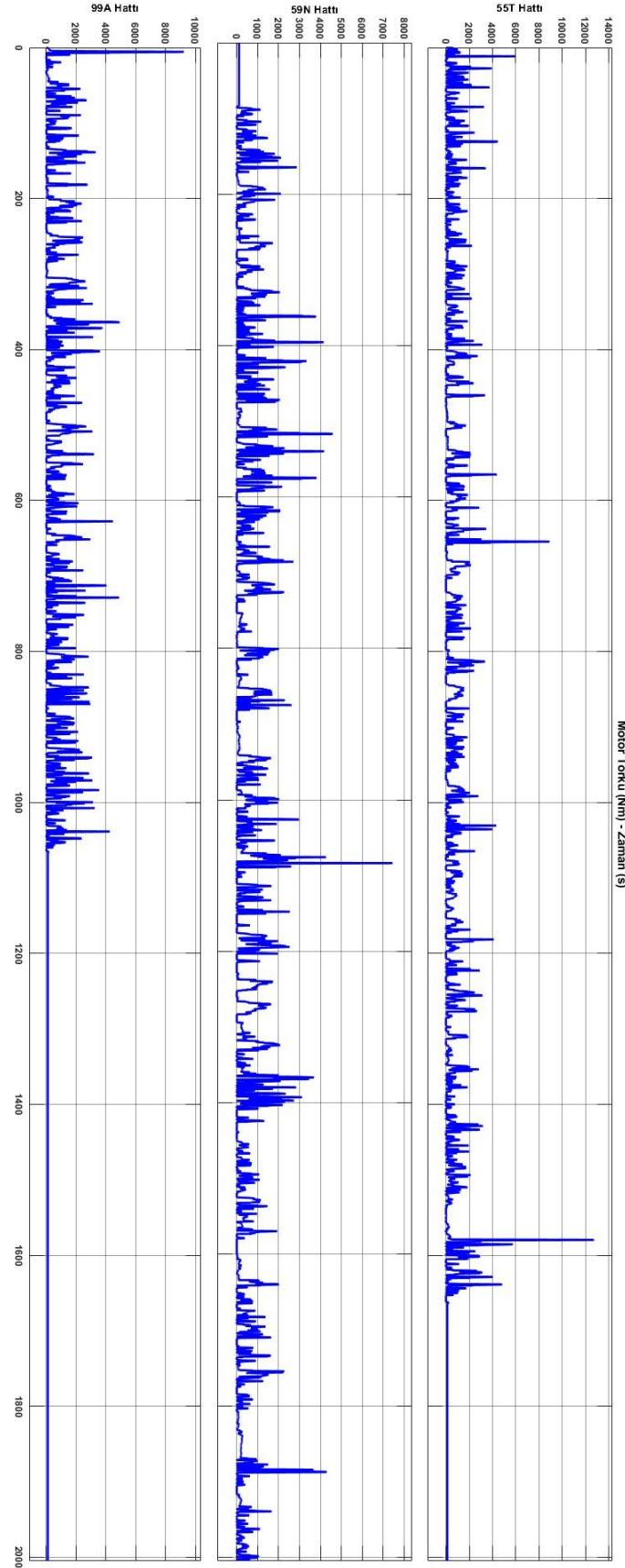
Çevrimlerdeki ivme değişimleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.4. de gösterilmiştir. Grafikte ivmelenme değerleri basamaklı bir şekilde artıp azalmaktadır, bu da sistemin belirli periyotlarla hızlanma ve frenleme gerçekleştirdiğini göstermektedir. İvmelenme (m/s^2) değerleri genellikle $-1,5 m/s^2$ ile $+1,5 m/s^2$ arasında değişmektedir. SORT-1 çevriminde ivmelenme değişimleri daha sık tekrarlanırken, SORT-3 çevriminde hızlanma ve yavaşlama süreleri daha uzundur. Bu, SORT-3 çevriminde daha uzun mesafelerde yüksek hızlara ulaşıldığını ve daha az dur-kalk hareketi yapıldığını gösterir.

İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerinin ivmelenme grafikleri incelendiğinde, SORT çevrimlerinden çok daha düzensiz bir yapı ortaya çıkmaktadır. 99A, 59N ve 55T hatlarının ivmelenme değerleri $-2,5 m/s^2$ ile $+2,5 m/s^2$ arasında değişmekte olup, ani dalgalanmalar ve küçük ölçekli ivme değişiklikleri gözlemlenmektedir. 99A hattı daha istikrarlı bir ivmelenme profiline sahipken, 59N hattında ani ivmelenmeler ve sert frenlemeler dikkat çekmektedir. 55T hattı ise en düzensiz hızlanma ve yavaşlama profiline sahiptir; ivmelenme değerleri sık sık değişmekte ve negatif ivmelenme (yavaşlama) bölgeleri oldukça fazla gözlemlenmektedir. Bu, hattın yoğun trafik koşullarına sahip olduğunu ve otobüsün sık sık ani frenleme yapmak zorunda kaldığını göstermektedir. 55T ve 59N hatlarındaki bu düzensiz ivmelenme profili, rejeneratif frenlemenin aktif çalıştığı hatlar olabileceğini işaret etmektedir.

99A hattı görece daha az değişkenlik gösterse de, 59N ve özellikle 55T hatlarında ivmelenme değerleri sürekli olarak dalgalanmakta, bazı noktalarda $+3 m/s^2$ 'ye kadar hızlanma, bazı bölgelerde ise $-4 m/s^2$ 'ye kadar sert frenleme görülmektedir. Bu tür ani değişimler, sürüş konforunu etkileyebileceği gibi, rejeneratif frenleme açısından da önemli fırsatlar sunmaktadır.



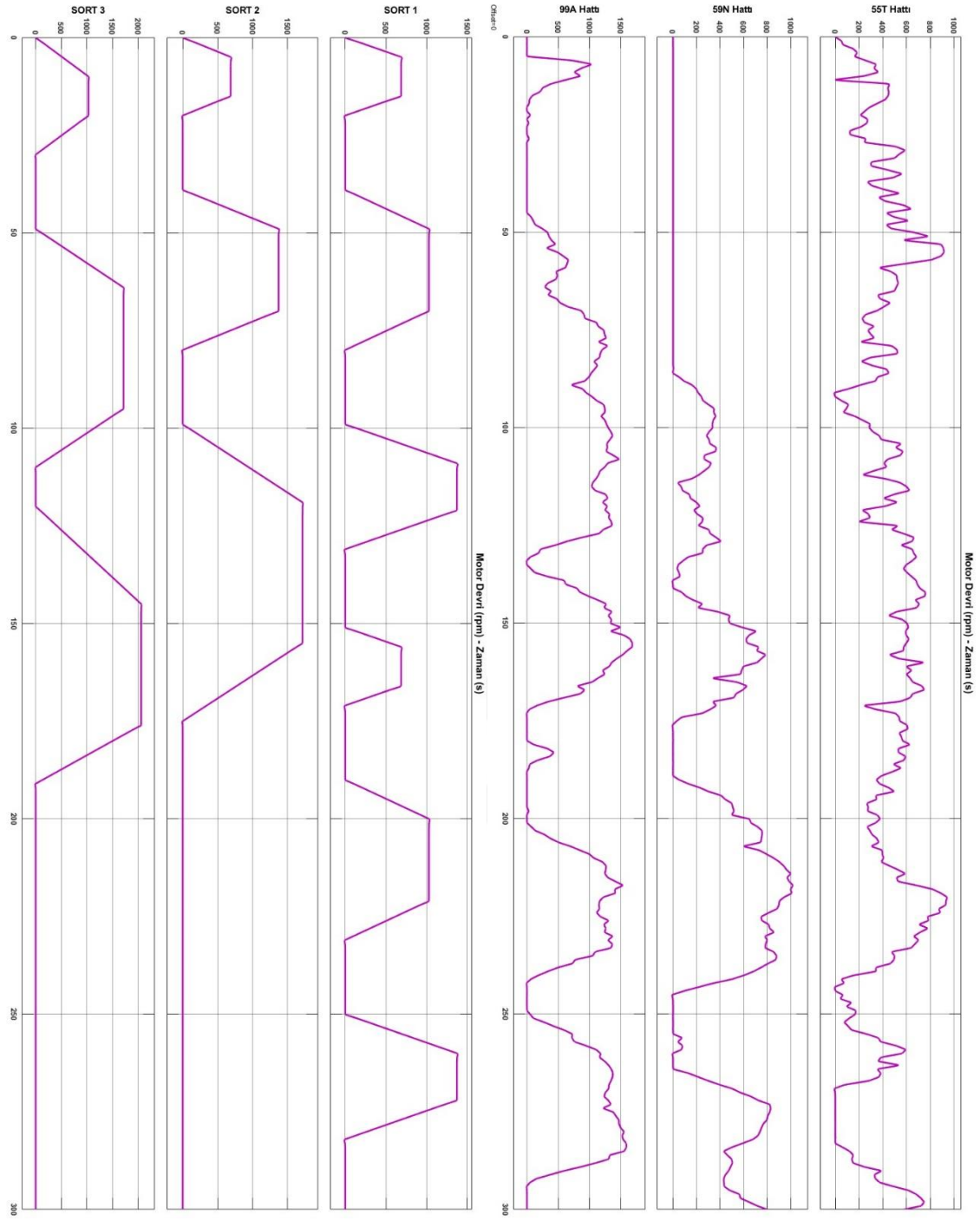
Şekil 4.5. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan motor torku – zaman grafikleri



