T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN TEK PEDAL KONTROLÜNE DAYALI REJENERATİF FRENLEMENİN ANALİZİ

Ebrunur
FİDAN

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN TEK PEDAL KONTROLÜNE DAYALI REJENERATİF FRENLEMENİN ANALİZİ

Ebrunur FİDAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN TEK PEDAL KONTROLÜNE DAYALI REJENERATİF FRENLEMENİN ANALİZİ

Ebrunur FİDAN
0009-0006-1981-8672

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)
0000-0002-8720-7594

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN TEK PEDAL KONTROLÜNE DAYALI REJENERATİF FRENLEMENİN ANALİZİ

Ebrunur FİDAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr.Murat YAZICI

One Pedal Driving (OPD), elektrikli araçlarda hızlanma ve yavaşlamanın tek bir pedal ile gerçekleştirilmesini sağlayan bir kontrol stratejisidir. Bu sistem, yavaşlama sırasında kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini mümkün kılan rejeneratif frenleme ile entegre çalışarak enerji verimliliğini ve sürücü konforunu artırır. Böylece geleneksel frenleme ihtiyacı önemli ölçüde azalır.

Bu çalışma, OPD sisteminin farklı yol eğimleri ve araç hızları altındaki performansını incelemektedir. Elde edilen sonuçlar, enerji geri kazanımının özellikle eğimli yollarda ve orta hız aralıklarında arttığını; düz zemin veya düşük hızlarda ise rejenerasyonun sınırlı kaldığını göstermektedir. Ayrıca OPD, sağladığı yumuşak yavaşlama sayesinde hem sürüş konforunu hem de boylamasına dinamik kararlılığı iyileştirmektedir. Hızlanma ve frenleme arasındaki ani geçişleri azaltan bu sistem, taşıt kararlılığını ve konforunu artırarak sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve gelişmiş dinamik performans açısından modern elektrikli araç tasarımlarında kilit bir teknoloji hâline gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tek pedal sürüş, sürüş konforu, rejeneratif frenleme, enerji geri kazanımı, fren aşınması

ABSTRACT

MSc Thesis

IMPACT OF REGENERATIVE BRAKING-ORIENTED ONE PEDAL DRIVING ON VEHICLE DYNAMIC PERFORMANCE

Ebrunur FİDAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

One Pedal Driving (OPD) is a control strategy in electric vehicles that allows acceleration and deceleration with a single pedal. It improves energy efficiency and driver comfort by integrating regenerative braking, which converts kinetic energy into electrical energy during deceleration, reducing the need for conventional braking.

This study examines OPD performance under different road slopes and vehicle speeds. Results show that energy recovery increases on downhill slopes and at moderate speeds, while flat roads or low speeds offer limited regeneration. OPD also improves ride comfort and longitudinal stability by providing smooth deceleration. OPD enhances vehicle stability and comfort by reducing abrupt transitions between acceleration and braking, making it a key technology in modern EV design for sustainability, efficiency, and advanced dynamics.

Key words: One pedal driving, ride comfort, regenerative braking, energy recovery, brake wear

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, elektrikli araçlarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak geliştirilen tek pedal kontrolüne dayalı rejeneratif frenleme sisteminin taşıt dinamiği üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Günümüz otomotiv endüstrisinde, sürdürülebilirlik ve enerji yönetimi konuları öncelikli araştırma alanları arasında yer almakta; elektrikli araç teknolojileri ise bu dönüşümün en önemli yapı taşlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, rejeneratif frenleme sistemleri yalnızca enerji geri kazanım potansiyeliyle değil, aynı zamanda sürüş karakteristiği ve taşıt dinamiği üzerindeki etkileriyle de kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gereken önemli sistemlerdir.

Bu çalışmada, tek pedal sürüş modunun taşıt üzerindeki dinamik etkileri hem teorik hem de simülasyon ortamında kapsamlı olarak incelenmiştir. Simülasyon tabanlı analizlerde, farklı rejeneratif frenleme karakteristiklerinin taşıt ivmelenmesi, aks yük transferi, tekerlek kayması ve gövde hareketleri üzerindeki etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, enerji geri kazanım miktarları ve bu miktarların toplam enerji tüketimine olan katkıları da ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübeleriyle süreci yönlendiren değerli danışmanım Prof. Dr. Murat Yazıcı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu süreçte desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve çalışma arkadaşlarıma minnettarım.

Bu çalışmanın, elektrikli araç teknolojileri alanında yapılacak gelecekteki araştırmalara katkı sağlaması en büyük temennimdir.

Ebrunur FİDAN
12/11/2025

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	İvme (boylamasına)
CoG	Ağırlık merkezi
ΔF	Dinamik yük transferi
E_k	Kinetik enerji
E_{regen}	Geri kazanılan enerji
Fz	Düşey tekerlek kuvveti
L	Dingil mesafesi
m	Araç kütlesi
P	Anlık güç
RPM	Motor devir sayısı
T	Motor torku (moment)
v	Hız
ω	Açısal hız
ζ	Sönüm oranı
k	Yay sabiti
h	Ağırlık merkezinin yerden yüksekliği
Δt	Zaman adımı
$Slip$	Tekerlek kayma oranı

Kısaltmalar	Açıklama
ADAMS/Car	Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems/Car
ABS	Anti-lock Braking System (Kilitlenme Önleyici Fren Sistemi)
BMS	Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)
CoG	Center of Gravity (Ağırlık Merkezi)
EV	Electric Vehicle (Elektrikli Araç)
OPD	One Pedal Driving (Tek Pedal Sürüş)
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor (Sabit Mıknatıslı Senkron Motor)
SOC	State of Charge (Batarya Doluluk Seviyesi)
RPM	Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
ECU	Electronic Control Unit (Elektronik Kontrol Ünitesi)
ΔF	Dinamik yük transferi

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	OPD sisteminin çalışma mekanizması(Kaynak: Hussain, I., Mekhilef, S., Saidur, R., Hussain, A., Khan, M. A. ve Razzaq, N. A. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. Smart Energy, 1, 100005.)…….	5
Şekil 2.2.	Rejeneratif frenleme seviyesi ayar düğmesi (MG Motor India) (2021, 2 Eylül). *Taking a look at the three levels of regenerative braking in your ZS EV*. Erişim adresi: https://www.mgmotor.co.in/blogs/taking-a-look-at-the-three-levels-of-regenerative-braking-in-your-zs-ev).....	7
Şekil 2.3.	Bağımsız ön süspansiyon sistemi örnek görseli ……...	9
Şekil 2.4.	Helezon yay görseli (Kaynak: Sixt Türkiye. (t.y.)……..	10
Şekil 2.5.	Kamber Açısının Türleri: Negatif, Sıfır ve Pozitif Kamber….	12
Şekil 2.6.	Kaster Açısının Türleri: Pozitif, Sıfır ve Negatif Kaster (Kaynak: Çeyrek Mühendis. (t.y.). Otomobillerin tekerlek açıları. https://ceyrekmuhendis.com/otomobillerin-tekerler-acilari/).....	
Şekil 2.7.	Toe-In ve Toe-Out Açılarının Şematik Gösterimi (Kaynak: Çeyrek Mühendis. (t.y.). Otomobillerin tekerlek açıları. https://ceyrekmuhendis.com/otomobillerin-tekerler-acilari/).....	12
Şekil 3.1.	Event Builder Arayüzü ve Özellikleri……...	17
Şekil 3.2.	Rejeneratif Frenlemenin Yönetimi……....	21
Şekil 3.3.	Hafif Rejeneratif Frenleme Profili…….……	23
Şekil 3.4.	OPD – Hafif Rejeneratif Frenleme Profili…….……	26
Şekil 3.5.	OPD – Orta Seviye Rejeneratif Frenleme Profili…….…….	26
Şekil 3.6.	OPD – Agresif Rejeneratif Frenleme Profili…….……	25
Şekil 4.1.	Simülasyon Fren Pedalı İnput Grafiği…….…..	31
Şekil 4.2.	Simülasyon Throttle Haritası…….….	32
Şekil 4.3.	Longitudinal Velocity (Boylamasına Hız Değişimi)……..……	32
Şekil 4.4.	Longitudinal Acceleration (Boylamasına İvme Profili)……..…	33
Şekil 4.5.	Pitch Angle (Taşıt Gövdesinin Eğilme Açısı)……...	34
Şekil 4.6.	Ön Aks Düşey Kuvvet Dağılımı (Fz)…….….	36
Şekil 4.7.	Tüm OPD Senaryoları İçin Ortak Throttle (gaz pedalı) Komutu Profili…….	39
Şekil 4.8.	Farklı rejeneratif frenleme seviyelerine göre taşıtın boylamasına hız değişimi (Velocity vs. Time)……..……	39
Şekil 4.9.	Farklı rejeneratif frenleme seviyelerinde taşıtın boylamasına ivme değişimi…….…..	41
Şekil 4.10.	Rejeneratif Frenleme Seviyelerine Göre Yük Transferi……	42
Şekil 4.11.	Urban Sürüş Senaryosunda Gaz Pedalı (Throttle) Girdi Profili Tanımlaması…….……..	44
Şekil 4.12.	Urban Sürüş Senaryosu İçin Throttle Input Profili: Aggressive ve Moderate Regenerative Braking Karşılaştırması……..…….	45
Şekil 4.13.	İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Motor Çıkış Açısal Hızının (Engine Output Omega) Zamanla Değişimi……..	46
Şekil 4.14.	İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Motor Map	47

	Torkunun Zamanla Değişimi……	
Şekil 4.15.	İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Boylamasına İvmenin (Longitudinal Acceleration) Zamanla Değişimi…….	48
Şekil 4.16.	İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Pitch Açısının Zamanla Değişimi……..…	49
Şekil 4.17.	İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Boylamasına Tekerlek Kaymasının Zamanla Değişimi…….….	51
Şekil 4.18.	Fren Pedalı ile Frenleme……..……..	62
Şekil 4.19.	Rejeneratif Frenleme ve Fren Pedalı Desteği…….....	63
Şekil 4.20.	Rejeneratif Frenleme ……..…….……	63
Şekil 4.21.	Hız-Zaman Grafiği ……..……..	64
Şekil 4.22.	Fren Pedalı Kuvveti - Zaman Grafiği ……..…….....	65
Şekil 4.23.	Düşük Hızlar için Fren Pedalı Girdisi ile Sürüş Senaryosu…..	66
Şekil 4.24.	Tam Frenleme Analizi Tork Haritası ……..…….…….	67
Şekil 4.25.	Tam Frenleme Analizi Hız Zaman Grafiği …….…….	67
Şekil 4.26.	Tekerlek Dikey Yük Zaman Grafiği…….…….....	69
Şekil 4.27.	Yaw Rate Grafiği …….….	74
Şekil 4.28	Yaw Açısı Grafiği …….	75
Şekil 4.29.	Ön Aks Slip Açısının Zamanla Değişimi …….	76
Şekil 4.30.	Arka Aks Slip Açısının Zamanla Değişimi …….	77
Şekil 4.31.	Ön Aks Toplam Yanal Yük Transferinin Zamanla Değişimi…	79
Şekil 4.32.	Arka Aks Toplam Yanal Yük Transferinin Zamanla Değişimi.	80
Şekil 4.33.	Gaz Pedalı Konumu (Throttle Map) …….	83
Şekil 4.34.	Fren Kuvveti (Brake Force) …….…….	83
Şekil 4.35.	Model Ağırlıkları …….…….	85
Şekil 4.36.	Hız Zaman Grafiği ……..…….	84
Şekil 4.37.	Boyuna İvme (Ax) ……...…….	85
Şekil 4.38.	Rejeneratif Frenleme Fazı 11–18 s arası (Output rpm front)….	88
Şekil 4.39.	Rejeneratif Frenleme Fazı 51–63 s arası (Output Torque Front).	
Şekil 4.40.	Rejeneratif Frenleme Fazı 51–63 s arası (Output rpm front)….	88
Şekil 4.41.	Rejeneratif Frenleme Fazı 82–107 s arası (Output torque front).	
Şekil 4.42.	Rejeneratif Frenleme Fazı 82–107 s arası (Output rpm front)….	91
Şekil 4.43.	Rejeneratif Frenleme Fazı 131–158 s arası (Output rpm front)...	93
Şekil 4.44.	Rejeneratif Frenleme Fazı 131–158 s arası (Output torque front)	94

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 4
2.1. Rejeneratif Frenleme Sistemleri 5
2.2. One Pedal Driving (OPD) Sistemi 6
2.3. Taşıt Dinamiği ile İlgili Temel Kavramlar 8
2.4. Süspansiyon Sisteminin Temel Elemanları ve Parametreleri 9
2.4.1.Yay Elemanları 10
2.4.2. Damper (amortisör) Elemanları 10
2.4.3.Geometrik Bağlantı Elemanları 11
2.4.4. Süspansiyon Rijitliği ve Doğrusal Olmayan Tepkiler 12
2.4.5.Understeer Karakteristiği 12
2.5. Araç Ağırlığı, Ağırlık Merkezi ve Dinamik Etkileri 13
2.5.1.Ağırlık Merkezi (Center of Gravity – COG) 13
2.5.2. Kütle Dağılımı ve Dinamik Yük Transferi 13
2.6. Literatürde OPD ve Taşıt Dinamiği Etkileşimi 14
3. MATERYAL ve YÖNTEM 16
3.1. Simülasyon Ortamı Tanıtımı 16
3.2. Event Builder Arayüzü Tanıtımı ve Yetkinlikleri 17
3.3. Event Builder Arayüzü Parametreleri Tanıtımı 18
3.4. Rejeneratif Frenleme Davranışının Modellenmesi 20
3.5. Simülasyon Senaryolarının Tanımlanması 23
3.5.1. Senaryo 1: Klasik Frenleme ile Yavaşlama (Referans Senaryo) 23
3.5.2. Senaryo 2: OPD Tabanlı Rejeneratif Frenleme ile Yavaşlama 23
3.5.3. Kademeli OPD Profili 24
4. BULGULAR 29
4.1. Farklı Hızlarda OPD Davranışının Analizi için Senaryo Kurgusu 29
4.1.1.Değerlendirme ve Bulgular 31
4.2. Rejeneratif Frenleme Tork Profillerinin Etkisi (OPD Seviyesi) 37
4.3. Urban Road Sürüş Senaryosunda Farklı Rejeneratif Frenleme Karakteristiklerinin Analizi 42
4.4. Enerji Geri Kazanım Hesaplama Yöntemleri 52
4.4.1.Kinetik Enerji Temelli Hesaplama 52
4.4.2.Motor Torku ve Devir (rpm) Temelli Hesaplama 54
4.4.3.Yöntemlerin Karşılaştırılması 55
4.4.4.Enerji Geri Kazanımı Hesabı 55
4.4.5.Temel Fiziksel Model 56
4.4.6.Anlık Güç Hesaplaması 56
4.4.7. Enerji Hesaplaması 57
4.4.8. Ölçeklendirme ve Uzun Süreli Etki 57
4.4.9. Uygulanan Parametreler ve Özel Durumlar 57
4.5. Agresif Rejeneratif Frenleme Enerji Geri Kazanımı 58
4.6. Rejeneratif Frenleme Profillerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 59

4.7. Tam Frenleme Analizi 61
4.7.1. Düşük Hızlarda Tam Frenleme Analizi 65
4.7.2. Kütle Merkezi ve Ağırlık Dağılımının OPD Davranışına Etkileri 68
4.7.3. Statik Ağırlık Dağılımının Belirlenmesi 68
4.7.4. Ön–Arka Aks Ağırlık Dağılımının OPD Davranışına Etkisi 71
4.7.5. Understeer Karakteristiğinin One Pedal Driving (OPD) Davranışına Etkisi 72
4.7.6. Viraj Anında Gücü Kesme Testi ile OPD Davranışının Değerlendirilmesi 73
4.7.7. Taşıt Toplam Kütlesinin OPD Davranışına Etkisi 81
4.7.8. Urban Road Dosya Hazırlığı 82
4.7.9. Model Ağırlık Ayarlaması 84
4.7.10. Analiz Çıktıları 84
4.7.11. Enerji Geri Kazanımı Hesabı 87
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 98
KAYNAKLAR 101
ÖZGEÇMİŞ 104

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde taşıtların yol tutuş performansını artırmak, sürüş güvenliğini yükseltmek ve yolcu konforunu iyileştirmek amacıyla süspansiyon sistemleri üzerine uzun yıllardır kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Süspansiyon sistemleri, araç ile yol yüzeyi arasındaki etkileşimi yöneterek taşıt dinamiği açısından temel bir rol üstlenmektedir. Bu sistemler, hem yol kaynaklı titreşim ve darbeleri sönümlemek hem de taşıtın denge ve kontrolünü sağlamak üzere yapılandırılmış karmaşık alt sistemlerdir. Konvansiyonel, yani pasif süspansiyon sistemleri; yay ve sönümleyici (damper) olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Yay elemanları, yol yüzeyinden gelen mekanik enerjiyi elastik deformasyon aracılığıyla geçici olarak depolarken; damper elemanları bu enerjiyi viskoz sürtünme mekanizmasıyla ısı enerjisine dönüştürerek sistemden sönümlemektedir. Ancak bu sürecin doğal sonucu olarak, süspansiyon sistemi yol koşullarından alınan enerjinin büyük bir kısmını kullanmadan ısı şeklinde çevreye yaymakta ve bu durum enerji verimliliği bakımından kayıp oluşturmaktadır.

Günümüzde, özellikle elektrikli ve hibrit araç teknolojilerinin hızlı bir şekilde yaygınlaşmasıyla birlikte, enerji verimliliğini artırmaya ve atıl enerjiyi geri kazanmaya yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında rejeneratif frenleme sistemleri ve bu sistemle entegre çalışan One Pedal Driving (OPD) sürüş modu ön plana çıkmaktadır. OPD sistemi, taşıtın yavaşlama sürecinde ortaya çıkan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bataryaya geri kazandırmakta ve bu sayede geleneksel mekanik frenleme ihtiyacını önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylelikle, daha önce damper mekanizması aracılığıyla ısıya dönüşerek çevreye yayılan enerjinin benzer bileşenleri, artık taşıtın enerji yönetim sistemi tarafından değerlendirilerek sistem verimliliğine katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca enerji tasarrufu sunmakla kalmayıp, aynı zamanda taşıt dinamiği üzerinde de doğrudan etkili olan bütüncül bir mühendislik çözümü niteliği taşımaktadır.

One Pedal Driving (OPD) sistemi, elektrikli araç teknolojilerinin gelişimine paralel olarak, alternatif sürüş dinamikleri ve enerji yönetimi çözümleri arayışının bir sonucu

olarak 2010'lu yılların başlarında geliştirilmeye başlanmıştır. Sistem, elektrikli motorların ters tork üretme yeteneğinden faydalanarak taşıtın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. OPD teknolojisinin ticarileşmiş ilk örneği, 2016 yılında Nissan tarafından geliştirilen ve "e-Pedal" adıyla duyurulan Leaf modeli üzerinden pazara sunulmuştur. Bu gelişmeyi takiben Tesla, BMW ve Chevrolet gibi üreticiler de benzer rejeneratif sürüş modlarını kendi araç platformlarına entegre ederek teknolojiyi farklı kullanım senaryolarına uyarlamıştır. OPD sisteminin başlangıçtaki temel hedefi; sürücünün yalnızca gaz pedalı üzerinden hızlanma ve yavaşlama fonksiyonlarını gerçekleştirebilmesini sağlayarak hem sürüşü sadeleştirmek hem de enerji verimliliğini artırmaktı. Özellikle yoğun şehir içi trafik koşullarında fren pedalı kullanımını minimize etmesi sayesinde daha akıcı ve konfor odaklı bir sürüş deneyimi sunması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, sistemin evrimi sadece konfor odaklı olmamış; batarya ömrünün korunması, mekanik fren bileşenlerinin aşınmasının azaltılması ve rejeneratif enerji geri kazanım oranlarının iyileştirilmesi gibi çok boyutlu avantajlar sağlayan entegre bir enerji yönetim stratejisine dönüşmüştür. Bu bağlamda OPD, günümüzde yalnızca sürüş kolaylığı sunan bir teknoloji değil, aynı zamanda elektrikli taşıtların sistem bütünlüğü ve dinamik performansı üzerinde belirleyici etkiler yaratan yenilikçi bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmektedir.

Elektrikli taşıt teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte One Pedal Driving (OPD) sistemleri, birçok otomotiv üreticisi tarafından farklı sürüş karakteristiklerine uyarlanarak geliştirilmiştir. Temel prensibi aynı kalmakla birlikte, OPD sistemleri firmaların kullanıcı beklentileri, sürüş alışkanlıkları ve marka kimlikleri doğrultusunda çeşitli şekillerde özelleştirilmiştir. Örneğin, Nissan tarafından 2016 yılında Leaf modeliyle sunulan ve "e-Pedal" olarak adlandırılan sistem, yüksek rejeneratif frenleme oranı sayesinde yalnızca gaz pedalı kullanılarak aracın hızlandırılmasını ve yavaşlatılmasını mümkün kılmaktadır. Bu sistem, özellikle şehir içi kullanım koşullarına yönelik optimize edilmiş olup, %10'a varan menzil artışı sağlamakta ve aynı zamanda sürüş konforunu artırmayı hedeflemektedir. Buna karşın Tesla, OPD fonksiyonunu daha esnek bir yapıda sunarak, "creep" ve "hold" gibi farklı sürüş modları aracılığıyla kullanıcıların geleneksel içten yanmalı araç hissiyatını korumasına veya tam rejeneratif frenleme modunu seçmesine imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım, sürücü adaptasyonunu kolaylaştırmanın yanı sıra,

mekanik fren bileşenleri üzerindeki yükü azaltarak bakım gereksinimlerini de olumlu yönde etkilemektedir. Benzer şekilde Hyundai ve Kia, direksiyon üzerindeki kulakçıklar vasıtasıyla rejeneratif frenleme seviyesinin anlık olarak ayarlanabildiği "i-Pedal" teknolojisini geliştirerek, sürücülere farklı sürüş koşullarına uygun dinamik bir kontrol imkânı sunmaktadır. Bu sistem sayesinde kullanıcılar, serbest yuvarlanma (coasting) davranışına yakın bir sürüş karakteristiği ile daha agresif frenleme modları arasında geçiş yapabilmekte ve bu da kullanıcı tercihlerine yüksek düzeyde uyum sağlamaktadır. Öte yandan performans odaklı markalar arasında yer alan Porsche, OPD sistemini daha farklı bir yaklaşımla ele almıştır. Şirketin geliştirdiği stratejide, gaz pedalından ayağın çekilmesi durumunda araç serbest yuvarlanma moduna geçmekte, rejeneratif frenleme ise yalnızca fren pedalı aktive edildiğinde devreye girmektedir. Bu tasarım tercihi, Porsche'nin dinamik sürüş performansını koruma yönündeki mühendislik yaklaşımının bir yansımasıdır. Ayrıca firma, sürekli aktif rejeneratif frenleme fonksiyonunun sürüş dinamikleri üzerinde olumsuz etki yaratabileceğini ve her koşulda enerji verimliliği açısından en iyi çözümü sunmadığını savunmaktadır.Bu farklı uygulama örnekleri, OPD sisteminin yalnızca bir enerji geri kazanım mekanizması değil, aynı zamanda sürüş konforu, fren sisteminin mekanik dayanımı, kullanıcı deneyimi ve marka kimliği üzerinde çok boyutlu etkiler yaratan kapsamlı bir mühendislik çözümüne dönüştüğünü açıkça ortaya koymaktadır.

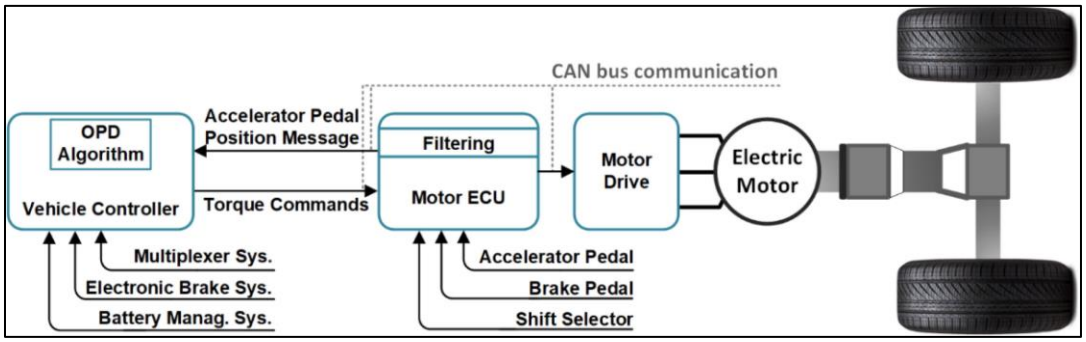
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

One-Pedal Driving (OPD) sistemi, elektrikli araçlarda tahrik motorunun çift yönlü çalışma prensibi üzerine kurgulanmış bir teknolojidir. Bu sistemde elektrik motoru, hem tahrik (çekiş) hem de jeneratör (enerji geri kazanım) fonksiyonlarını yerine getirebilecek şekilde çalışır. Sürücü gaz pedalına bastığında motor, bataryadan aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek araca çekiş kuvveti sağlar ve hızlanmayı mümkün kılar. Ancak pedal serbest bırakıldığında motor jeneratör moduna geçer ve bu noktadan itibaren aracın sahip olduğu kinetik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya geri kazandırılır.

Bu süreç teknik açıdan, motorun elektromanyetik alan yapısında meydana gelen ters çevrim ile gerçekleşir. Araç hareket ederken tekerleklerin dönme hareketi motora iletilir ve rotorun dönmesi sonucunda stator sargılarında bir gerilim indüklenir. Bu indüklenen gerilim, inverter yardımıyla doğru akıma çevrilerek batarya sistemine aktarılır. Ancak bu enerji dönüşümü sırasında motor üzerinde oluşan elektromanyetik direnç, tekerleklerde negatif bir tork meydana getirerek aracın yavaşlamasına sebep olur. Bu etki, sürücünün fren pedalına basmadan da aracın hızını düşürebilmesini sağlar.

Sistemin kontrol algoritmaları, oluşan bu rejeneratif frenleme torkunu pedal konumu, araç hızı ve seçilen sürüş moduna bağlı olarak sürekli olarak optimize eder. Birçok modern OPD sisteminde, gaz pedalı tamamen bırakıldığında araç sıfır hıza kadar yavaşlayabilir ve durabilir. Bununla birlikte bazı sistemlerde ise düşük hızlarda tamamen durma fonksiyonu için mekanik fren desteği gereklidir.

Rejeneratif frenleme miktarı, yalnızca sistemin tasarımına değil, aynı zamanda bataryanın şarj durumu (SOC), sıcaklık limitleri ve enerji yönetim stratejilerine de bağlıdır. Batarya doluluk oranının yüksek olduğu veya sıcaklık değerlerinin sınır değerlerine ulaştığı durumlarda, sistem rejeneratif frenleme kapasitesini otomatik olarak sınırlandırır. Bu gibi koşullarda, yavaşlama kuvvetinin geri kalan kısmı mekanik fren sistemi tarafından sağlanır.



Şekil 2.1. OPD sisteminin çalışma mekanizması(Kaynak: Hussain, I., Mekhilef, S., Saidur, R., Hussain, A., Khan, M. A. ve Razzaq, N. A. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. Smart Energy, 1, 100005.)

Bu mekanizma aynı zamanda taşıt dinamiği ve sürüş konforu üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Gaz pedalının bırakılmasıyla birlikte ortaya çıkan yavaşlama kuvvetinin büyüklüğü, sürüş karakteristiğini ciddi biçimde etkiler. Ani ve yüksek rejeneratif frenleme, yolcuların ileriye doğru eğilmesine ve konfor kaybına neden olabilir. Bu nedenle güncel sistemlerde, sürücüye farklı rejeneratif frenleme seviyeleri sunulmakta ve bu sayede yavaşlama karakteristiği sürücü tercihlerine göre ayarlanabilmektedir.

2.1. Rejeneratif Frenleme Sistemleri

Rejeneratif frenleme sistemi, başta elektrikli ve hibrit araçlar olmak üzere çağdaş taşıt teknolojilerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak yaygın biçimde uygulanan bir enerji geri kazanım yöntemidir. Sistemin temel işleyiş prensibi, taşıtın kinetik enerjisinin yavaşlama esnasında elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu enerjinin batarya sistemine geri beslenmesi esasına dayanmaktadır. Konvansiyonel frenleme sistemlerinde, taşıtın kinetik enerjisi sürtünme kuvvetleri aracılığıyla ısıya dönüştürülerek çevreye kaybedilmektedir. Buna karşın, rejeneratif frenleme sistemleri bu enerji kaybını minimize ederek taşıtın toplam enerji verimliliğini anlamlı düzeyde artırmaktadır. Bu sistemler genellikle sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) veya asenkron motorlar ile entegre çalışmakta olup, elektrik motorunun jeneratör modunda çalıştırılması suretiyle ters yönlü elektromanyetik tork üretirler. Üretilen bu ters tork, taşıtın hızını düşürerek yavaşlamasını sağlarken, aynı anda mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek batarya sistemine aktarır. Bu çift işlevli mekanizma, hem sürüş

dinamiklerini destekleyen etkili bir yavaşlama kuvveti üretmekte hem de enerji geri kazanımı yoluyla taşıtın menzil performansını ve enerji sürdürülebilirliğini optimize etmektedir.

Rejeneratif frenleme, sadece enerji geri kazanımı sağlamaz; aynı zamanda fren balatalarının daha az kullanılması sayesinde mekanik fren sisteminin ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini düşürür. Bununla birlikte, bu sistemin ürettiği yavaşlatma kuvveti, aracın mevcut hızına, bataryanın doluluk seviyesine ve motor kapasitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik, sürüş konforu ve frenleme kararlılığı açısından dikkatle yönetilmesi gereken bir parametredir. Bu nedenle, rejeneratif frenleme sistemleri çoğunlukla mekanik frenleme ile birlikte hibrit bir yapı içerisinde çalıştırılır; özellikle acil frenleme durumlarında mekanik sistem devreye girerek yeterli frenleme kuvveti sağlanır.

Sonuç olarak rejeneratif frenleme sistemleri, modern taşıt mühendisliğinde enerji verimliliği, sistem entegrasyonu ve dinamik denge açısından çok boyutlu katkılar sunmakta; elektrikli araçların sürdürülebilirliğini destekleyen temel bileşenlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

2.2. One Pedal Driving (OPD) Sistemi

One Pedal Driving (OPD) sistemi, elektrikli taşıtlarda sürücünün yalnızca gaz pedalı kullanarak hem hızlanma hem de yavaşlama gerçekleştirebilmesine olanak tanıyan entegre bir sürüş kontrol modudur. Bu sistem, rejeneratif frenlemenin sürüş sırasında aktif bir biçimde kullanılması esasına dayanır. Sürücü gaz pedalına basarak aracı hızlandırırken, pedalın bırakılmasıyla birlikte elektrik motoru jeneratör moduna geçer ve oluşan ters tork sayesinde araç yavaşlatılırken aynı anda kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya aktarılır. Bu süreçte mekanik fren sistemi çoğunlukla devreye girmez; böylece hem enerji verimliliği artırılır hem de mekanik aksam üzerindeki yük azaltılır.

OPD sistemleri sürücüye fren pedalına başvurmaksızın araç hızını hassas biçimde

kontrol etme olanağı sunar. Ancak bu sistemin dinamik karakteristiği, üretici firmalara göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin bazı firmalar OPD sistemini, aracın tam durmasına olanak sağlayacak şekilde oldukça yüksek seviyede rejeneratif frenleme uygulayacak biçimde tasarlarken; bazı üreticiler ise geleneksel sürüş alışkanlıklarını korumak adına daha düşük frenleme etkisi oluşturan OPD profilleri sunmaktadır. Bu farklı yaklaşımlar, sürüş konforu, enerji yönetimi, batarya ısıl dengesi ve kullanıcı adaptasyonu gibi çok sayıda parametreyi gözeten mühendislik kararlarının sonucudur.

Teknik açıdan bakıldığında, OPD sistemlerinin performansı motor kontrol yazılımı, batarya yönetim sistemi (Battery Management System - BMS), inverter kontrol algoritmaları ve aracın genel sürüş dinamiği parametreleri ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle sistem, sadece pedal tepkisi değil aynı zamanda taşıtın hız, ivme, eğim ve yük durumu gibi değişkenlerine bağlı olarak anlık uyarlamalar yapabilen bir yapıda çalışır. Ayrıca bazı araç modellerinde sürücüye rejeneratif frenleme seviyesini manuel olarak ayarlayabilme imkânı tanıyan çok kademeli OPD uygulamaları da sunulmaktadır. Bu tür sistemler, sürücü tercihine ve kullanım koşullarına göre sistemin tepkilerini özelleştirmeye olanak tanımaktadır.



Şekil 2.2. Rejeneratif frenleme seviyesi ayar düğmesi (MG Motor India. (2021, 2 Eylül). *Taking a look at the three levels of regenerative braking in your ZS EV*. Erişim adresi: https://www.mgmotor.co.in/blogs/taking-a-look-at-the-three-levels-of-regenerative-braking-in-your-zs-ev)

Dolayısıyla OPD sistemleri, yalnızca bir sürüş kolaylığı sağlamaktan öte, enerji yönetimi, dinamik performans ve kullanıcı odaklı kontrol stratejileri bakımından elektrikli araç teknolojisinin bütünsel bir parçası hâline gelmiştir.

2.3. Taşıt Dinamiği ile İlgili Temel Kavramlar

Taşıt dinamiği, bir kara taşıtının hareketi sırasında maruz kaldığı kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin taşıt üzerindeki etkilerinin incelendiği mühendislik disiplinidir. Bu alan, özellikle sürüş güvenliği, yol tutuşu, frenleme kararlılığı ve sürüş konforunun değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Taşıt dinamiği, genel olarak boylamasına (longitudinal), yanal (lateral) ve düşey (vertical) eksenlerdeki hareket bileşenlerini kapsamaktadır. Bu çalışmanın odaklandığı One Pedal Driving sistemi bağlamında ise özellikle boylamasına dinamikler ön plana çıkmaktadır.

Boylamasına taşıt dinamiği, bir aracın ileri-geri yönlü hareketi esnasında oluşan kuvvetlerin ve momentlerin analizine dayanır. Bu kapsamda motor torku, frenleme kuvveti, aerodinamik sürükleme ve yuvarlanma direnci gibi parametreler taşıtın hızlanma ve yavaşlama davranışını doğrudan etkiler. OPD sisteminde, gaz pedalından ayağın çekilmesiyle birlikte rejeneratif frenleme kuvveti devreye girer; bu da taşıtın yavaşlama eğrisini geleneksel fren sistemlerinden farklı bir yapıya kavuşturur.

Bununla birlikte, taşıtın yavaşlama sürecinde ön ve arka akslar arasında yük transferi meydana gelir. Bu yük transferi, süspansiyon sisteminin geometrisine, ağırlık merkezinin yüksekliğine ve yavaşlama ivmesine bağlı olarak farklı oranlarda gerçekleşebilir. Ön aks üzerine binen yük artışı, frenleme esnasında yol tutuşun ön tekerlekler üzerinde yoğunlaşmasına neden olurken, arka aks üzerindeki yük azalması, taşıtın kararlılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, rejeneratif frenlemenin hangi aks üzerinde etkili olduğunun taşıtın denge ve kontrol performansı açısından belirleyici bir rol oynadığı söylenebilir.

Taşıt dinamiğinin bir diğer önemli bileşeni ise süspansiyon sistemidir. Süspansiyon, taşıtın yol ile temasını koruyarak yol düzensizliklerini sönümlemeyi ve lastik-yol temas kuvvetlerinin sürekliliğini sağlamayı amaçlar. OPD sistemleri, taşıt yavaşlama davranışını değiştirdiğinden dolayı süspansiyon sisteminin tepkisini de dolaylı olarak etkileyebilir. Özellikle yük transferlerinin ani ve dengesiz biçimde gerçekleştiği durumlarda süspansiyon bileşenlerinin sönümleme kapasitesi, taşıtın konfor ve kontrol

performansını belirleyen kritik bir faktör hâline gelir.

Son olarak, fren momentinin ön ve arka akslara nasıl dağıtıldığı da taşıt dinamiği açısından dikkatle analiz edilmesi gereken bir konudur. Geleneksel sistemlerde bu dağılım mekanik fren devreleriyle belirlenirken, OPD sistemlerinde elektrikli motorun konumu ve kontrol algoritması, frenleme kuvvetinin dağılımını doğrudan etkilemektedir. Bu durum, taşıtın dengesini ve yavaşlama sırasında oluşan sürüş hissiyatını yeniden tanımlamakta; dolayısıyla OPD sistemlerinin dinamik analizlerde ayrı bir mühendislik bakışıyla ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

2.4. Süspansiyon Sisteminin Temel Elemanları ve Parametreleri

Süspansiyon sistemi, bir kara taşıtının şasi ile tekerlekleri arasındaki fiziksel bağlantıyı sağlayan, aynı zamanda yol yüzeyinden kaynaklanan düzensizliklerin etkisini azaltarak sürüş konforunu ve taşıtın yol tutuşunu optimize eden mekanik bir sistemdir. Modern taşıtlarda süspansiyon sistemleri, konfor, güvenlik ve taşıt dinamiği açısından kritik öneme sahip olup; taşıtın hızlanma, yavaşlama ve viraj alma gibi manevralar sırasında lastik-yol temasının sürekliliğini sağlamakla yükümlüdür.



Şekil 2.3. Bağımsız ön süspansiyon sistemi örnek görseli (Kaynak: https://carmekan.com/blog/suspansiyon-nedir-cesitleri-nelerdir)

Süspansiyon sistemleri genel olarak üç ana fonksiyonu yerine getiren elemanlardan oluşur: taşıyıcı elemanlar, elastik (yaylayıcı) elemanlar ve sönümleyici (damper)

elemanlar. Bu elemanlara ek olarak, süspansiyon geometrisini belirleyen çeşitli bağlantılar, salıncaklar ve burçlar da sistemin performansını etkileyen önemli bileşenlerdir.

2.4.1. Yay Elemanları

Tez, Yaylar, süspansiyon sisteminin yol üzerinden gelen darbeleri emerek şasiye iletilen ivmeleri azaltan elastik bileşenleridir. Otomotiv uygulamalarında en yaygın kullanılan yay türleri helezon yaylardır. Ancak yaprak yay, torsiyon çubuğu ve hava yayları gibi alternatif çözümler de bulunmaktadır.

Yaylara ilişkin başlıca parametreler:

- Yay sabiti (spring rate, k): Birim deformasyon başına uygulanan kuvveti tanımlar (N/m). Bu parametre, taşıtın dikey rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini belirler.
- Süspansiyon çalışma mesafesi: Maksimum ve minimum strok uzunluğunu gösterir; yayların darbe anındaki deformasyon sınırlarını belirler.
- Doğrusal/Doğrusal olmayan karakteristik: Bazı sistemlerde yay kuvveti deformasyona doğrusal değil, değişken oranlı olacak şekilde tasarlanabilir.



Şekil 2.4. Helezon yay görseli (Kaynak: Sixt Türkiye. (t.y.). Helezon yay nedir, ne işe yarar? https://www.sixt.com.tr/blog/arac-bakimi-ve-ipuclari/helezon-yay-nedir-ne-ise-yarar)

2.4.2. Damper (Amortisör) Elemanları

Damperler, yay elemanları tarafından depolanan potansiyel enerjiyi sönümleyerek titreşimlerin sürekliliğini engeller ve sistemin hızlı stabilizasyonunu sağlar. Tipik

olarak viskoz sürtünme prensibine dayalı çalışan amortisörler, piston hareketiyle yağın geçişini kontrol ederek hareketi ısıya dönüştürür.

Damper sistemine ait temel parametreler:

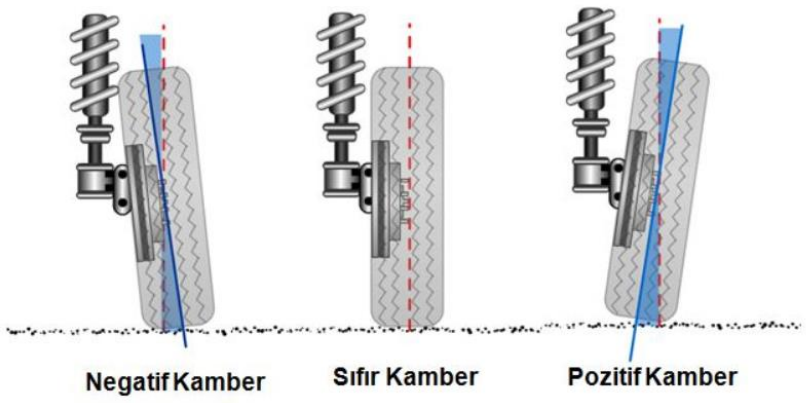
- Sönüm oranı (damping ratio, ζ): Kritik sönümlemeye oranla sistemin sönümleme miktarını ifade eder; taşıt konforu ve süspansiyon kontrolü açısından belirleyicidir.
- Darbe ve geri dönüş (bump/rebound) karakteristiği: Damperin sıkışma ve genleşme fazlarında gösterdiği direnç farklı olabilir.
- Hız bağımlı direnç: Modern amortisörler, piston hareket hızına bağlı olarak değişken sönümleme kuvveti üretir.

2.4.3. Geometrik Bağlantı Elemanları

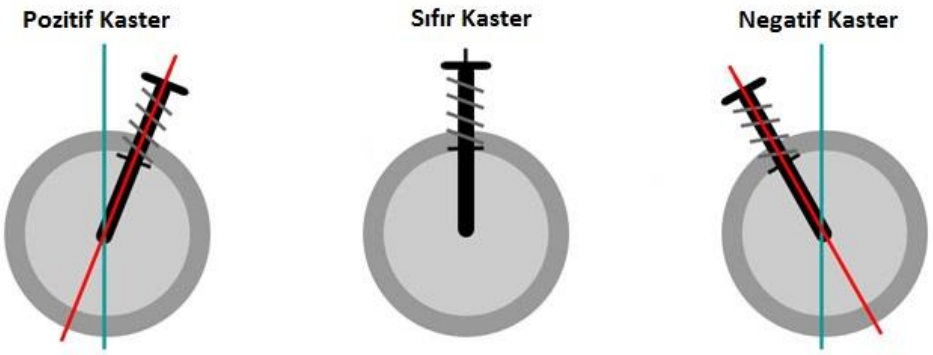
Süspansiyon geometrisini belirleyen salıncaklar, rotiller, bağlantı çubukları ve burçlar; tekerleklerin kamber, kaster ve toe açıları gibi parametreleri etkiler.

Geometriye ilişkin parametreler:

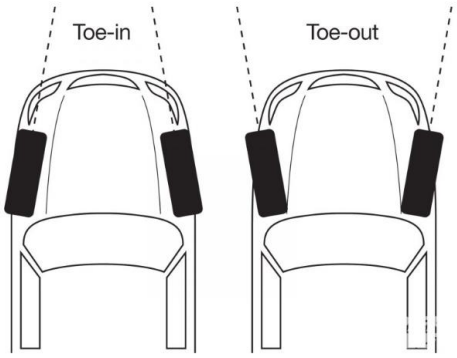
- Kamber açısı: Tekerleğin düşey eksene göre eğimini tanımlar; yol tutuşu ve lastik aşınması üzerinde doğrudan etkilidir.
- Kaster açısı: Direksiyon ekseni ile düşey eksen arasındaki açı; yönlendirme kararlılığı ile ilişkilidir.
- Toe açısı: Tekerleklerin ileriye dönük pozisyon farkıdır; düz gidiş ve dönüş stabilitesini etkiler.



Şekil 2.5. Kamber Açısının Türleri: Negatif, Sıfır ve Pozitif Kamber (Kaynak: Çeyrek Mühendis. (t.y.). Otomobillerin tekerlek açıları. https://ceyrekmuhendis.com/otomobillerin-tekerler-acilari/)



Şekil 2.6. Kaster Açısının Türleri: Pozitif, Sıfır ve Negatif Kaster (Kaynak: Çeyrek Mühendis. (t.y.). Otomobillerin tekerlek açıları. https://ceyrekmuhendis.com/otomobillerin-tekerler-acilari/)



Şekil 2.7. Toe-In ve Toe-Out Açılarının Şematik Gösterimi (Kaynak: Çeyrek Mühendis. (t.y.). Otomobillerin tekerlek açıları. https://ceyrekmuhendis.com/otomobillerin-tekerler-acilari/)

2.4.4. Süspansiyon Rijitliği ve Doğrusal Olmayan Tepkiler

Süspansiyon sisteminin toplam rijitliği, hem yay hem de geometrik düzenin etkisiyle belirlenir. Gerçek yol koşullarında doğrusal olmayan kuvvet-deformasyon eğrileri, titreşim ve salınım davranışlarını karmaşıklaştırır. Özellikle rejeneratif frenleme gibi ani moment değişimlerinin yaşandığı senaryolarda süspansiyonun sönümleme ve rijitlik karakteristikleri taşıtın kararlılığına doğrudan etki eder.

2.4.5. Understeer Karakteristiği

Understeering, yani önden savrulma eğilimi, taşıtın direksiyonla verilen dönme komutuna oranla daha geniş bir dönüş yarıçapı izlemesidir. Bu durum genellikle ön

lastiklerin yanal tutunma limitlerine erken ulaşmasıyla ortaya çıkar. Yüksek kütle, öne yakın ağırlık merkezi ve frenleme sırasında ön aksa ani yük transferi gibi koşullar, understeer eğilimini artıran başlıca faktörlerdir. OPD sisteminin frenleme fonksiyonu çoğunlukla ön aksta etkin olduğu durumlarda, rejeneratif frenlemenin yarattığı ek yavaşlatma kuvveti de ön lastiklere binen yükü artırarak bu karakteristiği güçlendirebilir. Bu durum özellikle viraj içi frenleme sırasında taşıtın yönelme dinamiğini olumsuz etkileyebilir. Sürüş güvenliği açısından, OPD sistemleri geliştirilirken bu tür olası dengesizliklerin göz önünde bulundurulması ve frenleme torkunun akslar arasında dengeli bir biçimde dağıtılması büyük önem taşımaktadır.

2.5. Araç Ağırlığı, Ağırlık Merkezi ve Dinamik Etkileri

Taşıt dinamiğini belirleyen temel unsurlardan biri, taşıtın kütlesel özellikleridir. Araç ağırlığı (kütle) ve bu ağırlığın taşıt üzerindeki dağılımı, taşıtın ivmelenme, frenleme, yön değiştirme ve denge davranışları üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu bağlamda taşıtın toplam kütlesi kadar, ağırlık merkezinin konumu da taşıtın dinamik performansı açısından kritik bir parametredir.

2.5.1. Ağırlık Merkezi (Center of Gravity - CoG)

Ağırlık merkezi, taşıtın kütlesinin dengelendiği varsayımsal noktadır ve taşıtın boyuna, enine ve düşey eksenler üzerindeki konumuyla tanımlanır. Özellikle ağırlık merkezinin yüksekliği (h), frenleme sırasında meydana gelen yük transferinin büyüklüğünü belirler. Yüksek CoG, ani yavaşlamalarda ön aksa daha fazla yük transferine neden olur, bu da süspansiyon sisteminde daha büyük sıkışma kuvvetleri ve daha ani eğilme momentleri ile sonuçlanır. Bu durum, taşıtın önden kayma (understeer) eğilimini artırabilir ve denge sınırlarını daraltabilir.

2.5.2. Kütle Dağılımı ve Dinamik Yük Transferi

Statik kütle dağılımı, taşıtın ön ve arka akslarına uygulanan yüklerin oranını ifade eder. Tipik bir binek araçta bu dağılım genellikle %60 ön – %40 arka civarındadır. Ancak frenleme sırasında taşıt dinamiği, bu yüklerin yeniden dağılımına neden olur. Bu olguya dinamik yük transferi adı verilir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\Delta F = \frac{m.a.h}{L}$$

Burada m taşıt kütlesi, a yavaşlama ivmesi, h ağırlık merkezinin yerden yüksekliği ve L dingil mesafesidir. Bu ilişkiye göre, yüksek kütleli araçlarda veya yüksek ağırlık merkezine sahip tasarımlarda frenleme sırasında ön aksa binen yük miktarı artar; bu da ön lastiklerin daha fazla yüklenmesine ve tutunma limitlerine daha hızlı ulaşmasına neden olur.