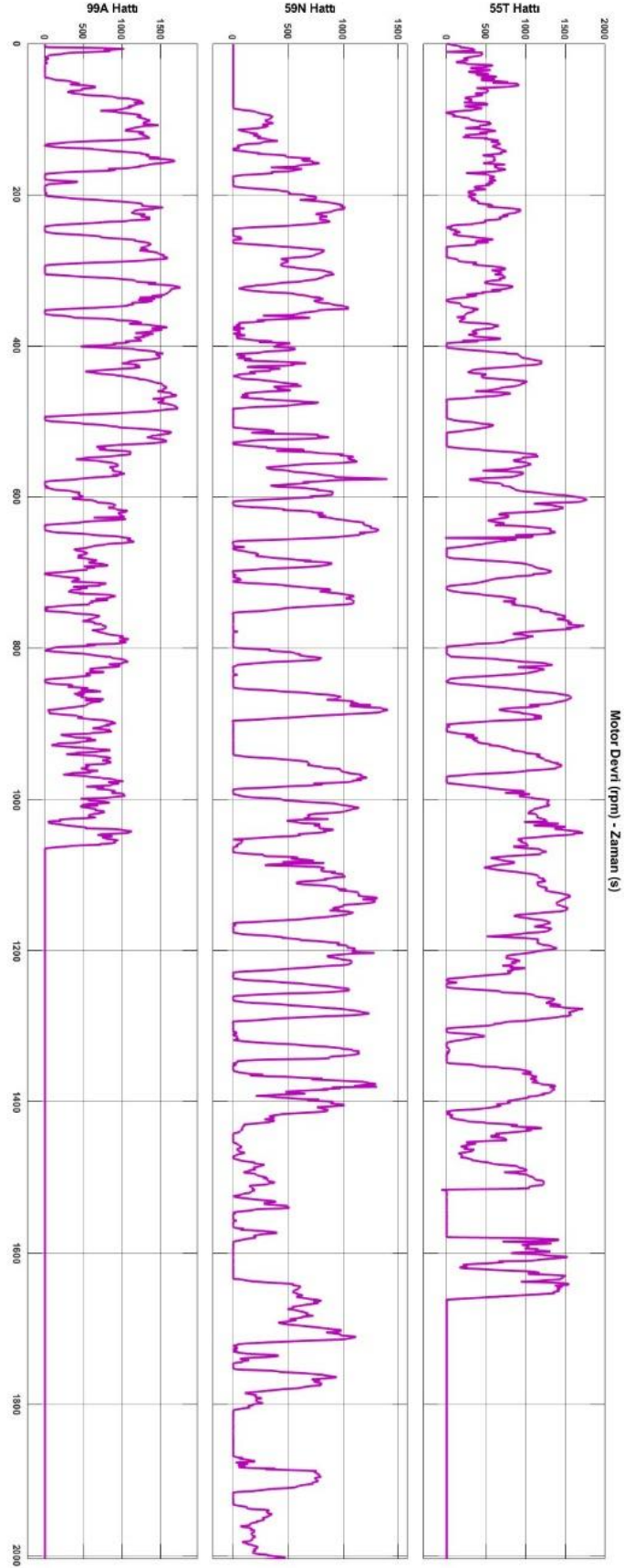
Şekil 4.6. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan motor torku – zaman grafikleri

Çevrimlerdeki motor torku değişimleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6. de gösterilmiştir. SORT çevrimlerinde motor torku, hız grafikleriyle paralel olarak basamaklı artış ve azalışlar şeklinde ilerlemektedir. SORT-1 çevriminde motor torku genellikle 1500 Nm ile 2000 Nm arasında değişirken, SORT-2 çevriminde de benzer değerler gözükmemektedir. SORT-3 çevriminde ise maksimum motor torku 1500 Nm seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Bu düzenli tork değişimleri, kontrollü bir sürüş senaryosu ile oluşturulmuş olup, rejeneratif frenleme anlarının belirli noktalarda sabitlendiğini göstermektedir. Tork bölgeleri aracın hızlandığı ve enerji tüketiminin arttığı süreçleri işaret etmektedir.

İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerinin motor torku grafiklerine bakıldığında, tork değişimlerinin oldukça düzensiz olduğu görülmektedir. 99A hattında motor torku ortalama 2000 Nm ile 3000 Nm arasında dalgalanırken, 59N hattında bu değişim 2000 Nm ile 4000 Nm seviyelerine kadar çıkmaktadır. 55T hattında da tork değişimleri, 2000 Nm ile 4000 Nm arasında gözlemlenmektedir. 99A hattı daha akıcı bir sürüş profiline sahip olduğu için motor torku nispeten daha dengeli bir şekilde değişmektedir.



Şekil 4.7. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan motor devri – zaman grafikleri



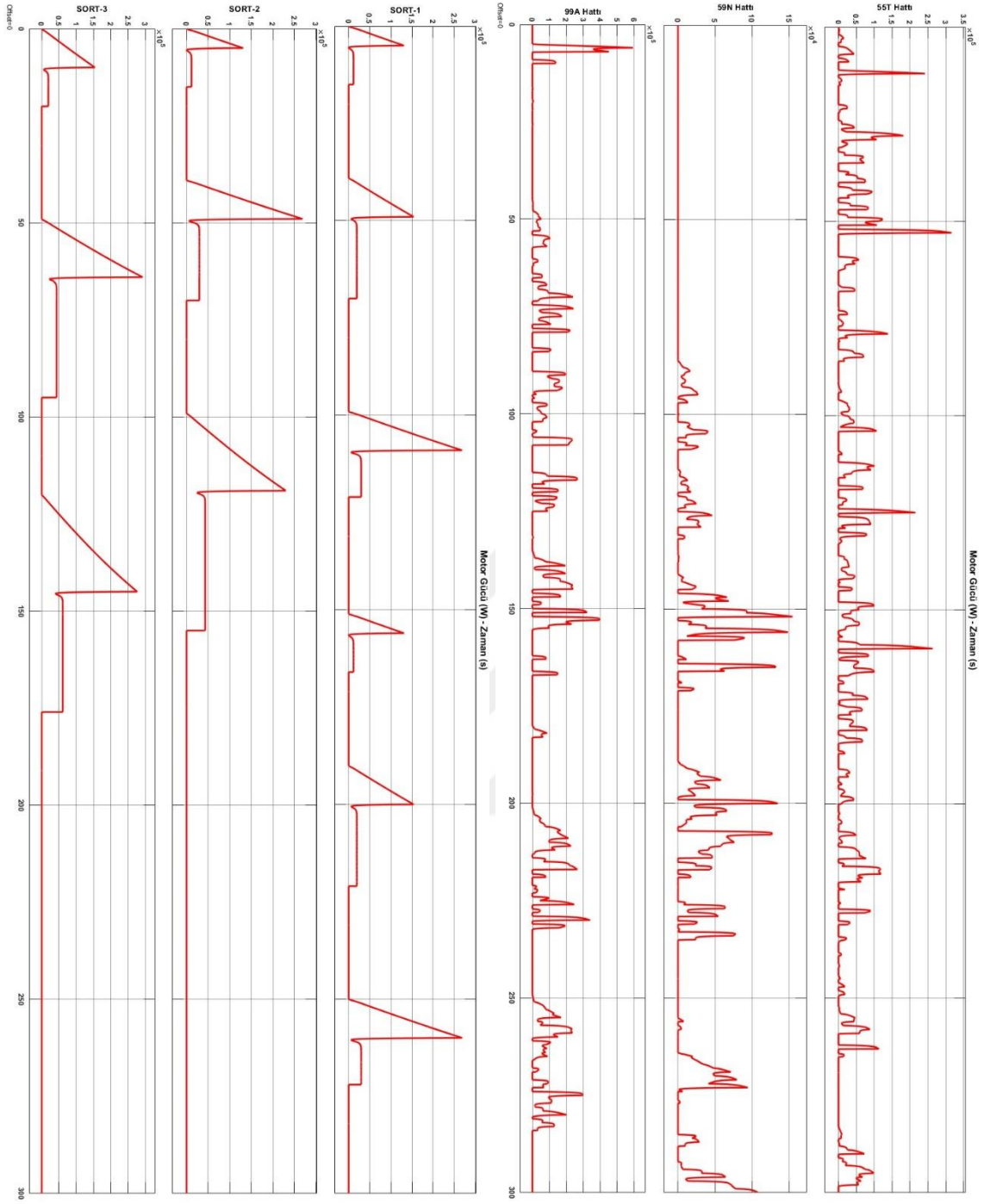
Şekil 4.8. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan motor devri – zaman grafikleri

Çevrimlerdeki motor devri değişimleri Şekil 4.7. ve Şekil 4.8. de gösterilmiştir. SORT çevrimlerinde motor devri basamaklı ve düzenli bir artış-azalış yapısı göstermektedir. SORT-1 çevriminde motor devri maksimum 1400 rpm, SORT-2’de 1600 rpm, SORT-3’te ise 2000 rpm seviyelerine kadar çıkmaktadır. Motor devrinin düştüğü bölgeler rejeneratif frenlemenin devrede olduğu süreçleri ifade etmektedir. SORT-1 ve SORT-2 çevrimlerinde sık sık düşüşler olduğu için rejeneratif frenleme daha sık çalışırken, SORT-3 çevriminde uzun süreli sabit devir kullanımı rejeneratif frenleme süreçlerini daha az olduğunu gösterir.