2.6. Literatürde OPD ve Taşıt Dinamiği Etkileşimi

One Pedal Driving (OPD) sistemlerinin enerjik avantajları üzerine yapılan akademik araştırmalar, özellikle Eindhoven Teknoloji Üniversitesi (TU/e) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı çalışmalarda öne çıkmaktadır. TU/e, 2015 yılında geliştirdiği Lupo EL aracında gerçekleştirilen simülasyon ve sürüş testleriyle OPD algoritmasının operasyonel haritasını MATLAB/Simulink ortamında analiz etmiş; sonuçlar, şehir içi kullanımda enerji tasarrufunu %22'ye, kırsalda %13'e çıkardığını göstermiştir. Ayrıca sistem polygonunun yalnızca enerji geri kazanımı değil, sürüş hissiyatı ve coasting (serbest yuvarlanma) karakteristiği üzerine de etkili olduğu belirtilmiştir.

Benzer şekilde Politecnico di Torino'da yürütülen bir yüksek lisans tezi, farklı OPD stratejilerinin tüketim ve konfor açısından karşılaştırmasını gerçekleştirerek klasik on/off rejeneratif yaklaşımı ile modüle edilebilir sistemleri simüle etmiş; sonuçlar, modüle edilebilir sistemlerin sürüş konforunu iyileştirerek daha stabil yavaşlamaya neden olduğunu göstermiştir

Bununla birlikte, üniversiteler tarafından gerçekleştirilen bu çalışmalar çoğunlukla enerji verimliliğine odaklanmış, taşıtın boylamasına hız profili, aks yük dağılımı, süspansiyon tepkisi ve ön/arka fren momenti paylaşımı gibi taşıt dinamiği açısından kritik parametreler üzerinde derinlemesine analiz yapılmamıştır. Mevcut çalışmaların çoğu, senaryo bazlı tüketim veya sürüş hissi ölçümleriyle sınırlı kalmış; buna karşın hem yol testleri, hem simülasyonlar yürüten Eindhoven gibi laboratuvar ölçeğindeki çalışmalar, sistemin dinamik performansını detaylandırmayı önceliklendirmemiştir .

Ayrıca, diğer üniversite çalışmaları - örneğin Süleyman Demirel Üniversitesi (Türkiye) gibi gelişmekte olan ülkelerdeki simülasyon temelli araştırmalarda - OPD sistemlerinin araç dinamiği üzerindeki etkisini ABS entegrasyonu ve sürüş güvenliği açısından modelleyen yaklaşımlar geliştirilmiş olsa da, bu çalışmaların çoğunluğu yanal ve düşey dinamiklerden ziyade anti-blokaj sistemine odaklanmış durumda .

Sonuç olarak, literatürde OPD sistemi bağlamında yapılan üniversite düzeyindeki çalışmalarda enerji verimliliği, sürüş hissi ve sürücü adaptasyonu gibi alanlarda zengin bilgi birikimi oluşmuş, ancak ikinci düzey taşıt dinamiği parametrelerinin sistematik analizi geçerli bir boşluk olarak kalmıştır. Bu bağlamda, mevcut akademik kaynaklar ışığında, OPD sistemlerinin aks yükleri, süspansiyon dinamikleri, fren momenti dağılımı, yavaşlama profilleri ve yol-tabanlı sürüş kontrolü üzerindeki etkilerinin sayısal ve deneysel analizlerle bütünsel biçimde ele alınması, literatüre somut bir katkı sağlayacağı açıktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, One Pedal Driving (OPD) sisteminin taşıt dinamiği üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik olarak kullanılan modelleme yaklaşımı, simülasyon ortamı ve analiz yöntemleri detaylı biçimde açıklanacaktır. Çalışma, sanal ortamda oluşturulan bir taşıt modeline uygulanacak farklı sürüş senaryoları üzerinden yürütülmüş olup, karşılaştırmalı bir yöntem izlenerek OPD sisteminin dinamik performansa etkisi değerlendirilmiştir. Özellikle süspansiyon tepkisi, aks yük dağılımı ve yavaşlama davranışı gibi parametreler odak noktası olarak belirlenmiştir.

3.1. Simülasyon Ortamı Tanıtımı

Bu çalışmada, taşıtın dinamik davranışlarını analiz etmek üzere MSC ADAMS/Car yazılımı kullanılmıştır. ADAMS/Car, çok gövdeli sistem dinamiği (multi-body dynamics) prensiplerine dayalı olarak çalışan ve özellikle taşıt sistemlerinin ayrıntılı simülasyonu için geliştirilmiş bir mühendislik platformudur. Bu yazılım, süspansiyon, direksiyon, lastik, şasi ve frenleme sistemleri gibi taşıt alt sistemlerinin parametrik olarak modellenmesine ve bu sistemlerin etkileşimli olarak analiz edilmesine olanak tanır.

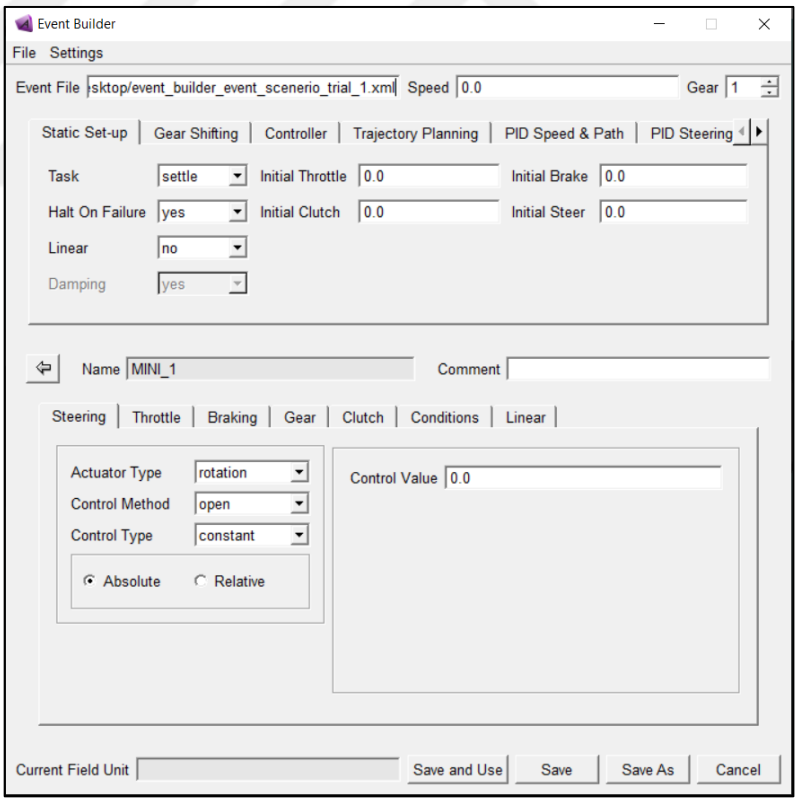
Simülasyon ortamında, önceden tanımlanmış şasi ve süspansiyon kütüphaneleri kullanılarak C-segmenti sınıfında temsil niteliği taşıyan bir binek otomobil modeli oluşturulmuştur. Taşıt modeli, dört tekerlekten bağımsız süspansiyona sahip olup; ön aks için MacPherson tipi, arka aks için ise çok kollu (multi-link) süspansiyon konfigürasyonu tercih edilmiştir. Lastik modeli olarak, ADAMS/Car içerisinde tanımlı olan parametrik Magic Formula (Pacejka) modeli esas alınmıştır. Bu sayede hem yanal hem boylamasına lastik kuvvetleri, hız ve yük koşullarına bağlı olarak değişken biçimde hesaplanabilmiştir.

Araç modeli üzerine yerleştirilen sanal sensörler yardımıyla taşıtın hız, ivme, aks yükleri, süspansiyon stroku ve frenleme momenti gibi dinamik parametrelerin zamanla değişimi izlenmiş; böylece OPD sisteminin taşıt üzerindeki etkileri çok boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Modelde kullanılan yapısal ve fiziksel parametreler, literatürdeki

referans araçlara ve üretici verilerine dayalı olarak belirlenmiş; simülasyon sonuçlarının gerçek sürüş koşullarına yakınsadığı doğrulanmıştır.

3.2. Event Builder Arayüzü Tanıtımı ve Yetkinlikleri

Çalışmada analiz edilen taşıt dinamiği senaryolarının tanımlanması ve uygulanması amacıyla MSC ADAMS/Car yazılımının Event Builder aracı kullanılmıştır. Event Builder, taşıt modeli üzerinde sürüş manevralarını zaman-mesafe-hız gibi kontrol değişkenlerine bağlı olarak senaryo tabanlı biçimde tanımlamaya olanak tanıyan bir yardımcı araçtır. Bu yapı sayesinde taşıtın belirli bir zaman dilimi boyunca uygulayacağı gaz, fren, direksiyon ve vites komutları parametrik olarak tanımlanabilmekte, böylece dinamik simülasyonlar esnasında sistematik karşılaştırmalar yapılabilmektedir.



Şekil 3.1. Event Builder Arayüzü ve Özellikleri

Event Builder, kullanıcıya hem zamana bağlı hem de olaya (event) bağlı senaryo üretme olanağı sunar. Bu yapı içerisinde Drive, Brake, Throttle, Steering gibi temel

kontrol girdileri; hız, konum, pedal pozisyonu gibi bağımlı değişkenlerle ilişkilendirilerek tanımlanır. Komutlar, kullanıcı tarafından yapılandırılmış zaman çizelgeleri (time tables) aracılığıyla sisteme girilir. Bu komut dizileri, ADAMS/Car simülasyonuna entegre edilir ve çözümleyiciye sürüş boyunca hangi eylemlerin hangi sırayla uygulanacağına dair doğrudan bilgi sağlar.

Bu çalışmada Event Builder arayüzü üzerinden özel olarak tanımlanmış senaryolar yardımıyla hem klasik frenleme hem de One Pedal Driving (OPD) ile rejeneratif frenlemeye dayalı yavaşlama manevraları modellenmiştir. Her bir senaryoda hız değişimi, pedal tepkisi ve frenleme momenti farklı biçimlerde yapılandırılarak taşıtın süspansiyon ve yük aktarım davranışları gözlemlenmiş; böylece OPD sisteminin taşıt dinamiği üzerindeki etkisi kontrollü koşullar altında analiz edilmiştir

3.3. Event Builder Arayüzü Parametreleri Tanıtımı

ADAMS/Car ortamında yer alan Event Builder aracı, taşıt üzerinde gerçekleştirilecek manevraların zamana bağlı olarak yapılandırılmasına imkân tanıyan senaryo tanımlama modülüdür. Bu arayüz sayesinde sürüşe dair çeşitli kontrol sinyalleri – örneğin direksiyon, gaz, fren, vites, debriyaj – belirli zaman adımlarında parametrik olarak programlanabilir. Görselde sunulan Event Builder arayüzü, temel kontrol sekmeleri ve başlangıç koşullarının tanımlandığı alanlar ile senaryo yapısının oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

a) Üst Panel: Genel Ayarlar
    - Event File: Simülasyonun dışa aktarıldığı .xml formatındaki olay dosyasının yolu.
    - Speed / Gear: Senaryo başlangıcında aracın hızı ve vitesi.

b) 2. Static Set-up Sekmesi: Başlangıç Durumları
    - Task: Taşıtın simülasyon başındaki denge durumu; genellikle "settle" (dengeyi bul) seçilir.
    - Halt on Failure: Simülasyon sırasında hata oluşursa çalışmayı durdurma seçeneği.

- Initial Throttle / Brake / Clutch / Steer: Başlangıç anındaki sürüş girdileri.
- Linear / Damping: Statik durumda lineerleşme ve sönümleme seçenekleri; sistemin ilk kararlılığı açısından önemlidir.

c) Alt Panel: Kontrol Sekmeleri (Tabs)

Bu sekmeler sayesinde farklı taşıt alt sistemlerine yönelik girişler yapılandırılır:

- Steering: Direksiyon komutu (dönme miktarı, yöntemi ve kontrol tipi)
- Throttle: Gaz pedalı kontrolü (%0–100 aralığında)
- Braking: Fren pedalı kontrolü (rejeneratif ve/veya mekanik fren oranı tanımlanabilir)
- Gear: Vites geçişleri
- Clutch: Debriyaj kontrol parametreleri
- Conditions: Koşullu komutlar (örneğin belli bir hızdan sonra frenleme başlat gibi)
- Linear: Lineer motor veya aktüatör tanımlamaları varsa burada yapılandırılır

d) Komut Ayar Alanı (Alt kutucuk)

- Her sekmede açılan bu kutucuk, seçili sistem bileşeni için girilen komutun detaylarını tanımlar:
- Actuator Type: Kontrol edilen aktüatör türü (örneğin rotation direksiyon için)
- Control Method: Açık (open) ya da kapalı (closed-loop) kontrol seçimi
- Control Type: Sabit (constant) ya da zamanla değişen (linear, spline) kontrol girişi
- Control Value: Uygulanacak girişin sayısal değeri (örneğin fren %50 → 0.5)

Bu parametreler sayesinde kullanıcı, her bileşen için hem başlangıç koşullarını hem de simülasyon süresince uygulanacak kontrol stratejisini hassas biçimde tanımlayabilir. OPD sistemini temsil edecek şekilde gaz pedalından çekilme ve frenleme davranışı; “Throttle” ve “Braking” sekmeleri üzerinden zaman çizelgeleriyle programlanabilir.

e) Senaryo Kaydetme ve Kullanma

Save / Save and Use: Tanımlanan senaryonun .evt dosyası olarak kaydedilmesi ve ADAMS/Car ortamında kullanılmak üzere aktive edilmesi işlemleri bu butonlar aracılığıyla gerçekleştirilir.

f) Kontrol Tipi

Kontrol tipi, sistem bileşenlerinin zaman içinde nasıl bir komut alacağını belirleyen yapıdır. Event Builder arayüzü, kullanıcıya farklı kontrol senaryoları geliştirme imkânı sunan çeşitli kontrol tipleri içermektedir. Bu çalışmada, OPD davranışını simülasyon ortamına gerçekçi biçimde aktarmak amacıyla data-driven kontrol tipi tercih edilmiştir.

Constant: Komut değeri simülasyon süresince sabit kalır. Temel analizler ve sistem tepki kıyaslamaları için kullanılır.

Function: Komut değeri belirli bir matematiksel ifadeye bağlı olarak zamanla değişir. Pedal tepkisinin sinüs veya doğrusal fonksiyonla modellenmesi gibi.

Data-map: İki veya daha fazla bağımsız değişkenin kombinasyonuna dayalı olarak sistemin kontrol girdisi belirlenir. Örneğin araç hızı ve eğime bağlı frenleme torku kontrolü.

Data-driven: Bu tez kapsamında kullanılan yöntemdir. Giriş sinyalleri, dış veri dosyalarından (örneğin .csv veya .txt) alınan zamana bağlı pedal pozisyonu, frenleme oranı veya hız verileri ile tanımlanır. Bu yapı, OPD sisteminin pedal tepkisinin zamana bağlı gerçekçi bir şekilde modellenmesini ve klasik frenleme ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmesini sağlar. Gerçek sürücü davranışlarının ya da varsayımsal OPD profillerinin doğrudan simülasyon ortamına entegre edilmesine olanak tanır. Böylece taşıt dinamiği üzerindeki etkiler zamansal çözünürlüğü yüksek, senaryo tabanlı olarak incelenebilir.

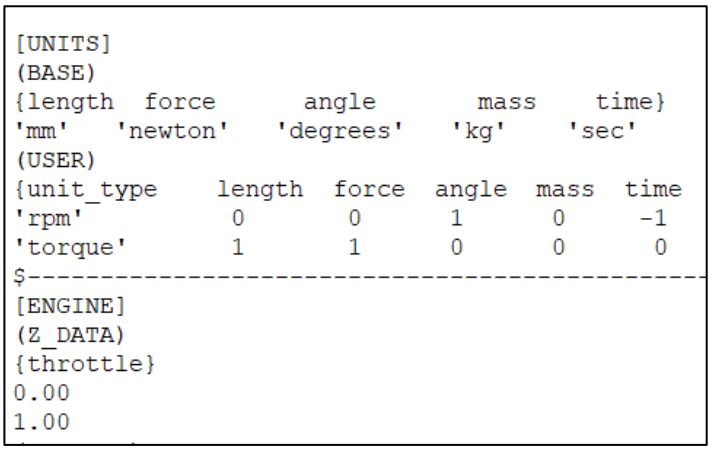
3.4. Rejeneratif Frenleme Davranışının Modellenmesi

Rejeneratif frenleme, taşıt kinetik enerjisinin mekanik fren sistemlerinde olduğu gibi tamamen ısıya dönüşmeden, elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya geri kazandırılmasını mümkün kılar. Bu enerji dönüşümü süreci, aynı zamanda taşıt dinamiği üzerinde önemli etkiler yaratır. Frenleme anında oluşan negatif tork, klasik

mekanik frenleme sistemlerinde olduğu gibi yalnızca sürtünme elemanları aracılığıyla değil, motor-jeneratör yapısı üzerinden elektromanyetik kuvvetlerle sağlanır. Bu durum, özellikle taşıtın boylamasına ivmelenme, yük transferi, aks yükleri ve tekerlek kayması gibi dinamik parametreleri doğrudan etkiler.

Bu bağlamda, gerçekleştirilen analiz çalışması iki temel senaryo üzerinden yürütülmüştür. İlk senaryoda rejeneratif frenleme tamamen devrede olup, araç frenleme sırasında kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek bataryasına geri kazandırmaktadır. İkinci senaryoda ise rejeneratif frenleme fonksiyonu devre dışı bırakılmış ve yalnızca geleneksel sürtünmeli frenleme mekanizması kullanılarak taşıtın yavaşlaması sağlanmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde, rejeneratif frenlemenin taşıt üzerindeki etkileri hem dinamik performans hem de enerji geri kazanımı açısından kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Analiz çıktıları aracılığıyla, rejeneratif frenlemenin etkin olduğu durumda enerji geri kazanım potansiyeli, frenleme esnasındaki aks yük değişimleri, boylamasına ivme profili ve tekerlek kayması gibi parametrelerde oluşan farklılıklar detaylı biçimde ortaya konacaktır. Bu bölümde sunulacak bulgular, elektrikli araçların tasarımında rejeneratif frenlemenin sadece enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda taşıt dinamiği, konfor ve güvenlik açısından da dikkate alınması gereken bir unsur olduğunu somut biçimde göstermeyi hedeflemektedir.



```
[UNITS]
(BASE)
{length  force      angle       mass    time}
'mm'   'newton'   'degrees'   'kg'    'sec'
(USER)
{unit_type    length  force  angle  mass  time
'rpm'          0       0      1      0     -1
'torque'       1       1      0      0      0
$-----------------------------------------------
[ENGINE]
(Z_DATA)
{throttle}
0.00
1.00
```

Şekil 3.2. Rejeneratif frenlemenin yönetimi

Bu çalışma kapsamında, rejeneratif frenleme fonksiyonunun etkin olduğu ve devre dışı bırakıldığı durumları tanımlamak amacıyla güç aktarma sistemi modelinde parametrik bir yapı oluşturulmuştur. Bu yapı, motor tork haritası üzerinden kontrol edilmektedir. Özellikle ADAMS/Car ortamında kullanılan güç aktarma sistemi veri dosyasına, rejeneratif frenleme davranışını kontrol etmeye olanak sağlayan ek bir kontrol ekseni dahil edilmiştir.

Standart tork haritalarında tipik olarak “throttle” (gaz pedalı) değişkenine bağlı tek bir tork eğrisi bulunurken, bu çalışmada "engine_speed - throttle - regen_status" şeklinde üç boyutlu bir tork haritası kurgulanmıştır. Burada regen_status parametresi, rejeneratif frenlemenin aktif veya pasif durumunu ifade eden bir kontrol değişkenidir. Bu parametreye atanan değerler, “0.00” rejeneratif frenlemenin devre dışı (pasif) ve “1.00” rejeneratif frenlemenin aktif olduğu durumları temsil etmektedir. Bu yapının temel amacı, simülasyon koşulları sabitken yalnızca rejeneratif frenleme sisteminin etkisini izole bir şekilde analiz edebilmektir.

Bu kontrol mantığı, veri dosyasında (ENGINE bölümünde) XY_DATA satırlarına üçüncü bir eksenin (Z_DATA) ilavesiyle teknik olarak uygulanmıştır. Böylelikle motor, sürüş sırasında rejeneratif frenleme fonksiyonunun açık ya da kapalı olmasına göre farklı tork davranışı sergilemektedir. Rejeneratif frenleme devrede olduğunda, negatif tork değerleri aracın kinetik enerjisinden elektrik enerjisi üretmek üzere motor-jeneratör sistemine uygulanmakta ve bu negatif tork, aracın yavaşlamasına katkı sağlamaktadır. Diğer durumda ise, motor jeneratör fonksiyonunu gerçekleştirmemekte ve frenleme sırasında yalnızca mekanik fren sistemi devrede kalmaktadır.

Bu yöntem, çalışmanın bilimsel güvenilirliğini artırmakta ve rejeneratif frenleme sisteminin enerji yönetimi ve taşıt dinamiği üzerindeki etkilerini doğrudan gözlemleme olanağı sağlamaktadır. Özellikle enerji geri kazanım miktarı, aks yük dağılımı ve boylamasına ivmelenme gibi parametrelerin rejeneratif frenleme fonksiyonundan nasıl etkilendiği, bu parametrik yapı sayesinde detaylı olarak analiz edilmiştir.

3.5. Simülasyon Senaryolarının Tanımlanması

Bu çalışmada, One Pedal Driving (OPD) sisteminin taşıt dinamiği üzerindeki etkilerini analiz edebilmek amacıyla iki ana sürüş senaryosu yapılandırılmıştır: biri geleneksel frenleme davranışını temsil eden, diğeri ise OPD tabanlı rejeneratif frenleme karakteristiğine sahip bir sürüş profili. Her iki senaryo, ADAMS/Car ortamında Event Builder aracı kullanılarak oluşturulmuş ve giriş değerleri data-driven yöntemle tanımlanmıştır. Bu yapı sayesinde farklı frenleme karakteristikleri altında taşıtın hız, aks yükü, süspansiyon hareketi ve yavaşlama eğrisi gibi parametrelerinin karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Senaryo 1: Klasik Frenleme ile Yavaşlama (Referans Senaryo)

Bu senaryoda, sürücünün gaz pedalından ayağını çektiği anda taşıt coasting (serbest yuvarlanma) moduna geçmekte ve kısa bir süre sonra fren pedalına basılarak yavaşlama sağlanmaktadır. Frenleme, mekanik fren sistemi tarafından üretilmekte olup rejeneratif etki bulunmamaktadır.

- Başlangıç hızı: 60 km/h
- Frenleme başlangıç zamanı: 2.0 s
- Frenleme süresi: 5.0 s
- Frenleme profili: Sabit pedal komutu (%60)
- Kontrol yöntemi: open
- Kontrol tipi: data-driven (zaman–fren komutu ilişkisi)
- Senaryo amacı: Kinetik enerjinin yalnızca mekanik fren ile sönümlendiği klasik yavaşlama davranışını referans olarak değerlendirmek.

3.5.2. Senaryo 2: OPD Tabanlı Rejeneratif Frenleme ile Yavaşlama

Bu senaryoda, sürücünün gaz pedalından ayağını çekmesiyle birlikte araç yavaşlamaya başlamakta; mekanik frene dokunmadan yalnızca motorun rejeneratif tork üretimi ile hız düşüşü sağlanmaktadır. Bu yapı, tipik bir OPD sürüş modunu temsil etmektedir.

- Başlangıç hızı: 60 km/h
- Throttle pozisyonu: %50 → %0 geçişi (0.5 s sürede)

- Yavaşlama profili: Tamamen rejeneratif tork ile
- Rejeneratif frenleme eğrisi: Gerçek OPD sistemlerinden türetilmiş zamana bağlı frenleme momenti
- Kontrol yöntemi: machine (motor tarafından kontrol edilen frenleme)
- Kontrol tipi: data-driven (pedal–zaman verisi üzerinden)
- Senaryo amacı: OPD sisteminin karakteristik frenleme davranışının taşıt üzerindeki dinamik etkilerini gözlemlemek.