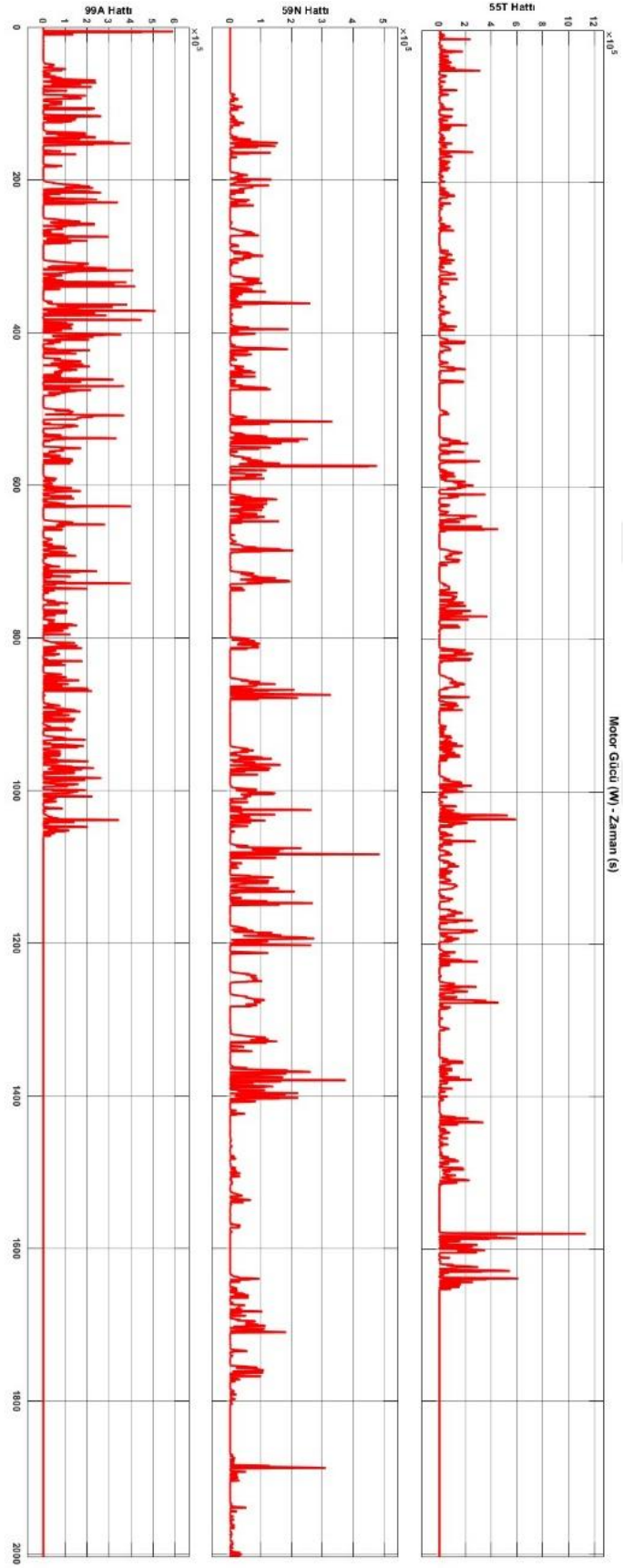
İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerinin değişimlerine bakıldığında, devrin SORT çevrimlerine kıyasla çok daha düzensiz ve değişken olduğu görülmektedir. 99A hattında motor devri 750 rpm ile 1700 rpm arasında değişirken, 59N hattında bu aralık 600 rpm ile 1400 rpm, 55T hattında ise 400 rpm ile 1750 rpm seviyelerine kadar çıkmaktadır.

Çevrimlerdeki motor gücü değişimleri Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. da gösterilmiştir. Motor gücünün değişimine bakıldığında, SORT-1 çevriminde motor gücü yaklaşık maksimum 280 kW, SORT-2’de 280 kW, SORT-3’te ise 270 kW seviyelerine kadar çıkmaktadır. Motor gücünün düştüğü bölgeler rejeneratif frenlemenin devrede olduğu süreçleri ifade etmektedir.

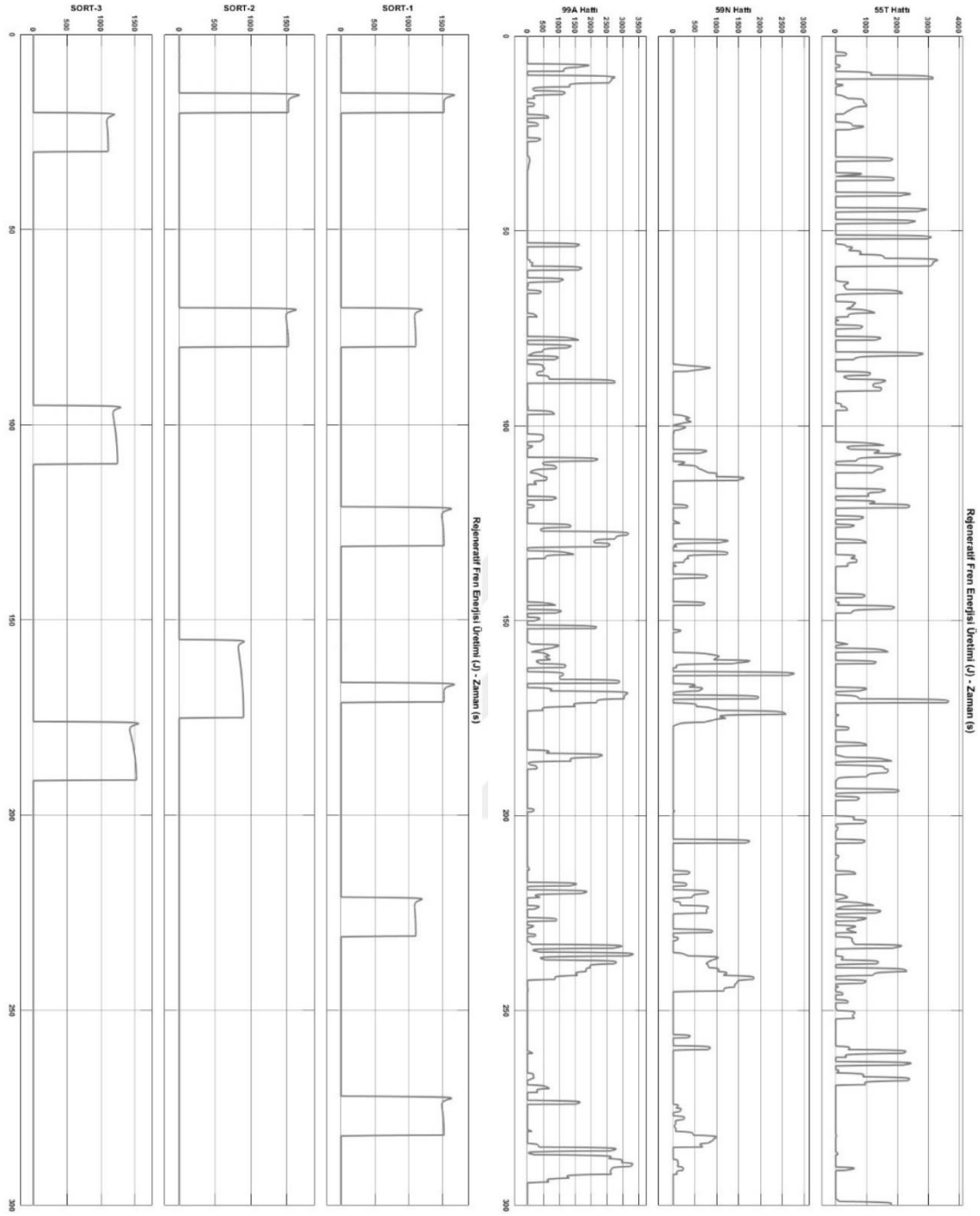
İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerin de ise, gücün SORT çevrimlerine kıyasla çok daha düzensiz ve değişken olduğu görülmektedir. 99A hattında motor gücü 350 kW ile 400 kW arasında değişirken, 59N hattında 180 kW ile 250 kW, 55T hattında ise 260 kW ile 280 kW seviyelerine kadar çıkabilmektedir.