3.5.3. Kademeli OPD Profili

Çalışmanın detaylandırılması amacıyla, farklı agresiflik seviyelerinde OPD rejimleri de tanımlanabilir:

- OPD – Hafif: %10–%40 oranında rejeneratif fren
- OPD – Orta: %40–%70
- OPD – Agresif: %70–%100, tam durma sağlayan profil

Bu varyasyonlar, kullanıcı tercihine göre OPD sisteminin nasıl özelleştirilebileceğini göstermesi bakımından faydalı olabilir.

Her senaryoda taşıtın:

- Boyuna hız eğrisi
- Aks yük değişimi
- Süspansiyon sıkışma-genleşme miktarı
- Yavaşlama ivmesi
- Frenleme moment dağılımı

gibi parametreleri zaman serisi olarak karşılaştırılacak ve dinamik etkiler niteliksel ve niceliksel olarak analiz edilecektir.

Bu çalışmada kullanılan hafif, orta ve agresif rejeneratif frenleme profilleri, farklı OPD karakteristiklerinin taşıt dinamiği üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanıyacak şekilde oluşturulmuştur. Her bir profil, sürüş hissiyatı ile enerji geri kazanımı arasında farklı önceliklere sahip mühendislik

stratejilerini temsil etmektedir.

Hafif rejeneratif frenleme, özellikle içten yanmalı araçlara aşina kullanıcılar için sürüş hissiyatını korumayı amaçlayan bir karakteristiktir. Bu modda, gaz pedalından ayak çekildiğinde taşıt, klasik serbest yuvarlanma (coasting) davranışına yakın bir şekilde yavaşlar; bu sayede sürücü, ani frenleme hissi yaşamadan kontrollü bir hız kaybı elde eder. Ancak bu yaklaşımda rejeneratif tork seviyeleri düşüktür ve bataryaya aktarılan enerji miktarı sınırlıdır. Bu profil, OPD sistemlerinin sürüş konforunu bozmayacak biçimde entegre edilmesini hedeflerken, enerji geri kazanımı açısından sınırlı katkı sağlar.

Agresif rejeneratif frenleme ise OPD sistemlerinin sunduğu maksimum enerji verimliliğini hedefleyen karakteristiği temsil eder. Gaz pedalından çekilmesiyle birlikte taşıt hızlı biçimde yavaşlar ve frenleme büyük oranda rejeneratif tork ile gerçekleştirilir. Bu profil, mekanik fren kullanımını minimuma indirerek hem enerji geri kazanımını maksimize eder hem de fren sistemindeki termal ve mekanik yükleri azaltır. Bununla birlikte, sürüş hissi geleneksel araçlardan oldukça farklıdır; bu da sürücü alışkanlıkları açısından uyum süreci gerektirebilir.

Orta seviye rejeneratif frenleme ise hafif ve agresif rejimlerin arasında bir denge noktası oluşturur. Bu profil, hem kabul edilebilir düzeyde enerji geri kazanımı hem de geleneksel sürüş hissiyatından çok uzaklaşmayan bir yavaşlama karakteristiği sunmayı hedefler. Özellikle sürücüye modlar arası geçiş sunan sistemlerde varsayılan ayar olarak tercih edilebilecek bir denge çözümüdür. Bu seviye, dinamik performans ile enerji verimliliği arasında optimum noktayı temsil eder.

Bu üç rejeneratif profilin ayrı ayrı modellenmesi, OPD sisteminin taşıt üzerindeki etkilerinin yalnızca bir senaryo ile sınırlı kalmaksızın çok boyutlu olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece hem mühendislik optimizasyonuna hem de kullanıcı odaklı sistem tasarımına yönelik daha kapsamlı çıkarımlar yapılması hedeflenmiştir.

```
$-------------------------------------------------------------------------UNITS
[UNITS]
(BASE)
{length  force      angle       mass    time}
'mm'   'newton'   'degrees'   'kg'    'sec'
(USER)
{unit_type    length  force  angle  mass  time  conversion}
'rpm'          0       0      1      0     -1     6.0
'torque'       1       1      0      0      0     1.0
$-------------------------------------------------------------------------ENGINE
[ENGINE]
(Z_DATA)
{throttle}
0.0
1.00
(XY_DATA)
{engine_speed <rpm>  torque@throttle <torque>}
0   0      0
500    -15000.0   150000
2000   -15000.0   150000
4000   -15000.0   150000
4200   -15000.0   150000
4500   -13000.0   130000
5000   -12000.0   120000
6000   -10000.0   100000
8000    -9000.0    90000
10000   -6000.0    60000
12000   -4000.0    40000
14000   -2000.0    20000
```

Şekil 3.4. OPD – Hafif Rejeneratif Frenleme Profili

```
$-------------------------------------------------------------------------UNITS
[UNITS]
(BASE)
{length  force      angle       mass    time}
'mm'   'newton'   'degrees'   'kg'    'sec'
(USER)
{unit_type    length  force  angle  mass  time  conversion}
'rpm'          0       0      1      0     -1     6.0
'torque'       1       1      0      0      0     1.0
$-------------------------------------------------------------------------ENGINE
[ENGINE]
(Z_DATA)
{throttle}
0.0
1.00
(XY_DATA)
{engine_speed <rpm>  torque@throttle <torque>}
0   0      0
500    -21000.0   210000
2000   -21000.0   210000
4000   -21000.0   210000
4200   -21000.0   210000
4500   -19000.0   190000
5000   -15000.0   150000
6000   -13000.0   130000
8000   -10000.0   100000
10000   -8000.0    80000
12000   -6000.0    60000
14000   -4000.0    40000
```

Şekil 3.5. OPD – Orta Seviye Rejeneratif Frenleme Profili

```
$------------------------------------------------------------------------UNITS
[UNITS]
(BASE)
{length  force      angle       mass    time}
'mm'   'newton'   'degrees'   'kg'    'sec'
(USER)
{unit_type    length  force  angle  mass  time  conversion}
'rpm'          0       0      1      0     -1     6.0
'torque'       1       1      0      0      0     1.0
$------------------------------------------------------------------------ENGINE
[ENGINE]
(Z_DATA)
{throttle}
0.0
1.00
(XY_DATA)
{engine_speed <rpm>  torque@throttle <torque>}
0   0      0
500    -25000.0   250000
2000   -25000.0   250000
4000   -25000.0   250000
4200   -25000.0   250000
4500   -22000.0   220000
5000   -18000.0   180000
6000   -15000.0   150000
8000   -12000.0   120000
10000  -11000.0   110000
12000   -9000.0    90000
14000   -5000.0    50000
```

Şekil 3.6. OPD – Agresif Rejeneratif Frenleme Profili

Torque değerleri (negatif): Rejeneratif frenleme momentidir.
Daha negatif değer = daha güçlü frenleme.
engine_speed (rpm): Motorun o anki dönüş hızı.

Bu çalışmada kullanılan hafif, orta ve agresif rejeneratif frenleme profilleri, farklı OPD karakteristiklerinin taşıt dinamiği üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanıyacak şekilde oluşturulmuştur. Her bir profil, sürüş hissiyatı ile enerji geri kazanımı arasında farklı önceliklere sahip mühendislik stratejilerini temsil etmektedir.

Hafif rejeneratif frenleme, özellikle içten yanmalı araçlara aşina kullanıcılar için sürüş hissiyatını korumayı amaçlayan bir karakteristiktir. Bu modda, gaz pedalından ayak çekildiğinde taşıt, klasik coasting (serbest yuvarlanma) davranışına yakın bir şekilde yavaşlar; bu sayede sürücü, ani frenleme hissi yaşamadan kontrollü bir hız kaybı elde eder. Ancak bu yaklaşımda rejeneratif tork seviyeleri düşüktür ve bataryaya aktarılan enerji miktarı sınırlıdır. Bu profil, OPD sistemlerinin sürüş konforunu bozmayacak biçimde entegre edilmesini hedeflerken, enerji geri kazanımı açısından sınırlı katkı sağlar.

Agresif rejeneratif frenleme ise OPD sistemlerinin sunduğu maksimum enerji verimliliğini hedefleyen karakteristiği temsil eder. Gaz pedalından çekilmesiyle birlikte taşıt hızlı biçimde yavaşlar ve frenleme büyük oranda rejeneratif tork ile gerçekleştirilir. Bu profil, mekanik fren kullanımını minimuma indirerek hem enerji geri kazanımını maksimize eder hem de fren sistemindeki termal ve mekanik yükleri azaltır. Bununla birlikte, sürüş hissi geleneksel araçlardan oldukça farklıdır; bu da sürücü alışkanlıkları açısından uyum süreci gerektirebilir.

Orta seviye rejeneratif frenleme ise hafif ve agresif rejimlerin arasında bir denge noktası oluşturur. Bu profil, hem kabul edilebilir düzeyde enerji geri kazanımı hem de geleneksel sürüş hissiyatından çok uzaklaşmayan bir yavaşlama karakteristiği sunmayı hedefler. Özellikle sürücüye modlar arası geçiş sunan sistemlerde varsayılan ayar olarak tercih edilebilecek bir denge çözümüdür. Bu seviye, dinamik performans ile enerji verimliliği arasında optimum noktayı temsil eder.

Bu üç rejeneratif profilin ayrı ayrı modellenmesi, OPD sisteminin taşıt üzerindeki etkilerinin yalnızca bir senaryo ile sınırlı kalmaksızın çok boyutlu olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece hem mühendislik optimizasyonuna hem de kullanıcı odaklı sistem tasarımına yönelik daha kapsamlı çıkarımlar yapılması hedeflenmiştir.

4. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında, elektrikli araçlarda kullanılan rejeneratif frenleme stratejilerinin taşıt dinamiği, enerji geri kazanımı ve sürüş konforu üzerindeki etkileri, ADAMS/Car simülasyon ortamında oluşturulan bu yeni sürüş haritası üzerinden incelenmiştir. Bu harita, mevcut kentsel sürüş senaryolarının analiz edilmesiyle elde edilen veriler doğrultusunda tasarlanmış olup, farklı rejeneratif frenleme seviyelerinin (agresif ve orta seviye) taşıt performansına olan etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak sağlamıştır.

Uygulama bölümünde gerçekleştirilen analizler sayesinde, rejeneratif frenleme stratejilerinin taşıtın hız profili, boylamasına ivmelenme, tekerlek kayması ve motor momenti gibi dinamik parametreler üzerindeki etkileri sayısal ve görsel olarak ortaya konmuştur. Bu analizler, farklı frenleme stratejilerinin enerji geri kazanımı potansiyelini ve sürüş konforunu nasıl etkilediğini anlamak açısından önemli veriler sunmaktadır. Özellikle agresif rejeneratif frenleme stratejisinin daha yüksek enerji geri kazanımı sağladığı, ancak bu durumun sürüş konforu üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği gözlemlenmiştir. Bu tür bulgular, elektrikli araçların enerji verimliliği ve kullanıcı deneyimi açısından optimize edilmesi gereken alanları belirlemek için kritik öneme sahiptir.

Bu uygulama çalışması, elektrikli araç teknolojilerinin geliştirilmesinde kullanılabilecek simülasyon tabanlı bir analiz yöntemi sunmaktadır. Geliştirilen yöntem, farklı rejeneratif frenleme stratejilerinin taşıt performansı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu sayede, hem akademik araştırmalarda hem de otomotiv endüstrisinde, enerji verimliliği ve sürüş konforu arasında optimal bir denge sağlamak amacıyla kullanılabilecek değerli bir araç sunulmuş olmaktadır.

4.1. Farklı Hızlarda OPD Davranışının Analizi için Senaryo Kurgusu

One Pedal Driving (OPD) sisteminin taşıt dinamiği üzerindeki etkileri, yalnızca pedal konumuna bağlı olarak değil, aynı zamanda taşıtın başlangıç hızına göre de farklılık

gösterebilmektedir. Rejeneratif frenleme sırasında elektrik motorunun üretebildiği ters tork miktarı, motor devrine, taşıtın kinetik enerjisine ve sistem sınırlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, OPD karakteristiklerinin farklı hız koşulları altında nasıl çalıştığını değerlendirebilmek için çok seviyeli bir senaryo kurgusu oluşturulmuştur.

Bu amaçla, analizler sabit hızlarda başlatılacak şekilde yapılandırılmış üç ayrı sürüş senaryosu tasarlanmıştır. Her bir senaryoda taşıtın başlangıç hızı farklı olacak şekilde belirlenmiş; düşük (30 km/h), orta (60 km/h) ve yüksek (90 km/h) hız düzeylerinde OPD sisteminin yavaşlama profili ve taşıt üzerindeki dinamik etkileri incelenmiştir. Sürücü pedal pozisyonunu hızlı biçimde sıfırladığında (örneğin %50'den %0'a) taşıt yalnızca rejeneratif tork ile yavaşlamakta, mekanik fren sistemi devre dışı bırakılarak analizde yalnızca OPD etkisinin izole biçimde değerlendirilmesi sağlanmaktadır.

Simülasyon ortamı olarak eğimsiz, rijit ve pürüzsüz bir yol tipi tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, ADAMS/Car kütüphanesinde yer alan 2d_flat.rdf tanımlı yol dosyası kullanılmıştır. Bu seçim, süspansiyon sistemine düşey yönden gelen yol girdilerini ve yol eğimi kaynaklı potansiyel enerji değişimlerini dışlayarak yalnızca hızın bir değişken olarak etkisini ön plana çıkarmayı hedeflemektedir. Yol üzerindeki tüm dış etkiler minimize edildiğinden, elde edilen dinamik sonuçlar yalnızca OPD sisteminin taşıt üzerindeki etkilerini yansıtacak şekilde değerlendirilmiştir.

Senaryolar, ADAMS/Car yazılımının Event Builder aracı yardımıyla oluşturulmuş ve kontrol girdileri data-driven yöntemle tanımlanmıştır. Pedal komutları ve rejeneratif tork değerleri, daha önce oluşturulan üç farklı OPD profiline (hafif, orta, agresif) karşılık gelen veri setleri ile ilişkilendirilmiştir. Her bir hız seviyesinde bu üç farklı rejeneratif karakteristik uygulanarak toplam dokuz ayrı senaryo çalıştırılmıştır. Böylece hız seviyesi ile OPD rejiminin taşıt üzerindeki etkileri arasındaki karşılıklı ilişki sistematik biçimde analiz edilmiştir.

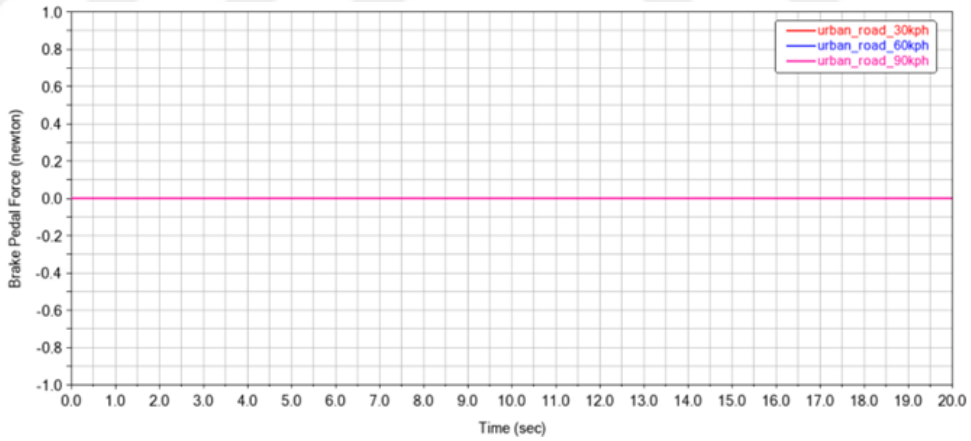
Analizlerde öncelikli olarak longitudinal hız değişimi, yavaşlama ivmesi, aks yük transferi, süspansiyon hareketi ve rejeneratif tork dağılımı gibi dinamik parametreler izlenmiştir. Bu yapı sayesinde, OPD sisteminin farklı sürüş koşullarında ne ölçüde

etkili olduğu ve hangi karakteristiklerin dinamik performans açısından daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir.

4.1.1. Değerlendirme ve Bulgular

Simülasyon ortamında gerçekleştirilen OPD analizlerinde, taşıt dinamiği üzerindeki etkilerin izole biçimde incelenebilmesi için sürücü girişleri kontrollü olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sırasıyla fren pedalı kuvveti ve gaz pedalı (throttle) konumu zaman ekseninde gösterilmektedir.

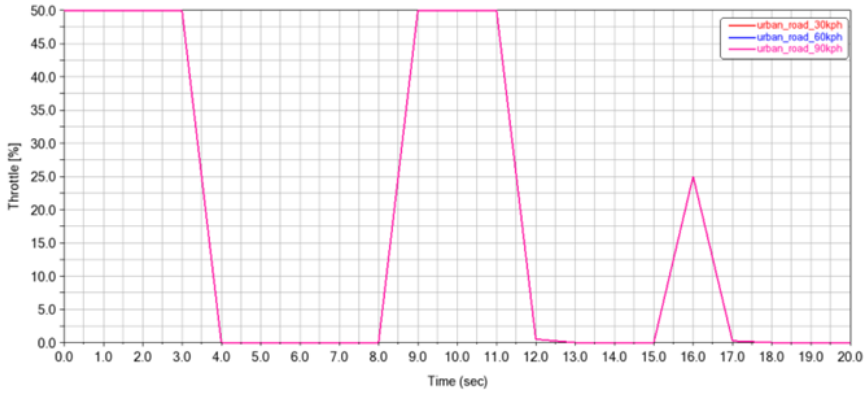
Tüm hız seviyelerinde (30, 60 ve 90 km/h) uygulanan bu gaz kesme senaryoları, taşıtın yalnızca motor kaynaklı yavaşlama etkisi altındaki davranışını değerlendirmek açısından uygun bir kontrol ortamı oluşturmuştur. Özellikle throttle verisinin data-driven yapıda olması, pedal konumlarının gerçek kullanıcı profillerinden veya hedef OPD karakteristiklerinden elde edildiğini göstermekte ve senaryo gerçekçiliğini artırmaktadır.



Şekil 4.1. Simülasyon fren pedalı girdisi grafiği

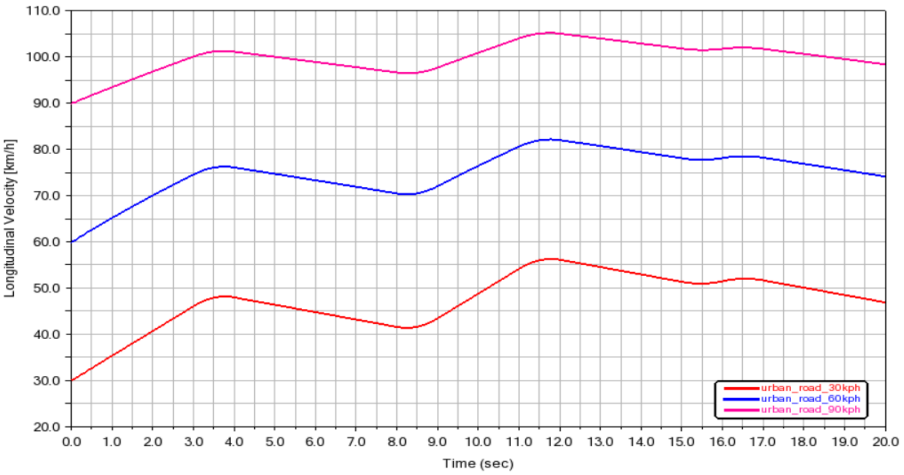
Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, tüm senaryolar boyunca fren pedalı kuvveti sıfır olarak kalmıştır. Bu durum, analizlerin yalnızca rejeneratif frenleme etkisini gözlemlemeye yönelik olarak yapılandırıldığını ve klasik mekanik frenleme sisteminin devre dışı bırakıldığını göstermektedir. Böylelikle elde edilen yavaşlama karakteristikleri, yalnızca elektrik motoru tarafından üretilen ters torktan kaynaklanan rejeneratif

frenleme davranışını temsil etmektedir.



Şekil 4.2. Simülasyon Gaz Pedalı Girdi Haritası

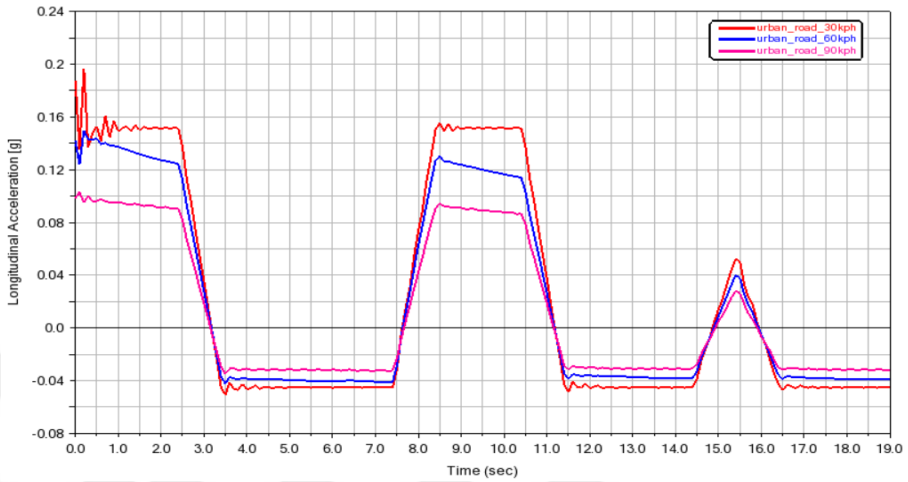
Şekil 4.2'de gaz pedalı (throttle) komutu zamana bağlı olarak sunulmuştur. Senaryonun başlangıcında gaz pedalının yaklaşık %50 seviyesinde olduğu ve farklı zaman aralıklarında bu değerin kademeli olarak sıfıra düştüğü görülmektedir. Bu geçişler, One Pedal Driving (OPD) sistemine özgü tipik bir frenleme tetikleyicisi olarak yorumlanabilir. Sürücü gaz pedalından ayağını çektiğinde, pedal konumunun sıfıra doğru eğilimi, rejeneratif frenlemenin aktif hâle geldiği bölgeyi işaret etmektedir.



Şekil 4.3. Longitudinal Velocity (Boylamasına Hız Değişimi)

Şekil 4.3'te gösterildiği üzere, taşıtın hız eğrileri başlangıçtaki sürücü girdisine paralel olarak artmakta, ardından gaz pedalının bırakılmasıyla birlikte yavaşlama eğilimine girmektedir. Her üç hız senaryosunda da (30, 60 ve 90 km/h), rejeneratif frenleme

etkisiyle birlikte hızın belirgin şekilde azaldığı gözlenmektedir. Bu hız düşüşü, doğrudan fren pedalı kullanılmaksızın yalnızca OPD sisteminin aktif olduğu periyotlara karşılık gelmektedir.



Şekil 4.4. Boylamasına İvme Profili

Şekil 4.4'te sunulan ivme eğrileri, frenleme evresinde meydana gelen negatif ivmeyi (deceleration) ortaya koymaktadır. Pedal bırakma anında (yaklaşık 3. saniye civarı), ivme değerlerinde ani bir düşüş gerçekleştiği, ardından bu değerin -0.04 g seviyelerinde sabitlenerek taşıtın rejeneratif frenleme etkisi altında yavaşlamaya başladığı görülmektedir.