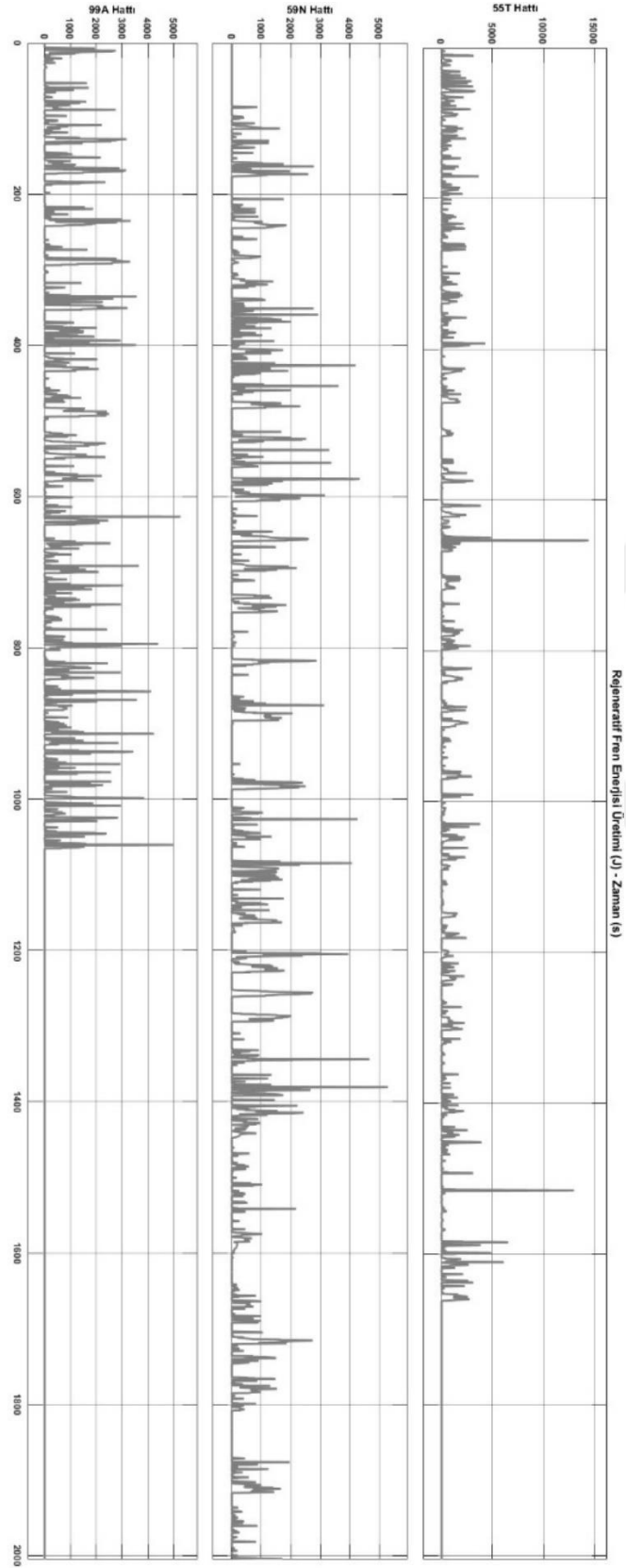
Şekil 4.9. SORT ve otobüs hattı çevrimleri ile oluşan motor gücü – zaman grafikleri



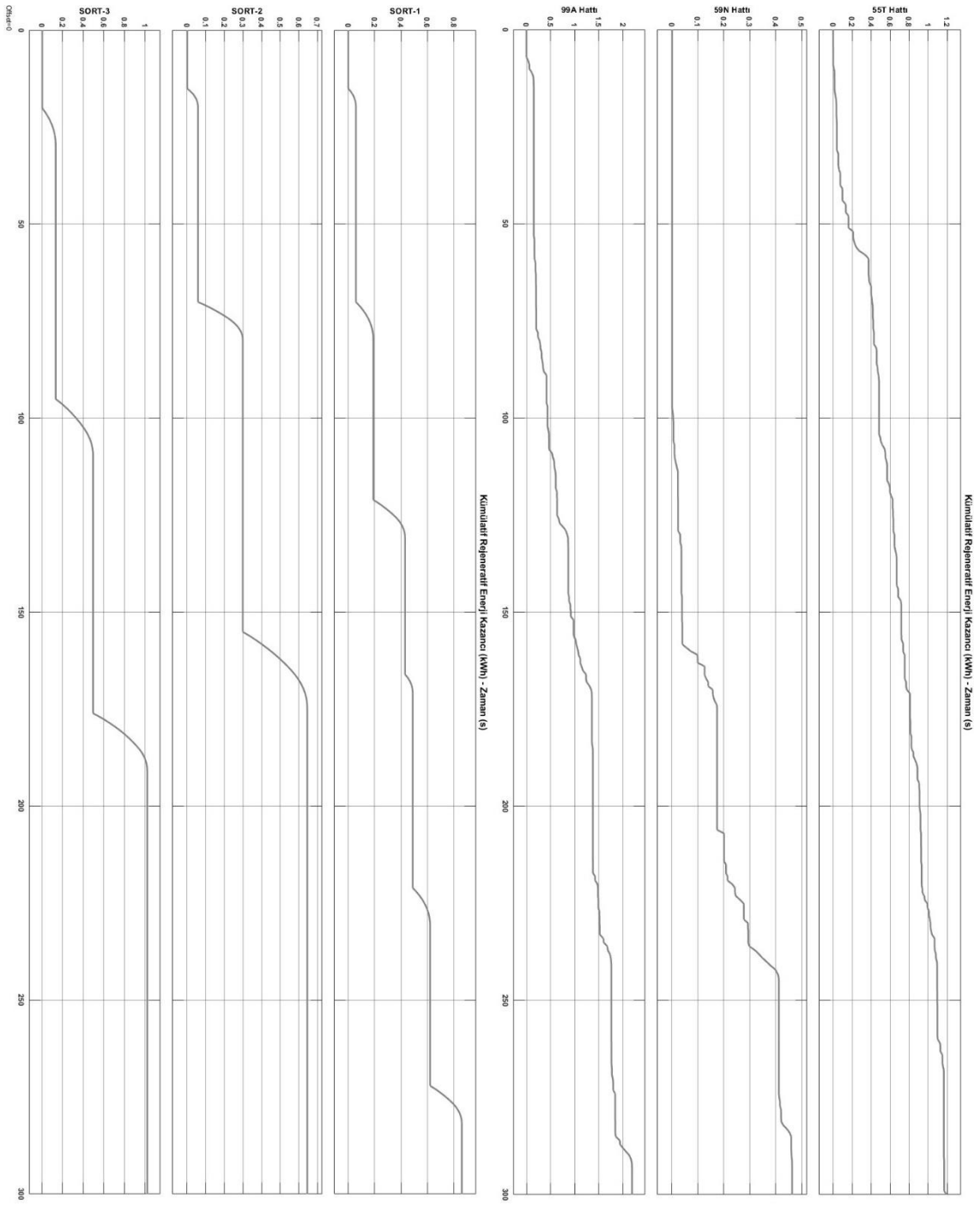
Şekil 4.10. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan motor gücü – zaman grafikleri