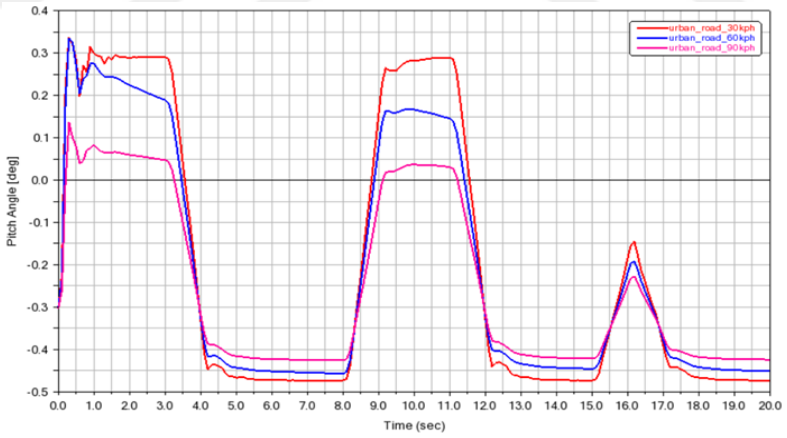
Tüm hız seviyelerinde rejeneratif frenleme kaynaklı yavaşlama ivmesinin benzer düzeylerde olduğu, ancak ivme tepkisinin düşük hızda daha keskin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum, düşük hızda taşıt kinetik enerjisinin daha az olması nedeniyle rejeneratif frenleme torkunun daha etkili bir ivme değişimine yol açtığını göstermektedir. Buna karşılık, yüksek hızda oluşan yavaşlama profili daha yumuşak ve süreklilik arz eden bir yapıya sahiptir.

Rejeneratif frenleme sırasında motor jeneratör modunda çalışarak kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüşüm süreci, motor devrine, batarya kabul kapasitesine ve tork sınırlarına bağlıdır. Simülasyon sonuçlarında gözlemlendiği üzere, düşük hız senaryosunda frenleme anında boylamasına ivmede daha keskin bir düşüş

gerçekleşirken, yüksek hız senaryosunda bu geçiş daha yumuşak ve zamana yayılan bir karakteristik göstermektedir.

Bu durumun temel nedeni, rejeneratif frenleme sisteminin düşük hızlarda anlık olarak daha yüksek ters tork üretebilme kapasitesine sahip olmasıdır. Özellikle taşıt hızı düşükken motor devri nispeten daha düşük olmakla birlikte, motor tork haritalarında bu hız aralığı genellikle maksimum geri kazanım torku aralığı olarak tanımlanır. Bu nedenle, sistemin rejeneratif tepki süresi kısa olmakta ve taşıt ivmesinde daha ani bir negatif değişim (keskin yavaşlama) meydana gelmektedir.

Buna karşın yüksek hız senaryolarında taşıtın kinetik enerjisi daha fazla olduğundan, rejeneratif sistemin tork üretimi bu enerjiyi karşılamaya oranla sınırlı kalmakta, bu da daha uzun süreli ve düşük gradyanlı bir frenleme eğrisine neden olmaktadır. Ayrıca, elektrik motorlarının yüksek devirlerde rejeneratif tork üretme yetisi termal ve elektriksel sınırlar nedeniyle düşebilmektedir. Bu sınırlar, sistemin maksimum ters torkunu sınırlandırarak frenleme ivmesini sınırlı kılmaktadır.



4.5. Taşıt Gövdesinin Eğilme Açısı

Şekil 4.5'te yer alan pitch angle grafiği, taşıtın öne eğilme (nosing down) veya geriye yatma (squat) eğilimini yansıtmaktadır. Gaz pedalına basıldığı dönemde taşıt arka aksa doğru yatmakta (pozitif pitch), rejeneratif frenleme sırasında ise öne doğru eğilmektedir (negatif pitch).

Pitch açısı, taşıtın boylamasına düzlemde (longitudinal eksende) eğilmesini ifade eder ve genellikle taşıtın hızlanma veya yavaşlama sırasında gövdesinin öne ya da arkaya doğru eğilmesiyle ortaya çıkar. Bu parametre, özellikle yük transferi, süspansiyon strok karakteristiği ve sürücü algısı açısından taşıt dinamiği üzerinde doğrudan etkilidir.

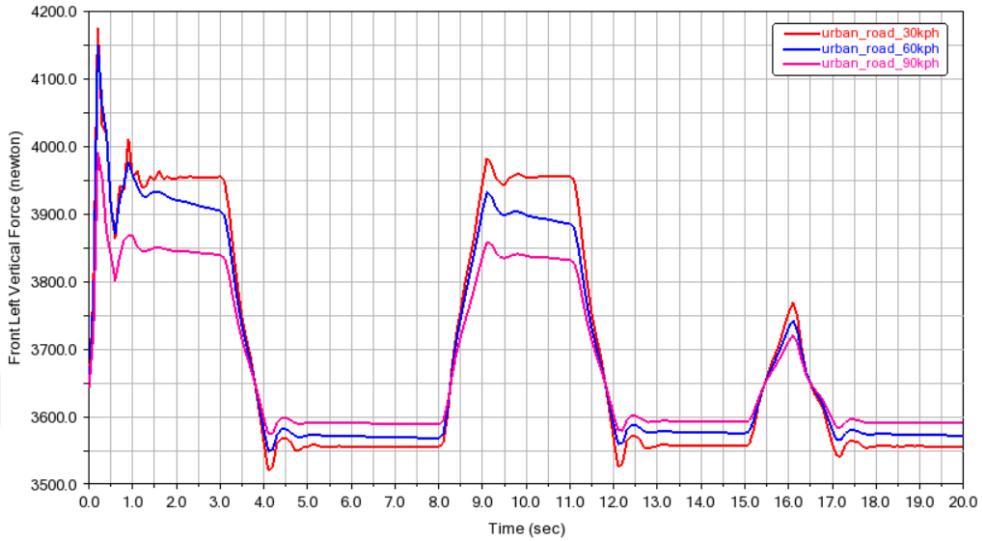
Simülasyon sonuçlarına göre, gaz pedalının aktif olduğu dönemde taşıtın arka aksa doğru (pozitif pitch) eğildiği, rejeneratif frenleme sırasında ise ön aksa doğru (negatif pitch) bir eğim sergilediği gözlemlenmiştir. Bu davranış, taşıtın kütlesel ataleti ile frenleme/ivmelenme kuvvetleri arasındaki etkileşimin bir sonucudur. Pedalın aniden bırakıldığı frenleme fazında taşıt kütlesi öne doğru transfer olmakta; bu da süspansiyon sisteminde ön yayların sıkışmasına, arka yayların ise gevşemesine neden olarak gövdenin öne doğru eğilmesine yol açmaktadır.

Grafiklerde görüldüğü üzere, düşük hız senaryosunda pitch açısı yaklaşık –0.45° seviyelerine kadar ulaşırken, yüksek hız senaryosunda bu değer –0.35° civarında kalmaktadır. Bu fark, düşük hızdaki ani frenleme torkunun daha büyük bir yük transferine neden olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek hızda ise rejeneratif frenleme daha yumuşak gerçekleştiği için yük transferi de daha dengeli ve gövde eğimi daha sınırlı kalmaktadır.

Pitch açısındaki bu değişimlerin sürücü üzerindeki algısal etkisi özellikle önemlidir. Taşıtın öne eğilme hareketi, sürücü tarafından "sert frenleme" hissi olarak algılanır. OPD sisteminde bu tür eğilme hareketlerinin şiddeti, sürüş konforunu etkileyebilir. Düşük hızda gerçekleşen ani pitch değişimleri sürücünün beklenmedik bir öne savrulma hissi yaşamasına neden olabilir. Bu durum, konfor algısının bozulması ve kabin içi dengesiz yük hissi gibi olumsuzluklar yaratabilir. Bunun aksine, yüksek hızda yavaşlama yumuşak gerçekleştiğinden, pitch tepkisi daha kontrollü olur ve sürücü daha dengeli bir frenleme hissi deneyimler.,

Sonuç olarak, OPD sisteminin sürüş dinamiğini yalnızca hız–ivme ilişkisi üzerinden değil, araç gövdesinin hareket karakteristiği ve sürücü algısı boyutuyla da optimize edecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Rejeneratif tork dağılımı hızla birlikte

adapte edilmediğinde, düşük hızda sert gövde eğilimi konforu düşürebilirken, yüksek hızda yetersiz frenleme hissi güvenlik algısını zayıflatabilir. Bu nedenle pitch davranışı, hem süspansiyon tasarımında hem de OPD kontrol algoritmalarında dikkate alınması gereken kritik bir dinamik parametredir.



Şekil 4.6. Ön Aks Düşey Kuvvet Dağılımı (Fz)

Şekil 4.6'da gösterilen grafik, OPD sisteminin farklı başlangıç hızlarında uygulandığı sürüş senaryoları boyunca ön tekerleklere etki eden düşey kuvvetin (Fz) zamanla değişimini sunmaktadır. Bu değer, taşıt üzerindeki dinamik yük transferini doğrudan temsil ettiği için hem süspansiyon tepkisi hem de taşıt denge davranışı açısından önemli bir göstergedir.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, her üç hız senaryosunda da OPD devreye girdikten sonra (yaklaşık 3. saniyede) ön aks üzerindeki yükün artarak bir tepe noktaya ulaştığı ve ardından sönümlenerek dengeye geldiği görülmektedir. Bu artış, rejeneratif frenlemenin neden olduğu öne doğru yük transferinin bir sonucudur. Gaz pedalının aniden bırakılmasıyla taşıtın kinetik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülürken, motor tarafından yaratılan ters tork taşıtı yavaşlatmakta ve kütlenin ön aksa doğru kaymasına yol açmaktadır. Bu durum, süspansiyon sisteminde ön yayların sıkışmasına, arka yayların gevşemesine, dolayısıyla ön tekerlek Fz kuvvetinde artışa neden olmaktadır.

Grafik üzerinde dikkat çekici bir diğer unsur, düşük hızda (30 km/h, kırmızı eğri) gerçekleşen yük transferinin daha kısa sürede ve daha keskin biçimde oluşmasıdır. Bu, rejeneratif torkun düşük hızlarda daha ani tepki vermesiyle ilişkilidir. Diğer yandan, yüksek hız senaryosunda (90 km/h, pembe eğri) Fz değerindeki artış daha yavaş ve daha düşük genliktedir. Bu durum, yüksek hızlarda rejeneratif sistemin ters tork üretimini sınırlı ve kademeli olarak gerçekleştirmesiyle açıklanabilir.

Grafikteki tekrar eden yük transfer döngüleri, gaz–fren geçişlerinin veya OPD sisteminin pedal hareketlerine duyarlı olarak yeniden devreye girmesinin sonucudur. Her pedal sıfırlamasında ön aksta tekrar bir yük artışı gözlenmekte, bu da taşıtın süspansiyon dengesini yeniden şekillendirmektedir. Özellikle 16. saniyede gözlenen yük artışı, ani pedal tepkisiyle ilişkili kısa süreli bir yavaşlama davranışına işaret etmektedir.

Bu dinamik kuvvet artışları, ön lastiklerin yola uyguladığı normal kuvvetin artmasıyla birlikte yanal yol tutuş kapasitesini artırabilir; ancak aynı zamanda konfor kaybı, ön süspansiyonun aşırı yüklenmesi ve taşıt burnunun dalma eğilimi (nosing) gibi durumlara yol açabilir. Bu nedenle, OPD sisteminde üretilen frenleme torkunun büyüklüğü kadar zamanlaması ve dağılımı da taşıt stabilitesi açısından belirleyicidir.

4.2. Rejeneratif Frenleme Tork Profillerinin Etkisi (OPD Seviyesi)

Rejeneratif frenleme sisteminin taşıt dinamiği üzerindeki etkileri, yalnızca pedal konumu gibi kullanıcı girdilerine değil, aynı zamanda sistemin uyguladığı tork karakteristiğine de bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan hafif, orta ve agresif OPD profilleri, farklı frenleme tork eğrilerine karşılık gelen üç temel sürüş modunu temsil etmektedir.

Her bir profil, elektrik motorunun gaz pedalının bırakılmasıyla birlikte ürettiği ters torkun büyüklüğü ve zamana yayılımı açısından farklılık göstermektedir. Hafif OPD modunda rejeneratif tork düşük seviyelerde olup, taşıtın klasik coasting (serbest yuvarlanma) davranışına yakın bir frenleme tepkisi gözlenir. Orta düzey OPD profili ise hem enerji geri kazanımı hem de sürüş konforu açısından dengeli bir performans

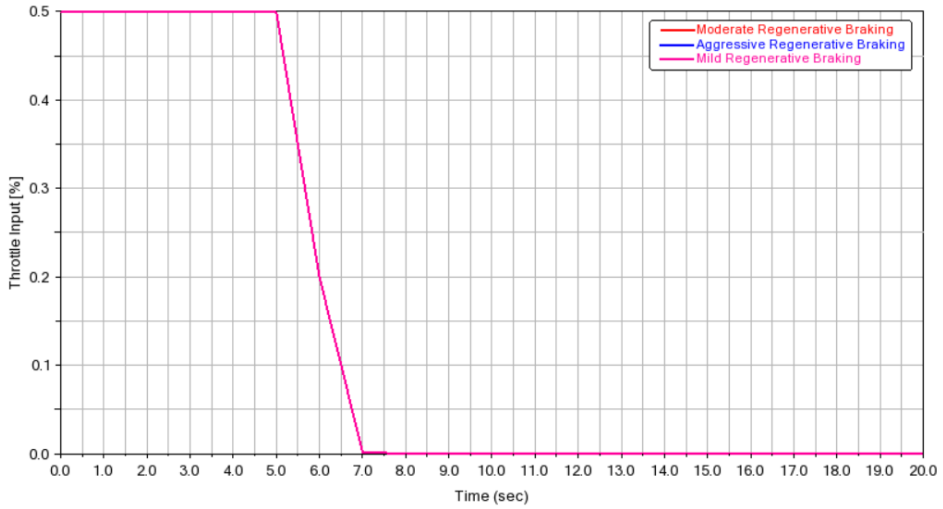
sergilemektedir. Agresif OPD modunda ise gaz pedalının bırakılmasıyla birlikte yüksek genlikli bir ters tork aniden uygulanmakta ve taşıt hızlı bir biçimde yavaşlamaktadır.

Bu üç farklı profilin taşıt üzerindeki etkileri, simülasyon sonuçlarına yansıyan hız eğrileri, ivme profilleri, süspansiyon hareketleri ve aks yükleri üzerinden net biçimde izlenmiştir. Özellikle agresif rejeneratif frenleme uygulanan senaryolarda:

- Yavaşlama ivmesinin daha büyük ve keskin olduğu,
- Ön aksta dinamik yük transferinin daha fazla gerçekleştiği,
- Pitch açısının daha ani değiştiği,
- Süspansiyon sisteminde daha kısa sürede maksimum strok değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

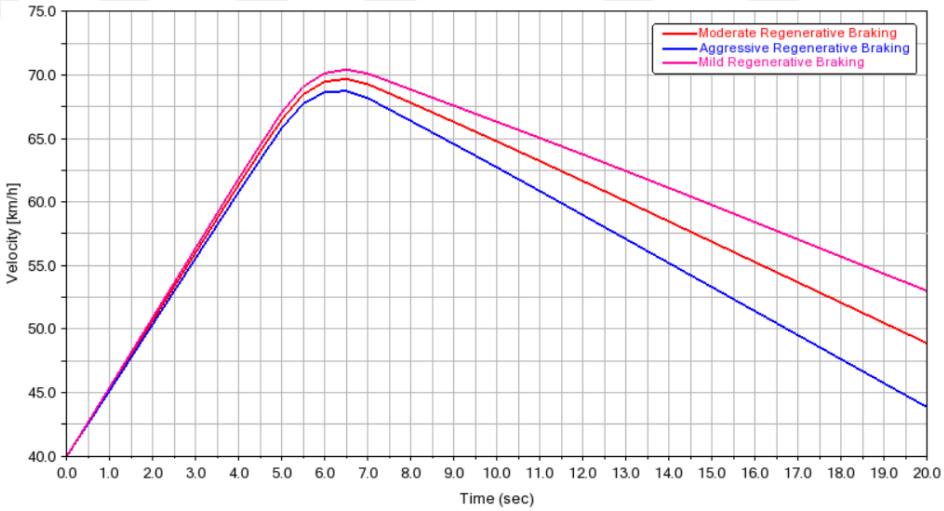
Buna karşın hafif OPD profili, düşük tork üretimi nedeniyle yavaşlama sürecini uzatmakta; taşıtın gövdesinde daha sönümlü bir hareket yaratmaktadır. Bu durum, özellikle sürüş konforu açısından tercih edilebilir bir yaklaşım sunmakta; ancak enerji geri kazanım oranı sınırlı kalmaktadır. Orta profil, bu iki uç davranış arasında bir denge noktası oluşturarak, hem dinamik yük aktarımı hem de sürücü hissiyatı açısından sürdürülebilir bir performans sunmuştur.

Sonuç olarak, OPD sistemlerinin taşıt dinamiği üzerindeki etkileri yalnızca pedal pozisyonuyla değil, pedal bırakıldıktan sonra sistemin hangi tork eğrisiyle nasıl yanıt verdiğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle rejeneratif tork profili, sistemin yazılım tabanlı kontrol stratejilerinde dikkatle ayarlanması gereken kritik bir parametredir.



Şekil 4.7. Tüm OPD senaryoları için ortak throttle (gaz pedalı) komutu profili

Tüm senaryolarda sürücü girdisi sabit tutulmuş; throttle komutu %50 seviyesinden yaklaşık 6. saniyede sıfıra düşürülmüştür ve bu noktadan itibaren, hız değişimi yalnızca OPD sisteminin ürettiği rejeneratif torka bağlı olarak gelişmiştir.



Şekil 4.8. Farklı rejeneratif frenleme seviyelerine göre taşıtın boylamasına hız değişimi (Velocity vs. Time)

Grafikten görüldüğü üzere:

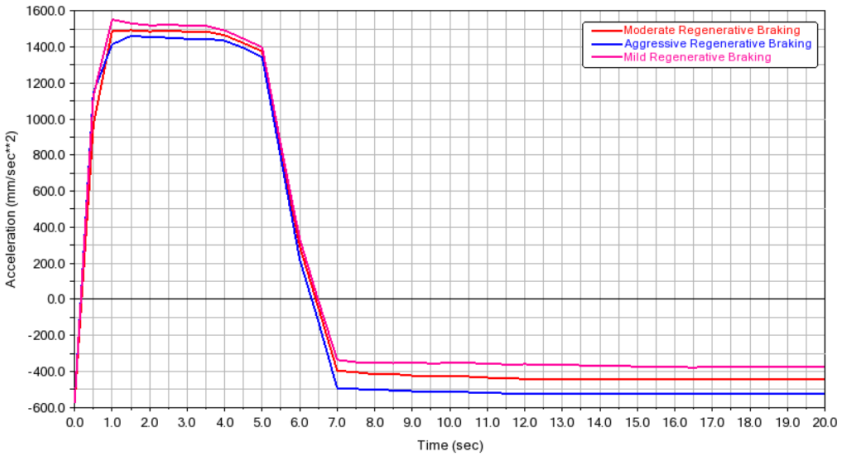
- Aggressive Regenerative Braking (mavi eğri), en kısa sürede en yüksek yavaşlama oranını sergilemiştir.

- Moderate Regenerative Braking (kırmızı eğri), kontrollü bir frenleme karakteristiği ile yavaşlamayı zamana yaymıştır.
- Mild Regenerative Braking (pembe eğri) ise taşıtın yavaşlamasını en geç başlatan ve en uzun sürede gerçekleştiren profili yansıtmaktadır.

Bu farklar, rejeneratif sistemin uyguladığı ters tork miktarı ve tepki süresi ile doğrudan ilişkilidir. Agresif OPD modunda motor, gaz pedalının bırakılmasıyla birlikte hızlı ve yüksek torkla rejeneratif frenleme başlatmakta; bu da taşıtın kinetik enerjisini kısa sürede azaltmakta ve hız eğrisinde daha dik bir azalma oluşturmaktadır. Buna karşılık hafif OPD modunda motorun ters tork üretimi sınırlı ve yavaş olduğu için, taşıt klasik serbest yuvarlanma benzeri bir davranış sergileyerek daha uzun sürede yavaşlamaktadır.

Ayrıca, her üç senaryoda gaz pedalının bırakılma anına kadar olan hızlanma eğrilerinin neredeyse örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu, analizde kullanılan tork profillerinin yalnızca frenleme (rejeneratif) karakterine göre değiştiğini; hızlanma fazının sabit ve karşılaştırılabilir koşullarda gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, OPD seviyeleri arasındaki farkların doğrudan frenleme karakteristiklerinden kaynaklandığını net biçimde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, rejeneratif frenleme seviyesi, taşıtın yavaşlama süresi ve ivme karakteristiği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Sistem tasarımı sırasında, sürücü güvenliği, sürüş konforu ve enerji geri kazanımı arasında bir denge kurulabilmesi için bu tork profillerinin hız duyarlılığı ve mod geçişleriyle birlikte optimize edilmesi önerilmektedir.



Şekil 4.9. Farklı rejeneratif frenleme seviyelerinde taşıtın boylamasına ivme değişimi

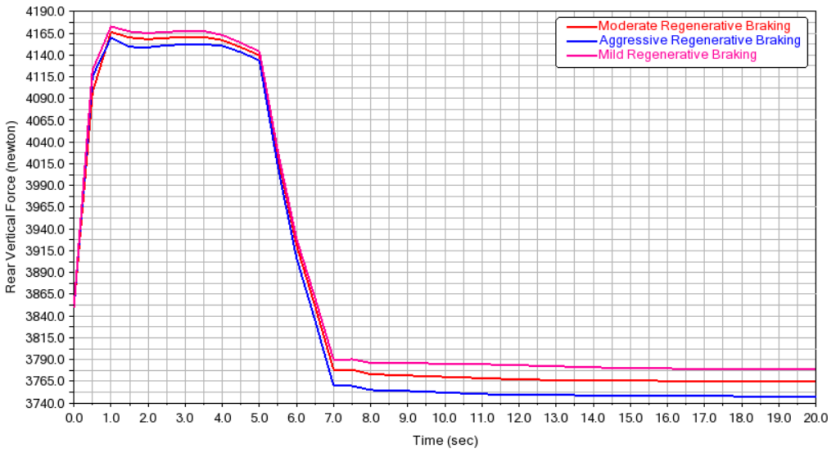
Şekil 4.9. 'da gösterilen grafik, mild, moderate ve aggressive rejeneratif frenleme profillerine sahip OPD senaryolarında taşıtın boylamasına ivme (longitudinal acceleration) değişimini sunmaktadır. İvme değerleri mm/s² cinsinden verilmiş olup, analizde değerlendirme için yaklaşık -0.5 g seviyelerine kadar ulaşan negatif ivmeler gözlenmiştir.

- Aggressive Regenerative Braking (mavi eğri):
  En yüksek ters torku uyguladığı için en kısa sürede maksimum negatif ivmeye ulaşmıştır. Minimum değer yaklaşık –500 mm/s² (–0.5 m/s²) civarındadır. Bu, hızlı yavaşlama ve daha yüksek dinamik yük transferi anlamına gelir.
- Moderate Regenerative Braking (kırmızı eğri):
  Daha yumuşak bir frenleme profili sunmuş, –0.45 m/s² seviyelerine yakın bir negatif ivme oluşturmuştur. Enerji geri kazanımı ve konfor arasında dengeli bir frenleme davranışı sergilemiştir.
- Mild Regenerative Braking (pembe eğri):
  En düşük ters tork seviyesine sahip olduğu için taşıtın yavaşlaması daha yavaş gerçekleşmiş; negatif ivme değeri en düşük olmuştur (yaklaşık –0.4 m/s²). Bu durum sürüş hissi açısından konforlu olsa da, frenleme performansı sınırlı kalmıştır.

Tüm OPD profillerinde negatif ivme seviyeleri kısa sürede sabitlenmiş, frenleme

sürecinde ivme değeri zamanla azalarak daha sönümlü bir hâl almıştır. Bu da sistemin ani bir tork tepkisinden sonra rejeneratif momenti sabitleyerek taşıtın kontrollü şekilde yavaşlamasını sağladığını göstermektedir.

Bu analiz, rejeneratif frenleme seviyesinin sadece taşıt hızını değil, taşıtın ivme tepkisini de doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Taşıtın kısa sürede ne kadar yavaşladığı ve sürücü tarafından hissedilen frenleme sertliği bu ivme eğrileriyle doğrudan ilişkilidir. Agresif profil daha etkin enerji geri kazanımı sağlasa da konforu azaltabilirken, mild profil konforlu fakat daha uzun sürede frenlemeye neden olmaktadır.