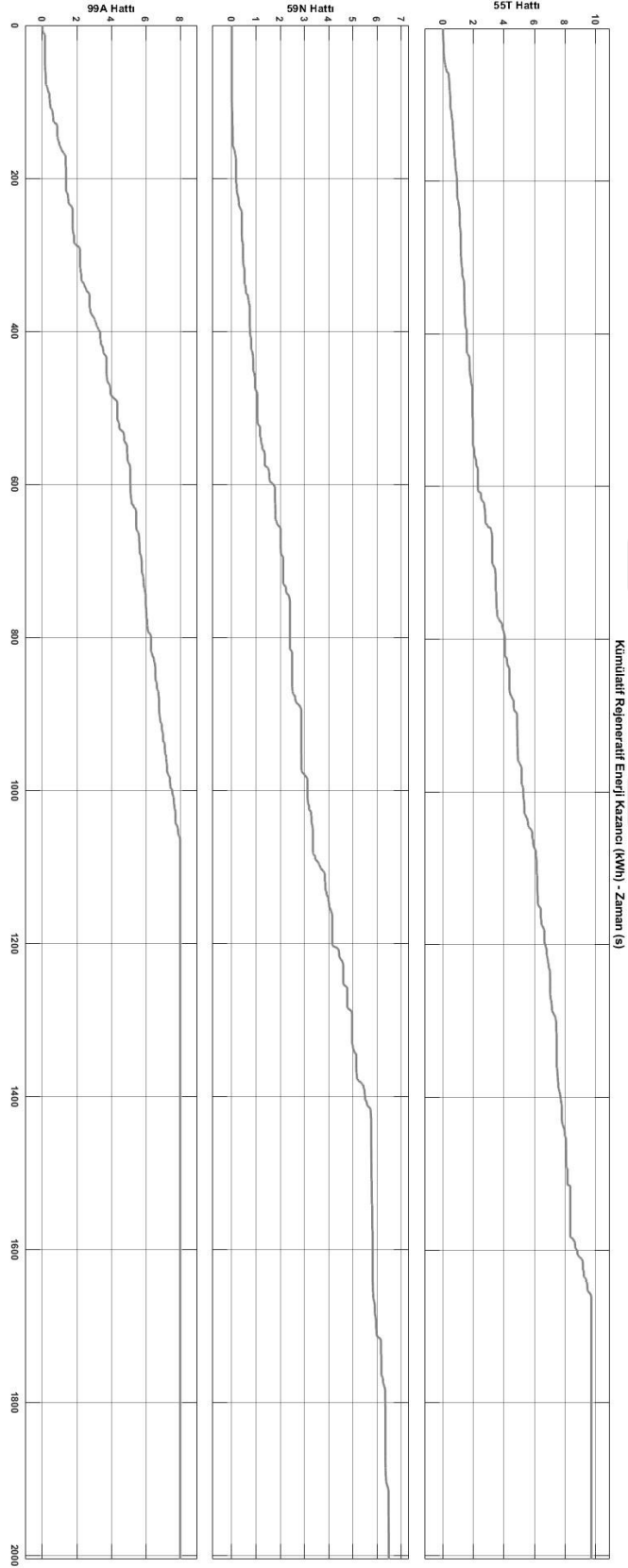
Şekil 4.11. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan rejeneratif fren enerji üretimi – zaman grafikleri



Şekil 4.12. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan rejeneratif fren enerji üretimi – zaman grafikleri



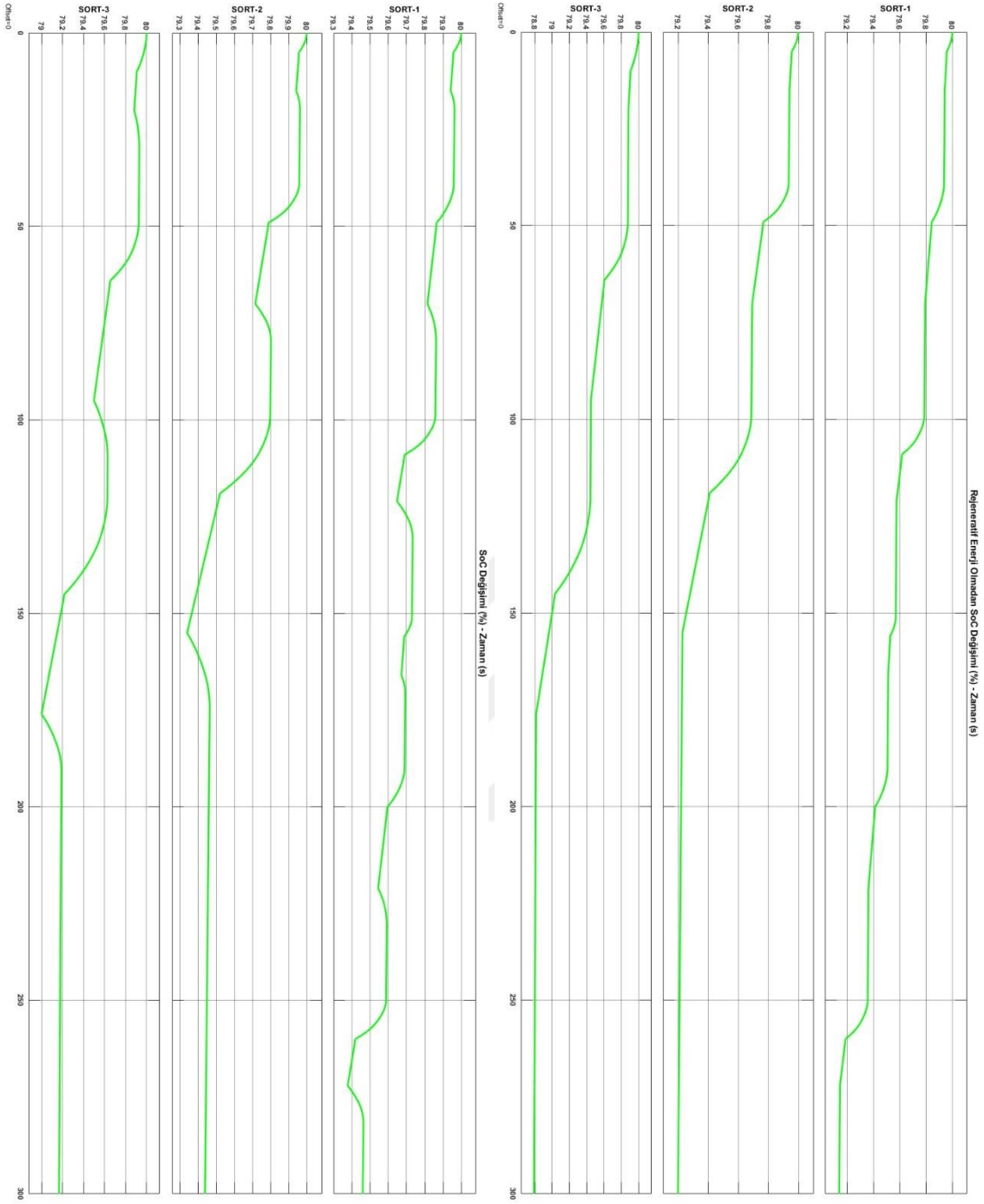
Şekil 4.13. SORT ve otobüs hattı sürüş çevrimleri ile oluşan kümülatif rejeneratif enerji kazancı – zaman grafikleri



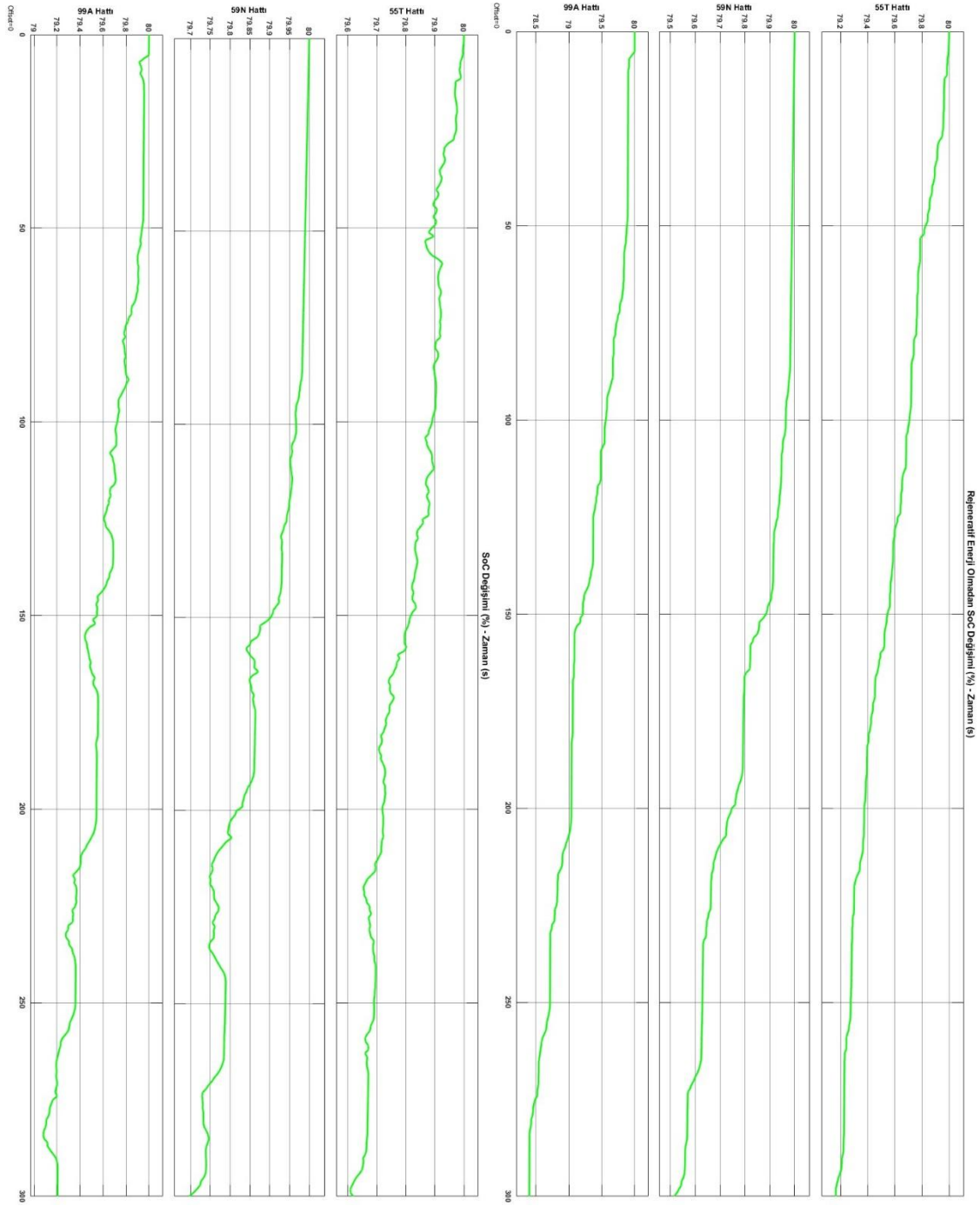
Şekil 4.14. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan kümülatif rejeneratif enerji kazancı – zaman grafikleri

Çevrimlerdeki rejeneratif frenleme enerjisi üretimi ve rejeneratif frenlemeden kazanılan toplam enerji Şekil 4.11., Şekil 4.12., Şekil 4.13. ve Şekil 4.14. de gösterilmiştir. Grafikler detaylı incelendiğinde, SORT çevrimlerinde SoC daha düzenli bir azalma eğilimi gösterdiği, ancak gerçek otobüs hatlarında SoC değerinin daha değişken olarak azaldığı gözlemlenmektedir. İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerin de ise 55T hattında SoC azalışı en fazla dalgalanmaya sahip olup, sık sık negatif ve pozitif yönlü değişimler göstermektedir. 99A ve 59N hatlarında SoC azalışı daha stabil bir davranış sergilemekte, ancak bu hatlarda da anlık değişimler görülmektedir. Özellikle 59N hattında yüksek oranda enerji geri kazanımı sağlandığı için, SoC seviyesindeki azalma eğilimi diğer çevrimlere göre daha az görünmektedir.

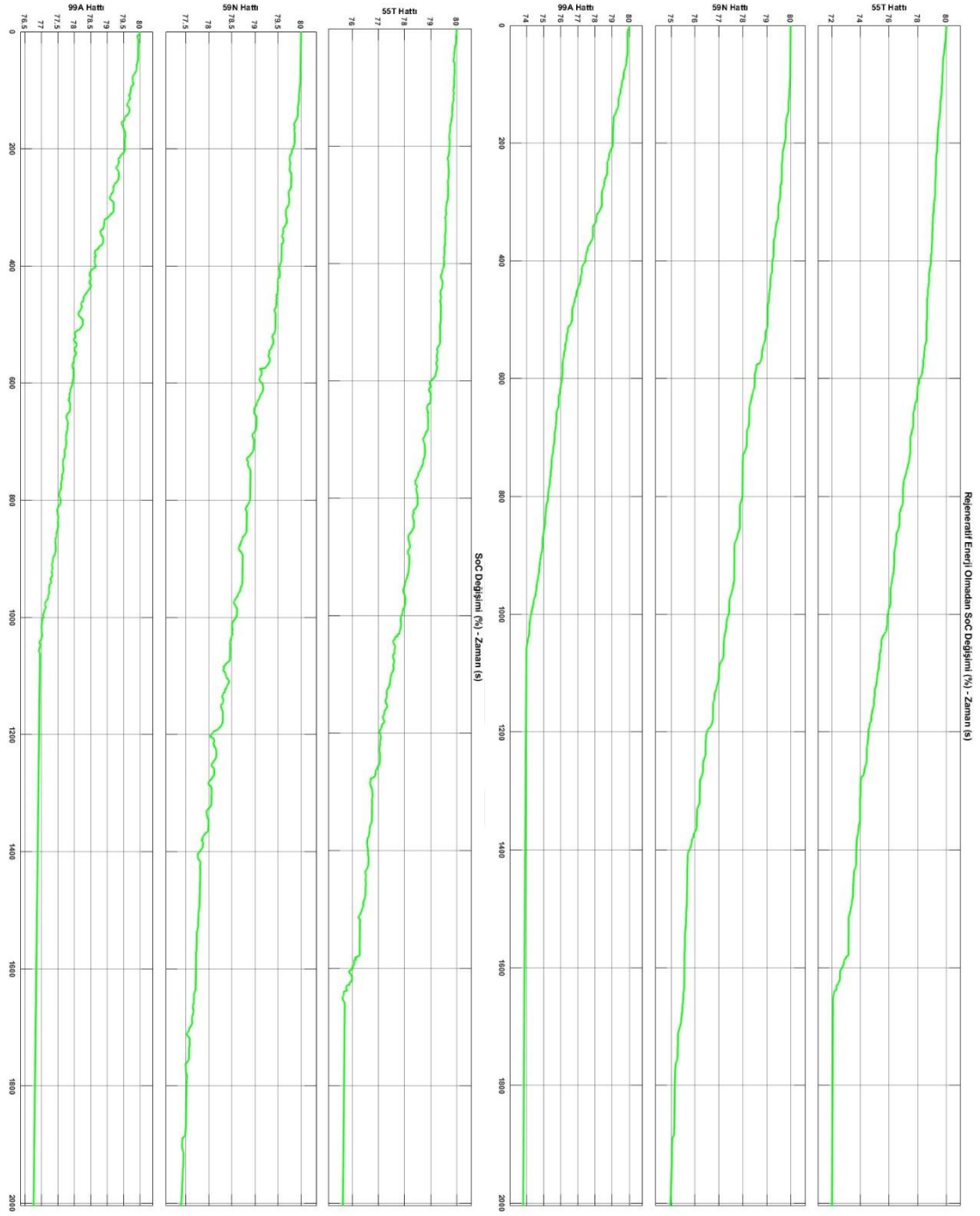
Genel olarak değerlendirildiğinde, SORT çevrimleri daha ideal yol koşullarına göre belirlendiği için öngörülebilir bir rejeneratif enerji geri kazanımı oluşurken, İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerinde rejeneratif frenleme çok daha değişken ve anlık koşullara bağlı olarak gerçekleşmektedir. En yüksek enerji geri kazanımı sağlayan hatlar 59N ve 99A olup, 6.497 kWh ve 7.994 kWh rejeneratif enerji kazanımı ile sırasıyla %47,26 ve %47,05'lik bir rejeneratif frenleme enerjisi oranına sahiptirler. 55T hattı ise en fazla toplam enerji tüketimine 12,12 kWh sahip olmakla birlikte, sık frenleme işlemleri sayesinde bataryaya gerekli miktarda enerji miktarını 9.72 kWh (%44,51) geri kazanmaktadır. SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 çevrimlerinde rejeneratif frenleme ile elde edilen enerjiler sırasıyla 0.86 kWh, 0.65 kWh ve 1.02 kWh'dir. Rejeneratif frenleme enerjisi oranları ise sırasıyla %36,38, %29,23 ve %30,53 iken, İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimlerinde (55T, 59N, 99A) enerji kazanımı ve rejeneratif enerji oranı sırasıyla 9.72 kWh (%44,51), 6.497 kWh (%47,26) ve 7.994 kWh (%47,05) seviyelerindedir. Bu durum, İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimleri koşullarında frenleme ve hız değişimlerinin daha sık gerçekleşmesi nedeniyle rejeneratif sistemlerin SORT sürüş çevrimlerinde elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek rejeneratif enerji değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, trafik yoğunluğu, eğim ve durak yapıları gibi faktörler nedeniyle enerji yönetimi daha karmaşık hale gelmektedir. Özellikle şehir içi yoğun hatlarda enerji geri kazanım stratejilerinin optimize edilmesiyle, toplam enerji tüketimi daha verimli bir şekilde yönetilebilir.