4.10. Rejeneratif Frenleme Seviyelerine Göre Yük Transferi

4.3. Urban Road Sürüş Senaryosunda Farklı Rejeneratif Frenleme Karakteristiklerinin Analizi

Bu çalışmada oluşturulan 300 saniyelik kentsel sürüş döngüsü, tipik şehir içi trafik koşullarını temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.20'de gösterilen gaz pedalı (throttle) profili ve Şekil 4.21'de sunulan hız profili incelendiğinde, sürüş boyunca farklı trafik senaryolarının başarıyla modellendiği görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, simülasyonun ilk 0 ile 20. saniyeleri arasında gaz pedalı değerinin %30'dan %10'a doğru azaldığı ve bu sürecin düşük hızda yumuşak bir ivmelenme ile devam ettiği tespit edilmiştir. Bu durum, trafik ışığından kalkış sonrası hafif hızlanma ve ardından kısa süreli sabit hızda ilerleme davranışı olarak yorumlanmaktadır.

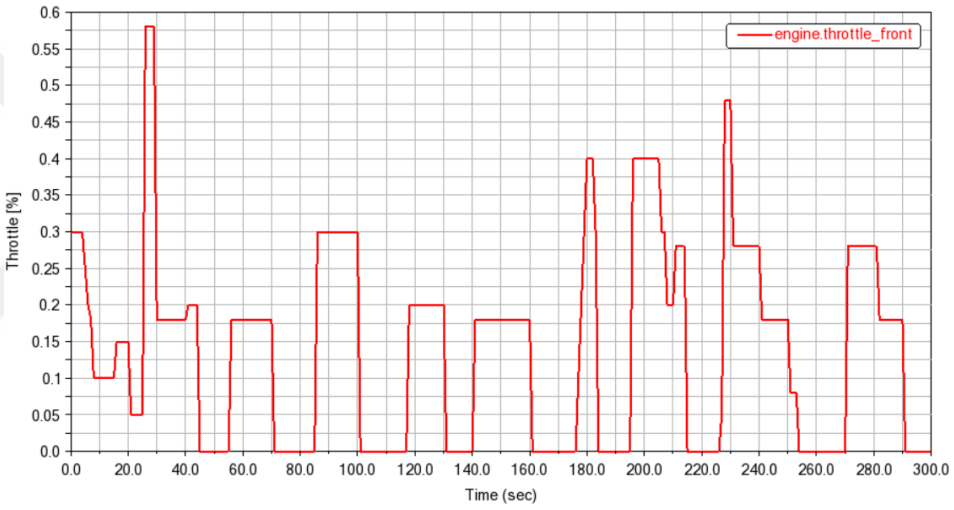
Simülasyonun 20. ve 30. saniyeleri arasında throttle'ın ani bir artış göstererek %58 seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu periyotta taşıtın hızlanma talebinin arttığı ve trafiğin açılmasıyla birlikte sürücünün daha hızlı ivmelenmeye yöneldiği değerlendirilmektedir. 30 ile 45. saniyeler arasındaki bölümde ise throttle önce %18 seviyesine düşmüş, ardından sıfır değerine gerilemiştir. Bu davranış, aracın önce sabit hızda ilerlediği, sonrasında ise hızın azaltılarak yavaşlama sürecine girildiğini göstermektedir. Bu kısım, muhtemelen bir kırmızı ışığa yaklaşma, önündeki araç nedeniyle hız düşürme veya bir kavşağa giriş öncesi yavaşlama ile ilişkilendirilebilir.

Sürüş döngüsünün 45 ile 60. saniyeleri arasında throttle değerinin tamamen sıfırlandığı tespit edilmiştir. Bu durum, aracın tamamen durduğu ve bekleme pozisyonunda olduğu bir fazı temsil etmektedir. Şehir içi koşullarda bu davranış, trafik ışığında bekleme, yayaların geçişine izin verme veya trafik sıkışıklığı gibi senaryolarla ilişkilendirilebilir. Takip eden 60 ile 90. saniyeler arasındaki süreçte throttle değerinin %18 ile %30 aralığında değiştiği ve aracın düşük hızda ilerlediği görülmüştür. Bu kısım, akıcı olmayan fakat hareket eden bir trafik akışına işaret etmektedir.

90. saniye ile 100. saniye arasında throttle'ın tekrar %58'e yükselmesi, sürücünün hızlı bir şekilde hızlanma talebinde bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, genellikle açılan trafik, kavşaktan çıkış veya öndeki aracın hızlanması gibi senaryoları temsil etmektedir. 100 ile 150. saniyeler arasında throttle değerinin sıfıra yakın olması, aracın durma noktasına geldiği veya düşük hızlarda seyrettiği bir bölümü göstermektedir. Bu kısımda hız profilinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir.

180 ile 210. saniyeler arasında throttle değerinin %40 seviyelerine ulaşıp ardından kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Bu durum, hızlı bir ivmelenme ve sonrasında frenleme veya yavaşlama süreci ile açıklanabilir. Bu davranış, genellikle açılan bir yolda hızlanma ve sonrasında yeniden yavaşlama ihtiyacını temsil etmektedir. Benzer şekilde, 220 ile 270. saniyeleri arasında throttle'ın %48'e kadar çıktığı ve daha sonra kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Bu süreç, nispeten akıcı bir trafik içinde seyretme ve ardından durma veya yavaşlama davranışını yansıtmaktadır.

Son olarak, 270 ile 300. saniye aralığında throttle %28 civarında sabitlenmiş ve araç bu süreçte orta hızlarda stabil bir şekilde ilerlemiştir. Bu durum, şehir içi koşullarda hız sınırlarına uygun bir seyir davranışının göstergesidir. Hız profili detaylı olarak incelendiğinde, throttle komutundaki değişimlerle uyumlu olarak hızda artış ve azalmaların gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Özellikle 180 ve 250. saniye civarlarında hızın maksimum seviyelere ulaştığı ve 200. saniye dolaylarında ise hızın sıfıra yaklaşarak aracın tamamen durduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, oluşturulan sürüş senaryosunun kentsel trafik davranışlarını başarılı bir şekilde temsil ettiğini ve simülasyon ortamının gerçekçi sürüş koşullarını yansıttığını ortaya koymaktadır.



4.11. Şehir içi Sürüş Senaryosunda Gaz Pedalı (Throttle) Girdi Profili Tanımlaması

Bu çalışmada kullanılan sürüş senaryosu, daha önce literatürde incelenen çeşitli urban yol koşulları referans alınarak oluşturulmuş özgün bir senaryodur. Şekil 4.11'de yer alan throttle (gaz pedalı) girdi profili, taşıtın 300 saniyelik sürüş süresi boyunca hızlanma, yavaşlama ve bekleme gibi tipik şehir içi sürüş manevralarını yansıtacak şekilde tasarlanmıştır.

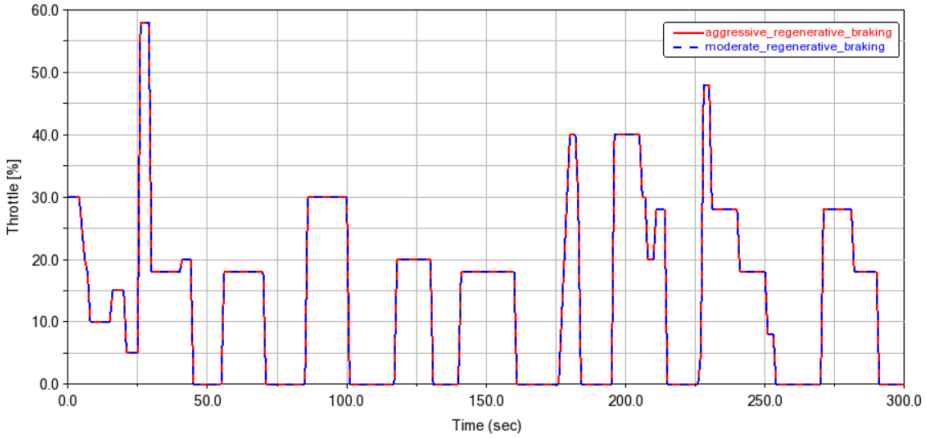
Throttle girdisi incelendiğinde, düşük hızlanma ve ani duruşların bir arada bulunduğu, dinamik ve değişken bir kullanım paterni gözlemlenmektedir. Başlangıçta (0–40 saniye) throttle komutu yaklaşık %0.3 seviyesinde tutulmuş, ardından kademeli olarak

azaltılarak belirli bekleme süreleri oluşturulmuştur. Bu durum, şehir içi trafiğinde araçların sıkça karşılaştığı dur-kalk davranışını temsil etmektedir.

60–100 saniye aralığında throttle girdisinin %0.3 seviyelerinde sabitlendiği görülmekte olup bu durum, araçta nispeten daha akıcı bir hızlanma ve sabit hızla ilerleme evresine karşılık gelmektedir. Devam eden süreçte (100–160 saniye) throttle komutunun sıfırlandığı ve ardından tekrar artarak hızlanma-yavaşlama döngülerinin gerçekleştiği tespit edilmiştir.

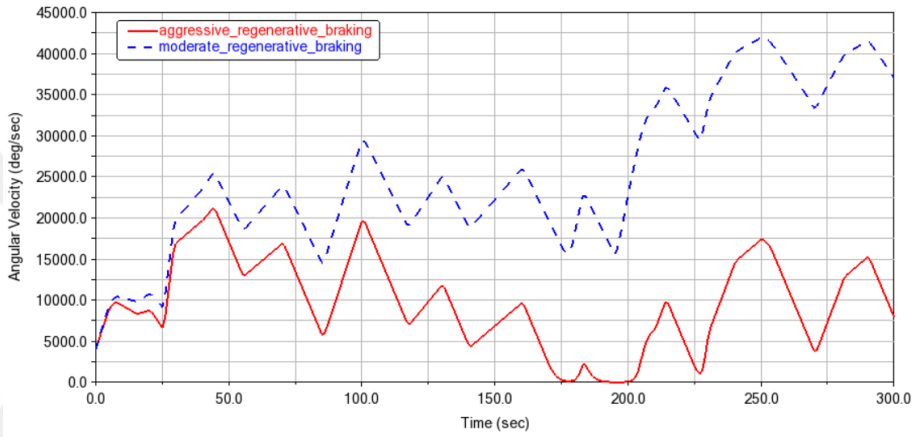
Özellikle 180–240 saniye aralığında throttle girişlerinde daha yüksek pik değerler gözlemlenmektedir. Bu periyot, muhtemelen trafik ışıklarında bekleme sonrası ani hızlanmalar veya yoğun trafikte ani hareketlenmeler ile ilişkilidir. Son bölüm olan 240–300 saniye aralığında ise throttle girdisinin daha düşük seviyelerde ve daha kısa süreli dalgalandığı, bunun da yavaş ilerleyen trafik akışına veya varış noktasına yaklaşmaya işaret ettiği değerlendirilmektedir.

Bu throttle profili, urban sürüş koşullarında one-pedal driving (OPD) stratejilerinin araç dinamiği ve enerji yönetimi üzerindeki etkilerini araştırmaya yönelik olarak geliştirilmiştir. Bu sayede senaryo, gerçekçi şehir içi kullanım koşullarını modelleme açısından yeterli doğruluk sağlamaktadır.



4.12. Urban Sürüş Senaryosu İçin Gaz Pedalı Profili

Şekil 4.12'de, şehir içi sürüş senaryosu kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılan throttle (gaz) pedal konumu değişimi, iki farklı rejeneratif frenleme stratejisi aggressive ve moderate regenerative braking için karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafik üzerinden görülebileceği gibi, throttle profili her iki durumda da tamamen örtüşmekte ve sürüş döngüsü boyunca aynı hız taleplerini temsil etmektedir. Bu yaklaşım, analizin güvenilirliğini artırmakta ve sadece rejeneratif frenlemenin taşıt dinamiği ve enerji yönetimi üzerindeki etkilerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır.



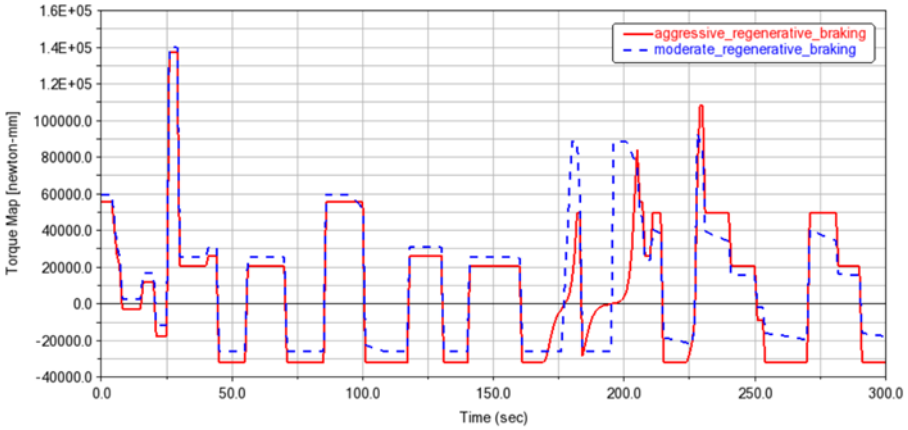
Şekil 4.13. İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Motor Çıkış Açısal Hızının (Engine Output Omega) Zamanla Değişimi

Bu grafikte, agresif rejeneratif frenleme (kırmızı çizgi) ve orta rejeneratif frenleme (mavi kesikli çizgi) seviyeleri için motor çıkış şaftına ait açısal hız (engine output omega) değerlerinin zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Simülasyon süresince aynı throttle profili uygulanmış, yalnızca rejeneratif frenleme stratejisi değiştirilmiştir.

Moderate rejeneratif frenleme stratejisinde motor açısal hızı, tüm sürüş döngüsü boyunca belirgin şekilde daha yüksek seviyelerde seyretmektedir. Bu durum, düşük rejeneratif direnç nedeniyle aracın daha serbest bir şekilde ivmelendiğini ve yavaşladığını göstermektedir. Özellikle 200. saniye sonrası motor çıkış hızının 40.000 deg/s seviyesine ulaştığı gözlemlenmektedir.

Buna karşılık, aggressive rejeneratif frenleme uygulamasında, motor açısal hız

değerleri sürekli daha düşük kalmaktadır. Frenleme sırasında oluşan daha yüksek jeneratör torku, motorun daha hızlı şekilde yavaşlamasına sebep olmakta ve bu da açısal hız profiline doğrudan yansımaktadır. 180 ila 200. saniyeler arasında motor çıkış açısal hızının sıfıra yaklaştığı dönemler, dur-kalk trafikte daha sert frenleme etkisini temsil etmektedir. Bu durum, agresif frenleme modunda kinetik enerjinin daha hızlı elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.14. İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Motor Torkunun Zamanla Değişimi

Bu grafikte, aynı throttle profili altında aggressive regenerative braking ve moderate regenerative braking senaryoları için motor map torkunun zamana bağlı değişimi karşılaştırılmaktadır. Motor map torku, motorun çalıştığı dönemde hız ve yük koşullarına bağlı olarak ürettiği efektif torku temsil etmektedir.

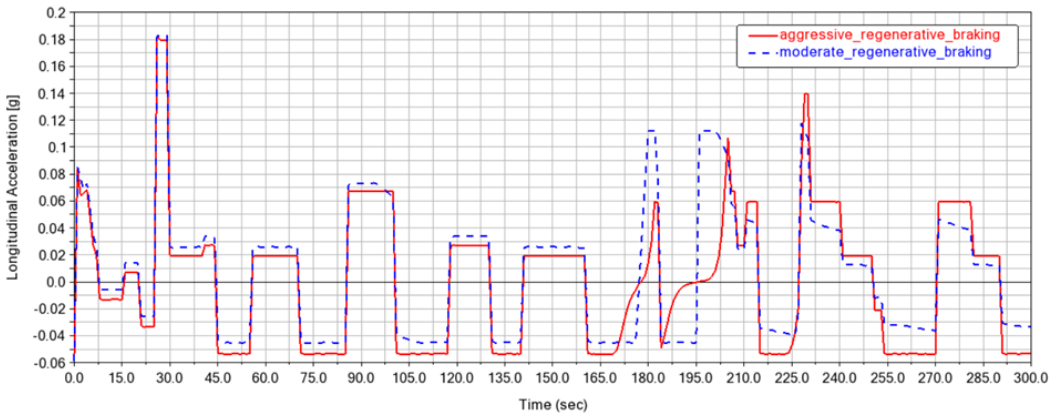
Pozitif tork değerleri, ivmelenme fazlarında motorun çekiş yönünde çalıştığı anları; negatif tork değerleri ise rejeneratif frenleme sırasında jeneratör modunda çalışarak kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdüğü anları ifade etmektedir.

Grafikte pozitif tork seviyeleri her iki senaryo için benzer eğilimler göstermektedir. Bunun nedeni, throttle profili ve sürüş talebinin aynı olmasıdır. Ancak negatif tork seviyelerinde ciddi farklar ortaya çıkmaktadır. Aggressive rejeneratif frenleme durumunda negatif tork değerleri -35.000 N·mm seviyelerine kadar ulaşırken, moderate rejeneratif frenleme senaryosunda bu değerler maksimum -20.000 N·mm

civarında sınırlı kalmaktadır.

Bu farklılık, agresif rejeneratif frenlemenin kinetik enerjiyi daha hızlı ve yüksek oranlarda elektrik enerjisine dönüştürdüğünü ve motorun jeneratör modunda daha yoğun çalıştığını göstermektedir. Özellikle 190 ila 230. saniyeler arasındaki ani frenleme fazlarında aggressive frenleme altında motor torkunun ani ve daha yüksek negatif değerlere ulaştığı gözlemlenmektedir.

Sonuç olarak, aggressive rejeneratif frenleme, enerji geri kazanımı açısından daha verimli olsa da, sürüş konforu ve lineerlik açısından daha sert bir yavaşlama profili sunmaktadır. Moderate rejeneratif frenleme ise daha düşük enerji geri kazanımına sahip olmakla birlikte sürüş konforu açısından daha yumuşak bir karakteristik sergilemektedir.



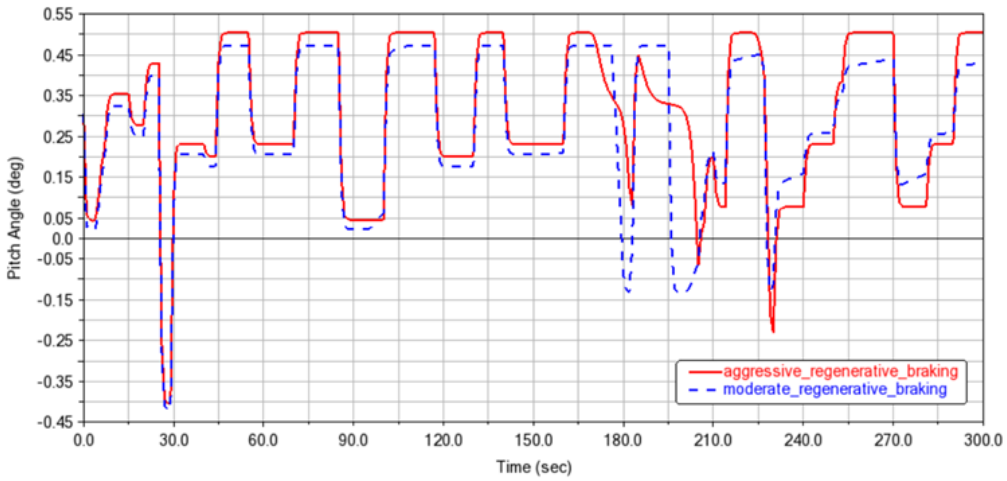
Şekil 4.15. İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Boylamasına İvmenin (Longitudinal Acceleration) Zamanla Değişimi

Şekil 4.15'te, agresif rejeneratif frenleme ve orta seviyede rejeneratif frenleme stratejilerinin, araç boylamasına ivme (g) değerlerine etkisi zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Grafik, 300 saniyelik kentsel sürüş senaryosu süresince meydana gelen hızlanma ve yavaşlama davranışlarını temsil etmektedir.

Her iki rejeneratif frenleme seviyesi de genel eğilim itibariyle benzer hızlanma ve yavaşlama örüntüleri sergilemekle birlikte, agresif rejeneratif frenleme koşulunda ivme değişimlerinin daha keskin olduğu gözlemlenmektedir. İvmelenmenin pozitif olduğu

hızlanma fazlarında ise iki strateji arasında görece daha sınırlı bir fark gözlemlenmektedir. Ancak negatif ivmelenme sırasında agresif rejeneratif frenleme, daha yüksek yavaşlatma kuvvetleri oluşturarak aracın hızının daha kısa sürede düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, rejeneratif frenleme karakteristiğinin hız değişim eğrisinin eğiminde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Uzunlamasına ivmelenme davranışı yol tutuş ve sürüş konforu açısından da önemli bir parametredir. Özellikle frenleme sırasında agresif rejeneratif frenlemenin daha ani ivme değişimlerine sebep olması, aracın longitudinal jerk seviyelerini artırarak yolcular üzerinde daha hissedilir bir kuvvet değişimi yaratmaktadır. Moderate rejeneratif frenleme ise ivmelenme geçişlerini daha yumuşak gerçekleştirerek daha konforlu bir sürüş deneyimi sunmaktadır.



Şekil 4.16. İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Pitch Açısının Zamanla Değişimi

Pitch açısı, taşıtın boylamasına düzlemdeki eğim açısını ifade etmektedir. Başka bir deyişle, aracın burnunun yukarı veya aşağı yönlü hareketini tanımlar. Pozitif pitch açısı, aracın burnunun yukarı kalktığı (arka aksın aşağı çöktüğü), negatif pitch açısı ise burnun aşağı yöneldiği (ön aksın çöktüğü) durumları temsil eder. Otomotiv mühendisliğinde pitch hareketi, hem sürüş konforu hem de dinamik performans açısından kritik öneme sahiptir.

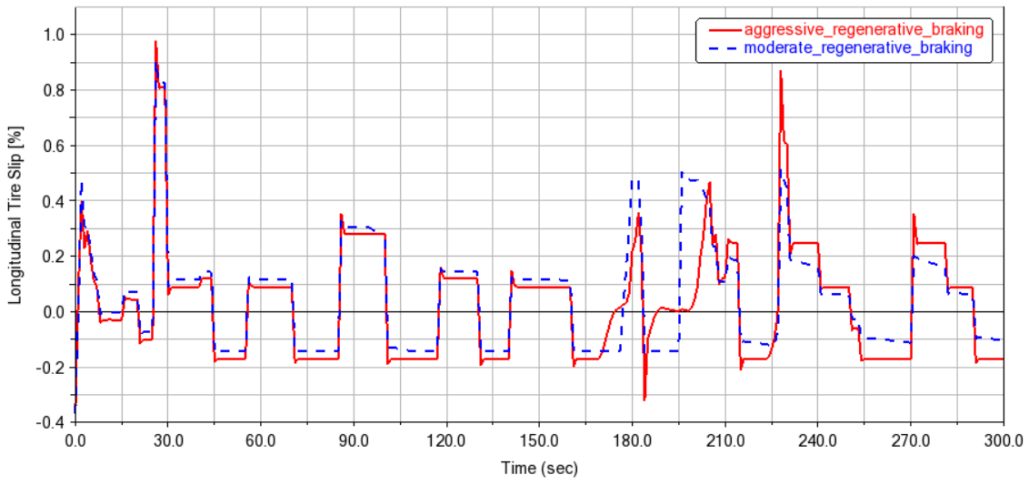
Bu grafikte, aggressive regenerative braking (kırmızı çizgi) ve moderate regenerative

braking (mavi kesikli çizgi) stratejileri altında pitch açısının zaman bazlı değişimi gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere hızlanma fazlarında pitch açısı pozitif değerlere ulaşmakta ve bu durum aracın arka aksına doğru bir ağırlık transferine yol açmaktadır. Bu tür bir ağırlık transferi, özellikle arka aksa daha fazla yük binmesine neden olur ve bu da sürücü tarafından aracın burnunun kalkması şeklinde hissedilir.