Şekil 4.15. SORT sürüş çevrimleri ile oluşan SoC – zaman ve rejeneratif enerji olmadan SoC- zaman grafikleri



Şekil 4.16. 55T, 59N ve 55T (ilk 300sn) sürüş çevrimleri ile oluşan SoC – zaman ve rejeneratif enerji olmadan SoC- zaman grafikleri



Şekil 4.17. 55T, 59N ve 55T sürüş çevrimleri ile oluşan SoC – zaman ve rejeneratif enerji olmadan SoC- zaman grafikleri

Çevrimlerdeki batarya doluluk oranları, rejeneratif frenlemenin etkin ve etkin olmağı durumlarda Şekil 4.15., Şekil 4.16. ve Şekil 4.17. de gösterilmiştir. SORT çevrimleri, belirli test koşullarında gerçekleştirildiği için daha düzenli hız, tork, ivmelenme ve motor gücü profilleri sergilemektedir. Bu çevrimlerde rejeneratif fren sistemi aktif değilken çevrim sonunda batarya doluluk oranları sırasıyla %79,14, %79,2 ve %78,79 olarak kaydedilirken, rejeneratif frenleme enerjisi aktifken batarya doluluk oranının düşüşü azalarak son değerler %79,46, %79,44 ve %79,17 olarak gözlemlenmiştir. SORT-1 en yüksek rejeneratif fren enerjisi geri kazanım oranına sahip çevrim olup (%36,38) batarya doluluk oranını etkisi en çok olan SORT çevrimidir. Bu durum sık dur-kalk içeren test senaryosundan kaynaklanmaktadır. SORT-3 çevrimi ise daha yüksek hızlara ulaşarak toplam enerji tüketimini artırmakta, ancak frenleme süresi ve frenlemeden oluşan negatif ivmelenmenin fazla oluşundan dolayı rejeneratif frenleme ile kazanılan enerji miktarı da bir miktar yüksektir.

İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimleri incelendiğinde, SORT çevrimlerinden farklı olarak daha değişken hız, ivmelenme ve tork profilleri gözlemlenmektedir. Bu otobüs sürüş çevrimlerinde rejeneratif fren sistemi aktif değilken çevrim sonunda batarya doluluk oranları (55T, 59N, 99A) sırasıyla %72,02, %74,96 ve %73,8 olarak kaydedilirken; rejeneratif frenleme enerjisi aktifken batarya doluluk oranının düşüşü azalarak son değerler %75,64, %77,39 ve %76,77 olarak gözlemlenmiştir. 55T hattı, en yüksek toplam enerji tüketim değeri olan 12,12 kWh değerine sahip olmakla birlikte, rejeneratif frenleme ile geri kazanım değeri olan 9,72 kWh (%44,51) ulaşmaktadır. Bu hat, sık dur-kalk hareketleri ve yoğun trafik akışı nedeniyle yüksek enerji tüketimi gerçekleştirirken, aynı zamanda frenleme süreçlerinin sıklığı nedeniyle önemli miktarda enerji geri kazanımı sağlamaktadır. 59N hattı 7,249kWh enerji tüketimine karşılık en yüksek geri kazanım oranına sahip olup, toplam enerji ihtiyacının %47,26'sını rejeneratif frenleme sağlamaktadır. 99A hattında ise tüketilen enerji 8,996 kWh iken, geri kazanılan enerji 7,994 kWh seviyesinde gözlemlenmiştir, bu da geri kazanım oranının %47,05 olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 4.1. Elektrikli otobüsün çevrim sonuçları

	SORT-1	SORT-2	SORT-3	55T	59N	99A
Çevrim Süresi (s)	300	194	200	1662	2005	1065
Alınan Yol (km)	1,172	1,206	1, 656	9,117	6,352	6,394
Ortalama Hız (km/h)	14,1	22,4	29,8	19,75	11,4	21,62
Maksimum Hız (km/h)	40	50	60	51,77	41,00	51,29
Başlangıç ve Bitiş yükseklik farkı (Δm)	0	0	0	-16,05	+36,73	+127,5
Başlangıç SoC (%)	80	80	80	80	80	80
Rejeneratif Enerjisiz Bitiş SoC (%)	79,14	79,2	78,79	72,02	74,96	73,8
Rejeneratif Enerjisiz Çevrimde Tüketilen Enerji (kWh)	2,393	2,227	3,365	22,2	14,01	17,24
Rejeneratif Enerji ile Bitiş SoC (%)	79,46	79,44	79,17	75,64	77,39	76,77
Çevrimde Tüketilen Enerji (kWh)	1,504	1,561	2,322	12,12	7,249	8,996
Toplam Rejeneratif Enerji (kWh)	0,86	0,65	1,02	9,72	6,497	7,994
Rejeneratif Fren ile Kazanılan Enerji (%)	36,38	29,23	30,53	44,51	47,26	47,05

Bu çalışmada oluşturulan, elektrikli bir otobüsün sürüş çevrimlerine göre rejeneratif enerji değişimini inceleyen, MATLAB/Simulink modelinden elde edilmiş nihai veriler Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tablodan da yukarıda açıklaması yapılan hız, ivme, motor devri, motor torku, motor gücü, rejeneratif frenleme enerjisi ve batarya doluluk oranı (SoC) grafiklerindeki başlıca önemli değerler gösterilmiştir.

Eğimin çok olmadığı fakat yüksek dur-kalka sahip olan 59N hattı en verimli çalışan hat olarak tespit edilmiştir. Enerji kazanımı ikinci sırada olan hat ise daha az trafik yoğunluğundan dolayı ortalama hızı biraz daha yüksek olan 99A hattıdır. 55T hattında ise eğimli yolların fazla olmasından kaynaklı rejeneratif enerji kazancı diğer hatlara göre daha düşük gözlemlenmiştir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada İstanbul yol koşullarında kullanılan bir elektrikli otobüsün SORT ve İstanbul için oluşturulan özel sürüş çevrimlerine göre rejeneratif frenleme enerjisinin değişimi, MATLAB/Simulink ortamında matematiksel modellemeyle analizi yapılmıştır. SORT çevrimleri olarak SORT-1, SORT-2 ve SORT-3 sürüş çevrimleri ve İstanbul yol koşulları içinde İstanbul'da kullanılan 55T, 59N ve 99A otobüs hatlarından elde edilen gerçek sürüş çevrimleri incelenmiştir. Hazırlanan MATLAB/Simulink programı ile otobüsün motor torku, motor gücü, rejeneratif frenleme enerjisi ve batarya doluluk oranı (SoC) belirlenen bu sürüş çevrimlerine göre incelenmiştir.

Hazırlanan MATLAB/Simulink programı, otobüsün farklı sürüş çevrimlerine göre incelenmesine, aracın değişen trafik koşullarında, eğimli yollarda ve dur-kalk yoğunluğu yüksek güzergâhlarda nasıl bir performans sergilediğini analiz etmeye yardımcı olmuştur.

Bu çalışma sayesinde, özellikle yoğun trafikli güzergâhlarda ve eğimli yollarda rejeneratif frenleme stratejilerinin nasıl iyileştirilebileceği, batarya şarj döngülerinin nasıl optimize edilebileceği ve aracın toplam menzilin nasıl artırılacağı konusunda önemli veriler elde edilmiştir. Ayrıca bu MATLAB/Simulink modelleme çalışması, elektrikli otobüslerin daha verimli çalışmasını sağlayarak enerji tasarrufu yapılmasına ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayacak veriler oluşturmuştur.

Simülasyon sonuçları, rejeneratif frenleme sisteminin enerji geri kazanım miktarını ve bunun toplam enerji tüketimi ve batarya doluluk düzeyi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre SORT çevrimleri arasında özellikle SORT-1 çevriminde 0,86 kWh rejeneratif enerji üretimi ile %36,38'lik rejeneratif enerji kazancı oranı gözlemlenmiştir. Bu da nispeten daha yoğun-dur kalkın olduğu şehir içi bölgelerde rejeneratif frenleme etkisinin yüksek olacağını göstermektedir. SORT-2 ve SORT-3 çevrimleri de sırasıyla 0,65 kWh (%29,23) ve 1,02 kWh (%30,53) enerji kazancı ile iyi performans sergilemektedir, bu da daha az yoğun kentsel bölgelerde de elektrikli otobüslerin verimli çalışabileceğini göstermektedir.

İstanbul için belirlenmiş olan otobüs sürüş çevrimleri daha yoğun trafik koşullarını temsil ettiğinden dolayı rejeneratif enerji kazancı oranı çok daha yüksek gözlemlenmiştir. Özellikle 59N sürüş çevriminde 6,497 kWh rejeneratif enerji üretimi ile %47,26'lık

rejeneratif enerji kazancı oranı gözlemlenmiştir. Bu da yine yoğun-dur kalkın fazla olduğu bölgelerde rejeneratif frenleme etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir. 55T ve 99A çevrimleri de sırasıyla 9,72 kWh (%44,51) ve 7,994 kWh (%47,05) enerji kazancı ile performans sergilemektedir.

Sonuç olarak konvansiyonel bir şehir içi otobüsünde, trafiğin yoğun olduğu yol şartlarında yakıt tüketimi çok fazla olmasına karşın bu çalışmada modellenmiş olan elektrikli bir otobüsün enerji tüketiminin düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Bu da şehir içi trafiğin yoğun olduğu İstanbul gibi şehirlerde elektrikli otobüslerin rejeneratif frenleme ile enerji kazanımının yüksek olacağı ve dolayısı ile elektrikli otobüslerin enerji verimliliğinin yüksek gerçekleşeceği görülmüştür. Model sonuçlarında rejeneratif enerji verimliliğini, yükseklik değişiminden çok hız değişiminin yani sık dur kalkın etkilediği anlaşılmıştır. Buna göre, İstanbul'da elektrikli otobüslerin en verimli şekilde kullanılabilceği yerler, yol yükseklik değişiminin az olduğu, ortalama hızların düşük, dur-kalkın fazla olduğu, yoğun şehir içi bölgeler olduğu görülmüştür. Elektrikli otobüslerin öncelikle bu yol şartlarına sahip güzergâhlarda değerlendirilmesi durumunda rejeneratif frenleme sistemi enerji verimliliği artacak olup elektrikli otobüslerin enerji tüketimlerini azaltacak ve enerji tüketim ekonomisini iyileştirecektir.

Ayrıca bu çalışmada rejeneratif frenleme enerjisine önemli etkisi olan sürücü davranışı incelenmemiştir. Özellikle ani yapılan frenlemeler mekanik frenlemeyi devreye sokmakta ve rejeneratif frenlemenin etkinliği azalmaktadır. Yapılan bu çalışmanın devamı olarak; elektrikli otobüslerin rejeneratif frenleme enerjisi kazanım oranına sürücü davranışının etkisi incelenebilir. Sürücü davranışına göre rejeneratif enerji kazanımının etkisinin incelenmesi elektrikli araçların enerji kazanımını daha belirgin bir şekilde ortaya koyacak ve toplu taşıma hizmeti veren kurumlar için faydalı bir veri oluşturacaktır. Ayrıca İstanbul dışında, farklı topografya ve trafik koşullarına sahip şehirler (örn., Ankara, İzmir gibi) içinde sürüş çevrimleri oluşturularak rejeneratif frenleme enerjisi değişiminin incelenmesi faydalı sonuçlar verebilir.

Günümüzde hem enerji maliyetleri hem de enerji tüketiminin oluşturmuş olduğu karbon ayak izi daha çok önem kazanmıştır. Bu çalışmada ortaya koyulan elektrikli otobüsün sağladığı enerji tasarrufunun, ekonomik faydası ve karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli de ayrıca detaylı olarak incelenebilir.

KAYNAKÇA

1. Özek A., (2020), "Elektrikli Bir Aracın Genel Performans Simülasyonu ve Gerçeklenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
2. Taci, M., & Erdem, Y. (2018). Elektrikli Araçlarda Rejeneratif Frenlemenin Etkisi ve Güç Analizi. *Journal of Current Researches on Engineering, Science and Technology (JoCREST)*, 4(2).
3. Kıyaklı A.O., Solmaz H., (2018), "Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink," *Science and Technology*, 2 (4), 9-15.
4. Çetin M. S., Karakaya B., Gençoğlu M. T., (2021), "Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33 (2), 755-63.
5. Yeo, W., Jung, S., Kim, S., Park, K., & Ko, J. (2020). A regenerative energy recovery system for electric vehicles charging a battery at a low speed. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J*, 5(2), 64-73.
6. Gokce, C., Ustun, O., Yilmaz, M., & Tuncay, R. N. (2006). Modeling and Simulation of a Serial-Parallel Hybrid Electrical Vehicle. *İstanbul Technical University Electrical and Electronics Engineering Pg*, 1-5.
7. Boyalı A., Güvenç L., (2011), "Hibrid Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kural Tabanlı Kontrolü," *İtü Dergisi*, 9 (2), 83-94.
8. Veza, I., Asy'ari, M. Z., Idris, M., Epin, V., Fattah, I. R., & Spraggon, M. (2023). Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV. *Alexandria Engineering Journal*, 82, 459-467.
9. Biliroğlu A.Ö., (2009), "Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
10. Özcan, M. E. (22-23 Kasım 2018). Elektrikli araç mimarileri ve batarya teknolojilerinin değerlendirilmesi. *Engineering And Technology (Uluslararası Avrasya Bilim, Mühendislik ve Teknoloji Konferansı)*, ss.1015-1023.
11. Muratoğlu, Y. ve Alkaya, A. (2016 Eylül). Elektrikli araç teknolojisi ve pil yönetim sistemi-inceleme. *Elektrik Mühendisliği*, (Sayı-458).
12. Altındemir, E. (2008). Hibrid Elektrikli Taşıtlarda Rejeneratif Frenleme.
13. Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid electric vehicles: Principles and applications with practical perspectives (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell.
14. Experix Oto Ekspertiz. (2022, 16 Mart). *Hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlar nasıl çalışır?* <https://experix.com.tr/hidrojen-yakit-hucreli-elektrikli-araclar/>
15. Zhang, J., Lu, X., Xue, J., & Li, B. (2008). Regenerative braking system for series hybrid electric city bus. *World Electric Vehicle Journal*, 2(4), 363-369.
16. Doğan, U., Erfidan, T., & Bilgin, M. Z. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA FAYDALI FRENLEME ENERJİSİNİN DEPOLANMASI. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2).
17. Suvak, H. (2016). The simulation of a full electric vehicle using the city cycle. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 5(2), 38-46.
18. Barın, B. Investigation of regenerative braking efficiency in different drive cycles
19. Buchmann, I. 2003. Batteries in a Portable World, Cadex Electronics, 2nd Edition.
20. Cody, J., Göl, Ö., Nedic, Z., Nafalski, A., & Mohtar, A. (2009). Regenerative braking in an electric vehicle. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*, (81), 113-118.
21. Song, J. (2023). Hybrid electric vehicles and regenerative braking. *Applied and Computational Engineering*, 26, 151-157.
22. Teasdale, A., Ishaku, L., Amaechi, C. V., Adelusi, I., & Abdelazim, A. (2024). A Study on an Energy-Regenerative Braking Model Using Supercapacitors and DC Motors. *World Electric Vehicle Journal*, 15(7), 326.

23. Vasiljević, S., Aleksandrović, B., Glišović, J., & Maslač, M. (2022, December). Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1271, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
24. Choi, J., Jeong, J., Park, Y. I., & Cha, S. W. (2015). Evaluation of regenerative braking effect for E-REV bus according to characteristic of driving cycle. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2, 149-155.
25. Vodovozov, V., Raud, Z., & Petlenkov, E. (2021). Review on braking energy management in electric vehicles. *Energies*, 14(15), 4477.
26. A. C. (2010). *Teaching and Learning Mathematical Modelling with Technology*, Nanyang Technological University.
27. Özece B., (2020), "Fuel Consumption Analysis of a Hybrid Road Vehicle in MATLAB Environment", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
28. Tabak H. (2023). Elektrikli bir Scooterda Rejeneratif Frenleme Uygulamasının Deneysel Araştırılması
29. Gillespie, T. (Ed.). (2021). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE international.
30. Wong, J. Y. (2022). *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons.
31. Plett, G. L. (2004). *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*. Artech House.
32. Xu, G., Li, W., Xu, K., & Song, Z. (2011). An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energies*, 4(9), 1461-1477.
33. Chau, K. T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*. John Wiley & Sons.
34. Panagiotidis, M., Delagrammatikas, G., & Assanis, D. (2000). Development and use of a regenerative braking model for a parallel hybrid electric vehicle. *SAE transactions*, 1180-1191.
35. Malode, S. K., & Adware, R. H. (2016). Regenerative braking system in electric vehicles. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(3), 394-400.
36. Geng, C., Ning, D., Guo, L., Xue, Q., & Mei, S. (2021). Simulation research on regenerative braking control strategy of hybrid electric vehicle. *Energies*, 14(8), 2202.
37. Yang, Y., He, Q., Chen, Y., & Fu, C. (2020). Efficiency optimization and control strategy of regenerative braking system with dual motor. *Energies*, 13(3), 711.
38. TEHAD. (2022, 25 Kasım). Elektrikli otomobil dünya satış rakamları. <https://tehad.org/2022/11/25/elektrikli-otomobil-dunya-satis-rakamlari/>
39. Tesisat.org. (t.y.). Elektrikli hibrid motor türleri ve tipleri. <https://www.tesisat.org/elektrikli-hibrid-motor-turleri-ve-tipleri.html>
40. Khanna, A. R. (2025). Life cycle carbon footprint beyond manufacturing. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, 7(1), 1–16.
41. Dynamic Brake. (n.d.). The future of the reciprocating engine. <https://dynamicbrake.com/future-reciprocating-engine/>
42. DIYguru. (n.d.). Introduction to regenerative braking system. <https://diyguru.org/term/introduction-to-regenerative-braking-system/>
43. Acar, E., Jain, N., Ramu, P., Hwang, C., & Lee, I. (2024). A survey on design optimization of battery electric vehicle components, systems, and management. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 67(3), 27.
44. Yu, K., Yang, H., Kawabe, T., & Tan, X. (2015). Model predictive control of a power-split hybrid electric vehicle system with slope preview. *Artificial Life and Robotics*, 20, 305-314.