Frenleme ve yavaşlama anlarında ise pitch açısı negatif değerlere kaymaktadır. Bu durum, aracın ön aksına doğru ağırlık transferine ve aracın burnunun aşağı doğru eğilmesine sebep olur. Özellikle aggressive regenerative braking senaryosunda negatif pitch açıları daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Örneğin, 180 ila 200. saniyeler arasındaki yavaşlama fazında pitch açısı yaklaşık -0.35 derece seviyesine kadar düşmektedir. Buna karşın moderate regenerative braking senaryosunda aynı anda bu değer -0.25 derece civarındadır. Bu farklılık, agresif rejeneratif frenlemenin daha sert bir frenleme etkisi yaratarak aracın öne doğru daha sert dalmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Pitch açısının artışı (pozitif yönde) sürücü tarafından aracın burnunun yukarı kalkması ve arka kısmın çökelmesi şeklinde algılanır. Bu durum, yüksek hızlanmalarda yol tutuş dengesini etkileyebilir ve ön lastiklerin zeminle temasını kısmen azaltabilir. Benzer şekilde pitch açısının negatif yönde artması, yani aracın önünün aşağıya dalması, sürücüde öne doğru itme hissi yaratır ve özellikle ani frenlemelerde konfor kaybına neden olabilir. Ayrıca ön aks üzerindeki yük artışı, frenleme verimini artırsa da, tekrar gaz vermede moment aktarımında denge kaybına yol açabilir.

Sonuç olarak, pitch hareketleri sürüş konforu, yol tutuş ve dinamik denge açısından oldukça belirleyicidir. Bu çalışmada gözlemlendiği üzere, daha agresif rejeneratif frenleme stratejileri pitch açısında daha büyük negatif sapmalara neden olmakta, bu da sürüş esnasında daha sert öne dalma etkisi yaratmaktadır. Buna karşın moderate rejeneratif frenleme daha yumuşak ve konforlu bir sürüş profili sağlamaktadır.



Şekil 4.17. İki Farklı Rejeneratif Frenleme Seviyesi İçin Boylamasına Tekerlek Kaymasının Zamanla Değişimi

Boylamasına tekerlek kayması (longitudinal tire slip), araç dinamiği açısından oldukça kritik bir parametredir. Bu büyüklük, tekerleğin dönme hızı ile aracın gerçek yer değiştirme hızı arasındaki farkın normalize edilmesiyle tanımlanır. Tekerlek kayması pozitif olduğunda çekiş (traction) sırasında oluşan kaymayı, negatif olduğunda ise frenleme esnasında oluşan kaymayı temsil etmektedir. Teorik olarak %0 kayma, tekerleğin tamamen yol ile uyumlu hareket ettiğini gösterirken, %100'e yaklaşan kayma ise tekerleğin tamamen kilitlendiği veya boşa döndüğü anlamına gelir.

Bu grafikte, aggressive regenerative braking (kırmızı çizgi) ve moderate regenerative braking (mavi kesikli çizgi) stratejileri altında boylamasına tekerlek kaymasının zamana bağlı değişimi analiz edilmiştir. Özellikle hızlanma ve yavaşlama geçişlerinde kayma oranlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmektedir.

Frenleme anlarında, özellikle aggressive regenerative braking durumunda kayma oranının %1'e (yani 1.0 değeri) oldukça yaklaştığı bazı bölgeler gözlemlenmektedir. Bu durum, tekerlek ile zemin arasındaki hız farkının oldukça yüksek olduğunu, dolayısıyla tekerleklerin dönme hızının yol hızına göre ciddi şekilde yavaşladığını ifade eder. Bu tür yüksek kayma oranları, özellikle düşük yol tutuş koşullarında (ıslak, buzlu veya kaygan zemin) taşıtın stabilitesini ve kontrol edilebilirliğini olumsuz etkileyebilir.

Kayma oranının bu denli yükselmesi, agresif rejeneratif frenleme stratejisinin tekerlekler üzerinde güçlü bir negatif tork oluşturduğunu ve bu torkun tekerlek-zemin arasındaki yapışma limitlerini zorladığını göstermektedir. Eğer bu sınırlar aşılırsa, ABS (Anti-lock Braking System) devreye girmediği senaryolarda tekerlek kilitlenmesine ve aracın doğrusal stabilitesinin kaybına sebep olabilir. Bu durum özellikle acil frenleme veya ani hız kesme anlarında daha kritik hale gelir.

Buna karşın moderate regenerative braking senaryosunda kayma oranları daha kontrollü seviyelerde kalmaktadır. Bu da yol tutuş kaybı riskinin daha düşük olduğunu ve taşıtın dinamik dengesinin daha iyi korunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, boylamasına tekerlek kaymasının artması, özellikle agresif rejeneratif frenleme stratejilerinde yol tutuş kaybı, direksiyon hakimiyetinde azalma ve frenleme performansında dalgalanma gibi olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu nedenle rejeneratif frenleme seviyesi belirlenirken hem enerji geri kazanımı optimizasyonu hem de taşıt dinamik performansı dikkate alınmalıdır. Aksi halde, özellikle yüksek kayma oranlarının görüldüğü senaryolarda, yol güvenliği açısından olumsuz etkiler ortaya çıkabilir.

4.4. Enerji Geri Kazanım Hesaplama Yöntemleri

Elektrikli ve hibrit araçlarda rejeneratif frenleme, taşıtın kinetik enerjisinin yavaşlama sırasında elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır. Bu dönüşüm, sürüş verimliliğini artırmak ve batarya kapasitesinin daha etkin kullanılmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı rejeneratif frenleme stratejilerinin enerji geri kazanım potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla iki farklı hesaplama yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yöntemler; kinetik enerji temelli hesaplama ve motor torku ve devir temelli hesaplama olarak sınıflandırılmıştır.

4.4.1. Kinetik Enerji Temelli Hesaplama

Kinetik enerji yaklaşımı, aracın hızına ve kütlesine bağlı olarak taşıt üzerindeki toplam kinetik enerjinin hesaplanmasına dayanır. Bir aracın kinetik enerjisi şu temel denklem

ile ifade edilir:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Burada:

- E_k : Kinetik enerji (Joule)
- m : Araç kütlesi (kg)
- v : Araç hızı (m/s)

Bu yöntemde, aracın yavaşlama anında hızındaki azalma, sistemden kaybolan kinetik enerjiyi temsil eder. Rejeneratif frenleme bu kaybın bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu bağlamda, iki hız arasındaki kinetik enerji farkı enerji geri kazanım potansiyelini verir:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}m({v_1}^2 - {v_2}^2)$$

Burada:

- v_1 : Frenleme öncesi hız (m/s)
- v_2 : Frenleme sonrası hız (m/s)

Ancak bu yöntem teorik maksimum geri kazanılabilir enerjiyi verir. Gerçekte, çeşitli kayıplar mevcuttur:

- Mekanik kayıplar (dişli sürtünmeleri, rulman kayıpları),
- Motor jeneratör verimi,
- İnverter ve elektronik kayıplar,
- Batarya şarj-deşarj verimi

Bu nedenle gerçekte geri kazanılan enerji şu şekilde ifade edilir:

$$E_{regen} = \eta . \Delta E_k$$

Burada η, sistemin toplam enerji dönüşüm verimini temsil eder ve genellikle %60 ile %85 arasında değişir.

Bu yaklaşımın avantajı hızlı ve sade bir hesaplama sağlamasıdır. Ancak, motor ve güç

aktarım sisteminin sınırlarını, tork sınırlamalarını ve dinamik sınırları dikkate almaması önemli bir eksikliktir.

4.4.2. Motor Torku ve Devir (RPM) Temelli Hesaplama

Enerji geri kazanımının daha gerçekçi ve mühendislik odaklı değerlendirmesi, motorun uyguladığı tork ve dönme hızına (omega) dayalıdır. Motor, rejeneratif frenleme sırasında jeneratör gibi çalışır ve bu süreçte şafttan mekanik enerji çekilir. Bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür.

Anlık geri kazanılan güç şu denklem ile hesaplanır:

$$P = T.\omega$$

Burada:

- P: Anlık mekanik güç (Watt)
- T: Motor jeneratör torku (Nm)
- ω: Motor açısal hızı (rad/s)

RPM'den açısal hıza dönüşüm şu şekilde yapılır:

$$\omega = \frac{2\pi.RPM}{60}$$

Zamana bğlı enerji hesabı ise şu formülle yapılır:

$$E = \int P\, dt$$

Diskret veri seti üzerinden pratik hesaplama için:

$$E = \sum_i P_i.\Delta_t$$

$$E = \sum_i (T_i.\omega_i).\Delta_t$$

Bu yöntemin avantajları:

- Motorun tork limiti, şaft hızı ve sistem dinamikleri doğrudan hesaba katılır.
- Rejeneratif frenleme sadece negatif tork alanlarında gerçekleştiği için

daha hassas ve gerçekçi sonuç sağlar.

- Aynı zamanda şaft verimi, inverter kayıpları ve batarya şarj verimi gibi kayıpları modele dahil etmek mümkündür.

Toplam geri kazanılan enerji şu formülde verim faktörüyle ifade edilir:

$$E_{regen} = \eta_{motor} \cdot \eta_{inverter} \cdot \eta_{battery} \cdot \sum (T_i . \omega_i) . \Delta_t$$

4.4.3. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Özellik	Kinetik Enerji Yaklaşımı	Tork & RPM Yaklaşımı
Hesaplama Temeli	Araç hızı ve kütlesi	Motor torku ve devir
Dönüşüm Verimi	Yaklaşık tahmin (genelde %70-80)	Detaylı şekilde ayrı ayrı modele dahil edilir
Dinamik Kısıtlar	Yok	Var
Gerçekçilik	Teorik maksimum	Pratik ve mühendislik doğruluğu yüksek

4.4.4. Enerji Geri Kazanımı Hesabı

Rejeneratif frenleme sistemlerinin performans değerlendirmesinde en önemli metriklerden biri, araç tarafından kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya geri kazandırılan toplam enerji miktarıdır. Bu çalışmada, enerji geri kazanım miktarı doğrudan motor çıkışına etki eden moment ve devir verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Uygulanan hesaplama yöntemi iki temel fiziksel prensip üzerine kuruludur: açısal hız ve mekanik güç ilişkisi.

4.4.5. Temel Fiziksel Model

Bir döner sistemde üretilen anlık mekanik güç, uygulanan moment ile açısal hızın çarpımı olarak tanımlanır:

$$P = T.\omega$$

Burada:

- P : Anlık mekanik güç (watt)
- T: Motor çıkış momenti (Newton-metre, N.m)
- ω: Açısal hız (radyan/saniye, rad/s)

Açısal hız, motor çıkış deviri (RPM) üzerinden aşağıdaki dönüşümle elde edilir.

$$\omega = \frac{RPM.2\pi}{60}$$

Bu dönüşüm, dakikadaki devir sayısını (RPM) saniyedeki radyan cinsine çevirerek dönel sistemlerde kullanılabilir hale getirir.

4.4.6. Anlık Güç Hesaplaması

Simülasyon verileri her 15 saniyede bir örneklenmiştir. Her zaman adımında araç motoru tarafından oluşturulan geri kazanım momenti (T) ve karşılık gelen motor devri (RPM) kullanılarak o anki mekanik güç (P) hesaplanır.

Burada kritik nokta, yalnızca negatif moment değerlerinin dikkate alınmasıdır. Çünkü yalnızca negatif moment değerleri rejeneratif frenleme modunu temsil eder ve bu durumda motor, bir jeneratör gibi çalışarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Pozitif moment değerleri ise çekiş (tahrik) modunda kullanıldığı için bu hesaplamada dahil edilmez.

Her zaman adımında:

$$P_i = \begin{cases} T_i . \omega & T_i < 0 \\ 0 & T_i > 0 \end{cases}$$

4.4.7. Enerji Hesaplaması

Güç, zamanla entegrasyon yoluyla enerjiye dönüştürülür. Zaman adı $\Delta t = 15$ saniye olduğundan, her bir zaman dilimi için enerji hesaplaması şu şekilde yapılır:

$$E_i = P_i, \Delta t$$

Bütün zaman dilimleri için enerji toplandığında, toplam geri kazanılan enerji (Joule) bulunur:

$$E_{total} = \sum E_i$$

Bu enerji daha yaygın kullanılan Watt-saat (Wh)

$$E_{Wh} = \frac{E_{total}}{3600}$$

4.4.8. Ölçeklendirme ve Uzun Süreli Etki

Yapılan analiz 300 saniyelik (5 dakikalık) bir sürüş senaryosunu kapsamaktadır. Bu senaryo, urban (kentsel) sürüş koşullarını temsil etmektedir. Bu sürede elde edilen enerji geri kazanım miktarının bir saatlik öngörülern değere ölçeklendirilmesi için aşağıdaki çarpan uygulanmıştır.

$$Katsayı = \frac{3600}{300} = 12$$

Dolayısıyla bir saatlik sürüş süresinde beklenen enerji geri kazanımı:

$$E_{Wh,hour} == E_{Wh} . 12$$

4.4.9. Uygulanan Parametreler ve Özel Durumlar

Torque Verileri, simülasyon çıktılarında tork değeri birim olarak Newton-milimetre (N·mm) cinsinden elde edilmiştir. Hesaplamalarda Newton-metre (N·m) cinsine dönüştürülmüştür:

$$T_{(N.m)} = \frac{T_{(N.mm)}}{1000}$$

RPM: Zaman serisi boyunca motor devri, yol ve yük koşullarına göre değişkenlik göstermektedir.

Negatif Tork Uygulaması: Tork değeri negatif olduğunda sistem rejeneratif frenleme modunda çalışmaktadır. Bu durumda, tekerleklerden motora doğru olan mekanik enerji, motor-jeneratör ünitesi tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür.

Orta Seviye rejeneratif frenleme karakteristiği için yapılan hesaplamalarda:

5 dakikalık urban sürüş senaryosu sonucunda elde edilen toplam geri kazanım enerjisi yaklaşık 994,36 Wh olmuştur.

Bu değer bir saatlik sürüşe ölçeklendirildiğinde:

$$E_{Wh,hour} = 994{,}36 \,.\, 12 = 11.932{,}32\ Wh$$

Bu değer, araç frenleme anlarında motorun jeneratör modunda çalışarak elektrik enerjisi üretme kapasitesini göstermektedir. Moderate frenleme profili, hem sürüş konforunu koruyacak şekilde daha az sert yavaşlama sunmakta, hem de enerji geri kazanımını anlamlı düzeyde gerçekleştirebilmektedir.

Bu hesaplama, aynı yöntemle farklı rejeneratif frenleme karakteristikleri (örneğin aggressive veya mild) için de uygulanmıştır. Böylece farklı frenleme stratejilerinin hem enerji geri kazanım potansiyeline hem de taşıt dinamiği üzerindeki etkilerine dair kıyaslama yapılabilmiştir.

4.5. Agresif Rejeneratif Frenleme Enerji Geri Kazanımı

Bu bölümde, agresif rejeneratif frenleme stratejisinin enerji geri kazanımı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu karakteristikte, rejeneratif frenleme momenti maksimum düzeyde uygulanarak araç kinetik enerjisinin olabilecek en yüksek oranla elektrik enerjisine dönüştürülmesi hedeflenmiştir.

Hesaplama yöntemi, önceki moderate rejeneratif frenleme senaryosunda kullanılan yöntem ile aynıdır. Motor çıkış momenti ve motor devir verileri kullanılarak anlık güç hesaplanmış ve zaman üzerinden entegrasyon yoluyla enerji geri kazanımı elde edilmiştir. Yalnızca negatif moment değerleri dikkate alınmış, pozitif momentler (çekiş modları) bu değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Agresif profil için tork değeri genellikle -28 N·m seviyesinde sabitlenmiş ve RPM değerleri 2600 ile 6900 arasında değişmiştir. Bu yüksek tork seviyesi, rejeneratif frenleme sırasında sistemin maksimum enerji geri kazanım kapasitesine ulaşmasını sağlamıştır.

300 saniyelik urban sürüş senaryosu sonucunda elde edilen toplam geri kazanım enerjisi yaklaşık 1251,32 Wh olarak hesaplanmıştır. Bu değer bir saatlik sürüşe ölçeklendirildiğinde yaklaşık 15.015,84 Wh'ye ulaşmaktadır.

Bu sonuç, aggressive profilin moderate profile kıyasla yaklaşık %25 daha yüksek enerji geri kazanımı sağladığını göstermektedir. Ancak bu artış, taşıt dinamiğinde daha keskin negatif ivmeler ve daha belirgin pitch hareketleri ile sonuçlanmakta; dolayısıyla sürüş konforunu ve aracın sürüş karakteristiğini doğrudan etkilemektedir.

Sonuç olarak, aggressive rejeneratif frenleme stratejisi, enerji verimliliği açısından en yüksek performansı sunarken; bu kazanımın, taşıt dinamiği ve sürücü konforu üzerindeki potansiyel etkileri de dikkate alınmalıdır.

4.6. Rejeneratif Frenleme Profillerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Bu bölümde, orta seviye ve agresif rejeneratif frenleme profilleri enerji geri kazanımı ve taşıt dinamiği açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Enerji Geri Kazanımı Açısından Değerlendirme;

Her iki frenleme profili için uygulanan hesaplama yöntemleri, motor momenti ve açısal hız parametrelerine dayalı olarak anlık güç ve bu gücün zamana entegrasyonu yoluyla enerji geri kazanımını belirlemeye olanak sağlamıştır.

- Moderate rejeneratif frenleme senaryosu için, 300 saniyelik urban sürüş boyunca yaklaşık 994,36 Wh enerji geri kazanılmış ve bu değer bir saatlik sürüşe ölçeklendirildiğinde yaklaşık 11.932,32 Wh'ye ulaşmıştır.
- Aggressive rejeneratif frenleme senaryosunda ise aynı sürüş koşullarında yaklaşık 1251,32 Wh enerji geri kazanılmış ve bu değer bir saatlik sürüş için 15.015,84 Wh olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar, agresif frenleme profilinin moderate profile göre yaklaşık %25 daha yüksek enerji geri kazanımı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu farkın temel nedeni, aggressive profilin daha yüksek sabit rejeneratif tork uygulaması ve yavaşlama süreçlerinde daha yüksek negatif güç üretmesidir.

Enerji geri kazanımındaki artış, taşıt dinamiğinde de belirgin etkiler yaratmaktadır. Aggressive frenleme profili:

- Daha yüksek negatif boylamasına ivmelere,
- Daha belirgin pitch (eğilme) hareketlerine,
- Tekerlek yük aktarımında daha keskin öne yığılma etkisine,
- Ve artan tekerlek kayma oranlarına

sebep olmaktadır.

Bu dinamik etkiler, özellikle düşük hızlardaki ani hız değişimlerinde sürücünün konfor algısını ve aracın sürüş karakteristiğini doğrudan etkiler. Moderate profil ise daha yumuşak yavaşlama karakteristiği sunarak, geleneksel frenleme hissiyatına daha yakın bir sürüş davranışı sağlar.

Sonuçlar, rejeneratif frenleme stratejisinin enerji geri kazanımı ile taşıt dinamiği arasında bir denge unsuru olduğunu göstermektedir. Agresif profil enerji verimliliği açısından optimum sonuç sunarken, taşıt dinamiği ve sürüş konforu açısından daha

agresif bir karakter sergilemektedir. Orta seviye profil ise daha düşük enerji geri kazanımı sağlamakla birlikte, sürüş konforunu ve geleneksel sürüş hissiyatını daha iyi korumaktadır.

Bu bağlamda, araç üreticileri ve kontrol sistemi geliştiricileri, kullanıcı beklentilerine, aracın kullanım amacına ve sürüş koşullarına göre bu parametreleri optimize etmek durumundadır.

Kentsel sürüş koşullarında, özellikle kavşak manevraları sırasında sürücüler hızlarını düşürerek viraja güvenli bir şekilde girmeyi amaçlar. Bu yavaşlama süreci, rejeneratif frenleme sisteminin devreye girmesiyle birlikte taşıt dinamiği ve enerji yönetimi açısından önemli bir etki yaratmaktadır. Bu bağlamda, kavşak manevrası esnasında gerçekleştirilen yavaşlama ve takip eden direksiyon manevrası; boylamasına ivme, aks yük aktarımı, tekerlek kayma oranları ve gövde eğim hareketleri üzerinde belirgin değişimlere neden olur. Aynı zamanda, frenleme süreci boyunca aracın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya aktarılması, rejeneratif sistemin enerji geri kazanım potansiyelini maksimize etmektedir. Bu çalışmada, farklı rejeneratif frenleme seviyeleri altında kavşak yavaşlama ve viraj alma manevralarının taşıt dinamiği ve enerji geri kazanımı üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir.

4.7. Tam Frenleme Analizi

Bu analiz kapsamında gerçekleştirilen farklı frenleme stratejilerinin değerlendirilmesi amacıyla, ilgili sürüş senaryoları ADAMS/Car Event Builder arayüzü kullanılarak tanımlanmıştır. Her bir senaryoda, hızlanma, yavaşlama ve duruş fazlarını içeren sürüş profilleri, belirli zaman aralıklarında uygulanan throttle ve brake girdileri üzerinden oluşturulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde, sistemin dinamik tepkileri kontrol edilebilir koşullar altında gözlemlenmiş ve rejeneratif frenleme davranışının farklı sürüş modları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu kapsamda tanımlanan sürüş senaryo haritaları, Şekil 4.18, 4.19, 4.20'de gösterildiği üzere rejeneratif frenleme, mekanik frenleme ve kombinasyonel frenleme durumlarını

temsil etmektedir.

(DATA)

{ time	steering	throttle	brake	gear	clutch }
0.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
1.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
2.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
3.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
4.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
5.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
6.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
7.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
8.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
9.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
10.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
11.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
12.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
13.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
14.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
15.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
16.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
17.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
18.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
19.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
20.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
21.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.4000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
22.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
23.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
24.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
25.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
26.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
27.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
28.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
29.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
30.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00

Şekil 4.18. Fren Pedalı ile Frenleme

(DATA)

{ time	steering	throttle	brake	gear	clutch }
0.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
1.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
2.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
3.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
4.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
5.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
6.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
7.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
8.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
9.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
10.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
11.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
12.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
13.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
14.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
15.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
16.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
17.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
18.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
19.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
20.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
21.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
22.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
23.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
24.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
25.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
26.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
27.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
28.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
29.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
30.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00

Şekil 4.19. Rejeneratif Frenleme ve Fren Pedalı Desteği

(DATA)

{ time	steering	throttle	brake	gear	clutch }
0.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
1.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
2.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
3.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
4.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
5.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
6.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
7.0000E+00	0.0000E+00	0.2000E+02	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
8.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
9.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
10.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
11.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
12.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
13.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
14.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
15.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
16.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
17.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
18.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
19.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
20.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
21.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
22.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
23.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
24.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
25.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
26.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
27.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
28.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
29.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
30.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00

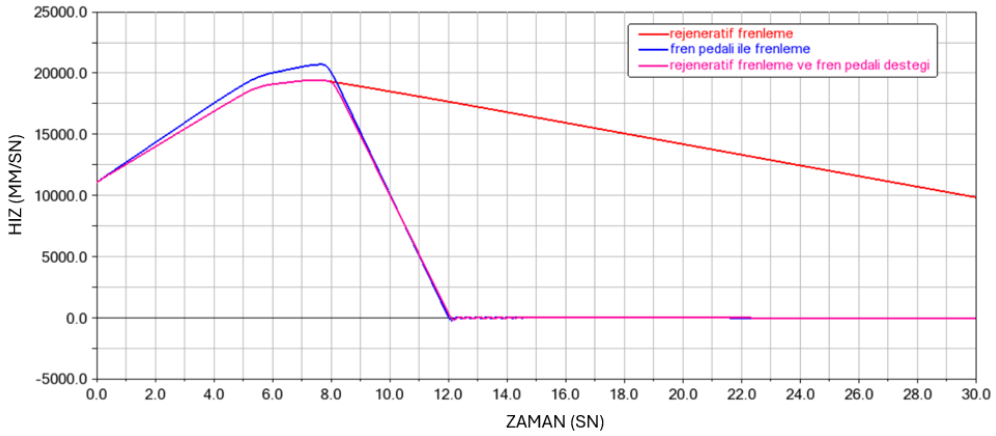
Şekil 4.20. Rejeneratif Frenleme

Bu bölümde, 40 km/h hızla ilerleyen bir aracın farklı frenleme stratejileri altında yavaşlama davranışı incelenmiştir. Simülasyon senaryosunda araç, ilk olarak 5 saniye boyunca %50 gaz pedalı girişi girişi, ardından 2 saniye boyunca %20 gaz pedalı girişi uygulamış, sonrasında gaz pedalı tamamen bırakılmıştır. Bu noktadan itibaren üç farklı durum değerlendirilmiştir:

1. Geleneksel Frenleme: Rejeneratif sistem devre dışı bırakılarak, yalnızca mekanik fren sistemiyle tam duruş gerçekleştirilmiştir.

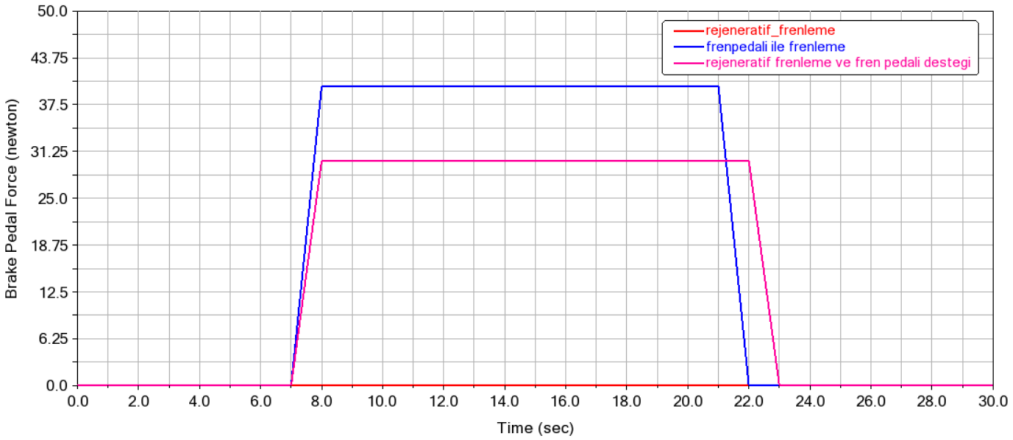
2. Yalnızca Rejeneratif Frenleme: Fren pedalı girişi olmadan, elektrik motorunun jeneratör modunda ürettiği ters tork aracılığıyla yavaşlama sağlanmıştır

3. Rejeneratif Frenleme + Fren Pedalı Desteği: Rejeneratif sistemin yetersiz kaldığı düşük hız aralığında ilave mekanik frenleme uygulanmıştır.



Şekil 4.21. Hız-Zaman Grafiği

Şekil 4.21'de hız-zaman eğrileri incelendiğinde, rejeneratif frenlemenin ilk etapta güçlü bir yavaşlama etkisi sağladığı ancak düşük hız bölgesinde tam duruş gerçekleştiremediği görülmektedir. Bu durum, elektrik motorunun düşük hızlarda akım üretim kapasitesinin azalmasıyla ilişkilidir. Fren pedalı desteği eklendiğinde, sistem enerji geri kazanımını korurken tam duruş süresi önemli ölçüde azalmıştır. Geleneksel frenleme durumunda, %40 pedal kuvvetiyle yaklaşık 4 saniyede duruş sağlanırken; rejeneratif frenleme destekli durumda bu süre benzer frenleme ivmesiyle %30 pedal kuvvetiyle elde edilmiştir.



Şekil 4.22. Fren Pedalı Kuvveti - Zaman Grafiği

Şekil 4.22'deki fren kuvveti grafiği, hibrit frenleme yaklaşımında sürücü konforu açısından önemli bir avantaj sunulduğunu göstermektedir. Daha düşük pedal kuvveti gereksinimi hem kas yorgunluğunu azaltmakta hem de pedal tepkisinin daha yumuşak

hissedilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, mekanik fren elemanlarının daha az aktif olması disk ve balata aşınmasını azaltmakta, bakım aralıklarını uzatmakta ve sistemin toplam verimliliğini artırmaktadır. Bununla birlikte, yalnızca rejeneratif frenleme senaryosunda tam duruş süresinin uzadığı görülmekte, bu da özellikle düşük hızlı şehir içi kullanımda sistemin desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, yapılan analizler rejeneratif frenleme ve mekanik frenleme entegrasyonunun, hem enerji verimliliği hem de sürücü konforu açısından optimum çözüm sunduğunu göstermektedir. Tek başına rejeneratif frenleme enerji geri kazanımı açısından avantaj sağlasa da, fren pedalı desteği ile birlikte kullanıldığında daha dengeli bir yavaşlama profili elde edilmekte ve taşıt dinamiği daha kararlı bir hâl almaktadır.

4.7.1. Düşük Hızlarda Tam Frenleme Analizi

Bir önceki analizde 40 km/h hızda gerçekleştirilen tam frenleme senaryosu değerlendirilmiş ve farklı frenleme stratejilerinin taşıt dinamiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bölümde ise, daha düşük hız aralığında aynı sürüş profili tekrarlanarak hız parametresinin rejeneratif frenleme performansına olan etkisi analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, düşük hız koşullarında rejeneratif frenleme sisteminin etkinliğini, mekanik fren desteği gereksinimini ve duruş süresine olan etkisini belirlemektir.

Bu senaryoda, taşıtın hız profili daha düşük bir maksimum değerle sınırlanmış, throttle girişleri önceki analizle benzer şekilde kurgulanmıştır. Böylece sistem tepkilerinin yalnızca hız parametresine bağlı olarak nasıl değiştiği gözlemlenebilmiştir.

20 km/h başlangıç hızına sahip bir araç için benzer bir çalışma planlanmış ve daha düşük hızlarda aynı sürüş davranışı incelenmiştir. Bu analiz, rejeneratif frenleme sisteminin düşük hız koşullarında etkinliğini değerlendirmek ve geleneksel frenleme sistemi ile karşılaştırmalı olarak dinamik tepki farklılıklarını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda oluşturulan sürüş senaryo haritası, geleneksel frenleme stratejisine sahip bir aracın hızlanma ve yavaşlama karakteristiklerini temsil etmektedir.

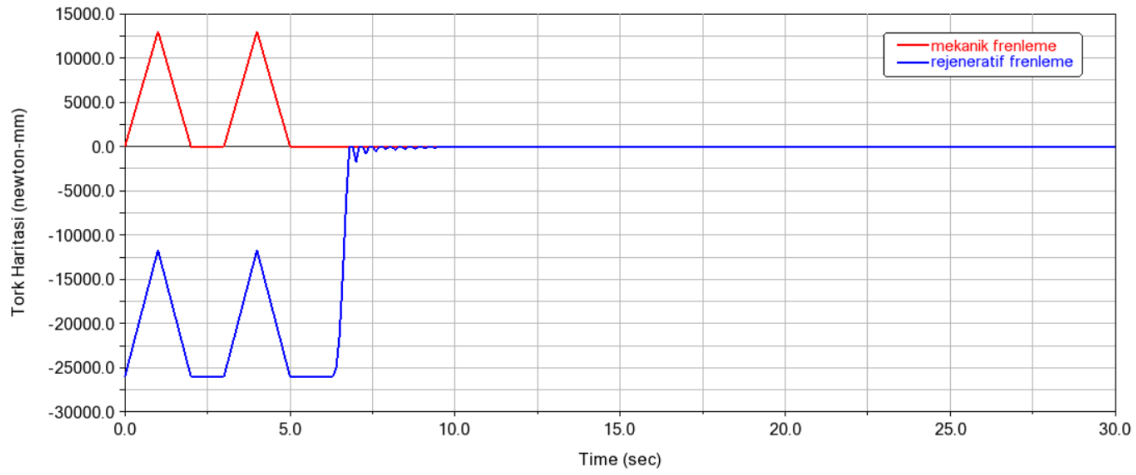
(DATA)

{ time	steering	throttle	brake	gear	clutch }
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
1.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+01	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
2.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
3.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
4.0000E+00	0.0000E+00	0.5000E+01	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
5.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000E+01	0.0000E+00
6.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
7.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
8.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
9.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
10.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
11.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
12.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
13.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
14.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
15.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00
16.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.3000E+02	0.1000E+01	0.0000E+00

Şekil 4.23. Düşük Hızlar için Fren Pedalı Girdisi ile Sürüş Senaryosu

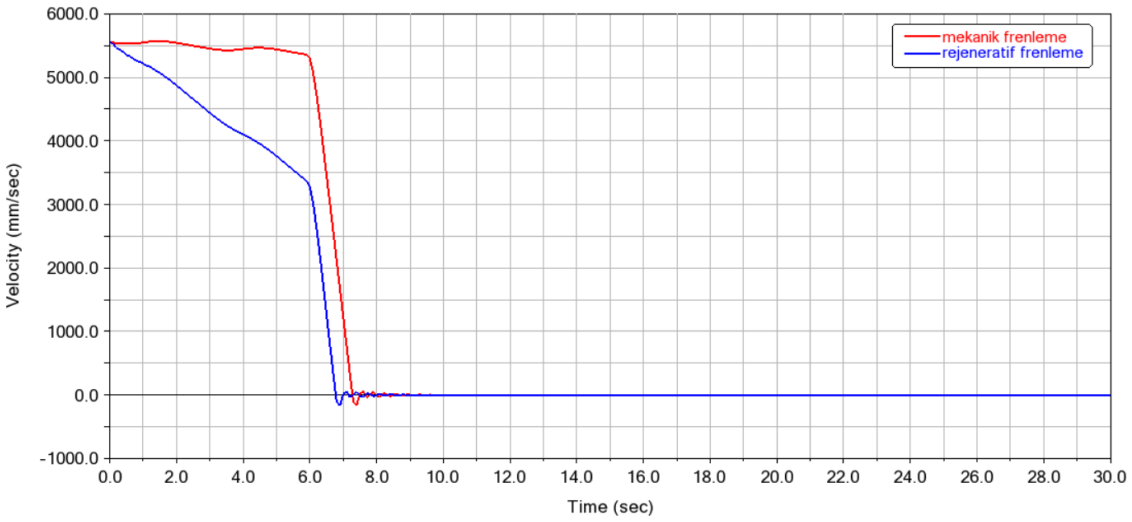
Şekil 4.23'te tanımlanan sürüş senaryosunda araç, hızını korumak amacıyla 1–2 saniyelik aralıklarla gaz pedalına kısa süreli girdi uygulamakta, ardından 5. saniyeden itibaren yaklaşık %30'luk bir fren pedalı girdisi ile yavaşlama sürecine geçmektedir. Bu senaryo, gerçek sürüş koşullarında düşük hız aralıklarında görülen tipik durma davranışını temsil etmektedir ve bu sayede frenleme stratejisinin enerji geri kazanımı, durma mesafesi ve pedal kuvveti üzerindeki etkilerinin incelenmesine olanak tanımaktadır.

Aynı sürüş senaryosu, bu kez rejeneratif frenleme stratejisine sahip bir araç için uygulanmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, düşük hız koşullarında rejeneratif frenleme sisteminin dinamik tepkisini ve frenleme performansını inceleyerek, geleneksel frenleme sistemi ile olan farkları ortaya koymaktır.



Şekil 4.24. Tam Frenleme Analizi Tork Haritası

Bu senaryo, özellikle düşük hız bölgelerinde rejeneratif sistemin verimliliğini değerlendirmek açısından önemlidir; zira bu hız aralıklarında motor devrinin düşük olması, jeneratör modunda üretilen geri kazanım torkunu sınırlamaktadır. Dolayısıyla analiz, rejeneratif frenlemenin düşük hızlarda tam duruş kabiliyetini ne ölçüde destekleyebildiğini ve mekanik fren desteğine olan ihtiyaç düzeyini belirlemeye yönelik olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.25. Tam Frenleme Analizi Hız Zaman Grafiği

Bu çalışmada uygulanan sürüş haritası, önceki analizde kullanılan senaryonun birebir aynısıdır. Ancak burada dikkat çeken temel fark, rejeneratif frenleme stratejisinin aracın hızlanma ve yavaşlama davranışlarını düşük hızlarda belirgin biçimde

değiştirmesidir. Geleneksel mekanik frenleme durumunda aynı throttle girdileri, aracın hızını sabit tutmak için yeterli olurken; rejeneratif frenleme aktif olduğunda motorun jeneratör moduna geçmesiyle oluşan ters tork, aracın doğal olarak yavaşlamasına neden olmaktadır. Bu durumda, sürücünün aynı hız seviyesini koruyabilmesi için daha fazla veya daha sık throttle girişi uygulaması gerekmektedir.

Bu bulgu, geleneksel frenleme sistemlerinden rejeneratif frenlemeye geçiş yapan sürücüler açısından sürüş hissiyatında önemli bir farklılık meydana getirmektedir. Çünkü rejeneratif sistem, pedaldan ayağın çekilmesiyle birlikte aktif bir yavaşlama davranışı sergilediğinden, sürücünün hız kontrolünü daha hassas bir şekilde pedalla yönetmesini zorunlu kılar. Dolayısıyla, bu fark sadece enerji geri kazanımı açısından değil, aynı zamanda sürücü adaptasyonu ve pedal tepkisi konforu bakımından da değerlendirilmesi gereken önemli bir tasarım parametresidir.

4.7.2. Kütle Merkezi ve Ağırlık Dağılımının OPD Davranışına Etkileri

Bu bölümde, One Pedal Driving (OPD) modunda taşıtın dinamik davranışına etki eden kütle merkezi (COG) konumu ve ağırlık dağılımı parametrelerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Modelin dinamik stabilitesini koruyacağı varsayılan kararlı koşullarda, ön ve arka akslara etki eden dikey kuvvetler analiz edilerek aracın mevcut ağırlık dağılımı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, ilerleyen alt bölümlerde gerçekleştirilecek OPD analizlerinde referans olarak kullanılmıştır.

4.7.3. Statik Ağırlık Dağılımının Belirlenmesi

Hazırlanan araç modelinin mevcut ağırlık dağılımını belirlemek için, öncelikle modelin kararlı (stabil) davranış gösterdiği bir analiz koşturulmuştur. Kararlı rejimde, süspansiyon salınımlarının sönümlendiği ve ivme ile pitch değişimlerinin ihmal edilebilir düzeye indiği zaman aralığı seçilmiştir. Bu aralıkta elde edilen tekerlek dikey kuvvetleri kullanılarak aks yükleri hesaplanmıştır.

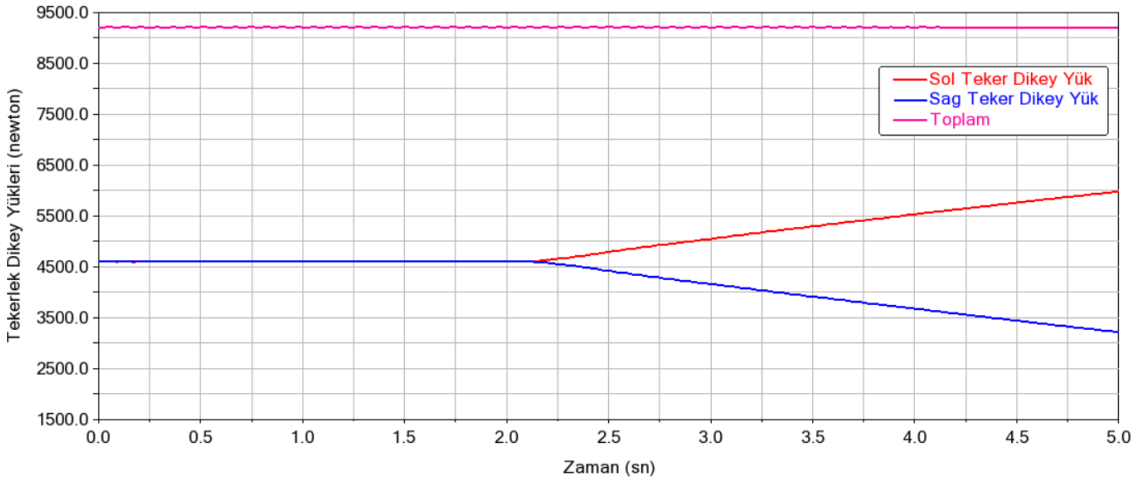
Ön aks yükü, ön sağ ve ön sol tekerlek dikey kuvvetlerinin (Fz_FL ve Fz_FR)

toplamından elde edilmiştir. Benzer şekilde arka aks yükü, arka sağ ve arka sol tekerlek dikey kuvvetlerinin (Fz_RL ve Fz_RR) toplamı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen kuvvetler Newton cinsindedir; kütle eşdeğerinin hesaplanabilmesi için 9.81 m/s² yerçekimi ivmesine bölünerek kilogram cinsine dönüştürülmüştür. Alternatif olarak, toplam araç ağırlığı biliniyorsa arka aks yükü, toplam ağırlıktan ön aks yükü çıkarılarak da elde edilebilir.

Ağırlık dağılımı aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır:

$$
\begin{aligned}
W_{\text{front}} &= F_{z,\text{FL}} + F_{z,\text{FR}} \\
W_{\text{rear}} &= F_{z,\text{RL}} + F_{z,\text{RR}} \\
m_{\text{front}} &= \frac{W_{\text{front}}}{g}, m_{\text{rear}} = \frac{W_{\text{rear}}}{g} \\
\%\text{Front} &= 100 \times \frac{W_{\text{front}}}{W_{\text{tot}}}, \%\text{Rear} = 100 \times \frac{W_{\text{rear}}}{W_{\text{tot}}}
\end{aligned}
$$

Burada g=9.81m⁄s^2 olarak alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen statik ön ve arka aks yükleri, modelin ağırlık dağılımını ifade etmektedir. Bu değerler, OPD modundaki dinamik yük transferi analizlerinde referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.26. Tekerlek Dikey Yük Zaman Grafiği

Hazırlanan araç modeline ait ön aks üzerindeki sol ve sağ tekerleklerin dikey yük değişimleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Analiz başlangıcında (0–2 s aralığı) araç kararlı durumda olup, her iki tekerlek üzerindeki dikey yük yaklaşık 4600 N seviyesindedir.

Bu değerlerin toplamı yaklaşık 9200 N olup, bu durum ön aksa etkiyen toplam dikey yükü göstermektedir.

2. saniyeden itibaren uygulanan manevra ile aracın ağırlık merkezi üzerinde dinamik bir yük transferi meydana gelmiş ve sol teker üzerindeki dikey yük artarken sağ teker üzerindeki dikey yük azalmıştır. Buna karşın, toplam aks yükü (pembe eğri) analiz süresince sabit kalmıştır. Bu durum, aracın toplam ağırlığının korunarak sadece yük dağılımının tekerlekler arasında yeniden paylaşıldığını göstermektedir.

Elde edilen bu sonuçlara göre, modelin kararlı durumda ön aksına etkiyen toplam dikey yük 9200 N olarak belirlenmiştir. Yerçekimi ivmesi g=9.81 m/s^2 dikkate alındığında, bu değer yaklaşık 937 kg'lık bir ön aks yüküne karşılık gelmektedir. Bu büyüklük, aracın statik ağırlık dağılımının belirlenmesinde ve ilerleyen bölümlerde değerlendirilen OPD davranışlarının yorumlanmasında referans olarak kullanılmıştır.
Araç modelinin toplam kütlesi, ADAMS/Car ortamında yer alan kütle hesaplama aracı kullanılarak belirlenmiştir. Bunun için, menü üzerinden Tools → Aggregate Mass komutu seçilmiş ve referans noktası olarak gövdeden handling_measure.cm belirlenmiştir. Bu yöntemle, taşıtın şasi, süspansiyon, aktarma organları ve gövde unsurlarını içeren tüm bileşenlerinin toplam kütlesi ve kütle merkezinin konumu otomatik olarak hesaplanmaktadır.

Elde edilen toplam kütle değeri, daha önce tekerlek dikey kuvvetlerinden hesaplanan ön aks yüküyle birlikte değerlendirilerek aracın statik ön–arka ağırlık dağılımı yüzdesi belirlenmiştir. Bu dağılım, OPD analizlerinde referans değer olarak kullanılmış ve kütle merkezi konumunun taşıt dinamiği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde temel parametrelerden biri olarak dikkate alınmıştır.

Araç modeline ait toplam kütle ve kütle merkezi bilgileri, ADAMS/Car yazılımı içerisinde yer alan kütle hesaplama aracı kullanılarak elde edilmiştir. Bunun için Tools menüsünden Aggregate Mass komutu seçilmiş ve referans noktası olarak handling_measure.cm belirlenmiştir. Bu komut sonucunda yazılım, modelde tanımlı tüm bileşenlerin kütlesini toplayarak toplam taşıt kütlesini, kütle merkezinin

konumunu ve atalet tensörünü hesaplamaktadır.

Analiz sonucunda aracın toplam kütlesi 1740.92 kg olarak belirlenmiştir. Kütle merkezinin koordinat sistemi içerisinde (0, 0, 0) konumunda yer aldığı, dolayısıyla modelin referans düzlemine göre dengeli bir kütle dağılımına sahip olduğu görülmektedir.

Elde edilen bu toplam kütle değeri, tekerlek dikey yüklerinden hesaplanan ön aks yükü ile birlikte değerlendirilmiş ve aracın statik ağırlık dağılımı oranlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Buna göre, toplam taşıt kütlesi 1740.92 kg ve ön aks yükü 9200 N (yaklaşık 937 kg) olarak dikkate alındığında, aracın statik ön ağırlık oranı yaklaşık % 53,8; arka ağırlık oranı ise %46,2 olarak bulunmuştur. Bu oranlar, kütle merkezi konumunun OPD karakteristiği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde temel referans olarak kullanılmıştır.

- Toplam kütle: 1740.92 kg
- Ön aks yükü: 9200 N → yaklaşık 937 kg
- Ağırlık dağılımı: %53.8 ön – %46.2 arka

Aracın statik ağırlık dağılımı yaklaşık olarak yüzde 53,8 ön ve yüzde 46,2 arka olacak şekilde belirlenmiştir. Bu oran, aracın kütle merkezinin dingil mesafesi üzerinde ön aksa daha yakın konumlandığını göstermektedir. Ağırlığın ön aks üzerinde fazla olması, hem lastik dikey yüklerinin hem de bu tekerleklerdeki temas kuvvetlerinin artmasına neden olur. Bu durum, taşıtın frenleme ve yönlendirme anlarında ön lastiklerin daha fazla yük altında çalışmasına yol açar.

4.7.4. Ön–Arka Aks Ağırlık Dağılımının OPD Davranışına Etkisi

Bu çalışmada, One Pedal Driving (OPD) modunda taşıtın yavaşlama davranışı üzerinde statik ön–arka ağırlık dağılımının etkisi incelenmiştir. Analiz kapsamında, aracın ağırlık merkezi boyuna yönde (X ekseni boyunca) farklı konumlara taşınarak üç ayrı kütle dağılımı durumu oluşturulmuştur. Bu durumlar; ön aksın daha fazla yük taşıdığı, iki aksa eşit yükün dağıldığı ve arka aksın daha fazla yük taşıdığı konfigürasyonlardır. Ağırlık

merkezi konumları ADAMS/Car ortamında sprung kütle merkezi koordinatlarının ayarlanması yoluyla tanımlanmış ve her durumda toplam kütle, süspansiyon, lastik özellikleri ile OPD pedalı yavaşlama haritası sabit tutulmuştur.

Simülasyonlarda, aracın sabit hızla ilerlediği bir başlangıç durumu tanımlanmış; 2 saniye süreyle düşük seviyede throttle girdisi uygulanmış, ardından gaz pedalı tamamen bırakılmıştır. Böylece OPD sisteminin rejeneratif frenleme devreye girdiği andan itibaren taşıtın doğal yavaşlama tepkisi gözlemlenmiştir. Analizler, tüm varyasyonlarda aynı çevre koşulları altında 30 km/s başlangıç hızı ve 40 saniyelik toplam süre ile yürütülmüştür.

4.7.5. Understeer Karakteristiğinin One Pedal Driving (OPD) Davranışına Etkisi

Bu alt bölüm, taşıtın doğal yönlendirme eğiliminin (understeer/oversteer karakteristiği) OPD modundaki dinamik davranış üzerine olan etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Statik ağırlık dağılımı ön aks lehine olan araçlar, yüksek rejeneratif frenleme momentinin de ön tekerlekler üzerinden uygulanması nedeniyle OPD sırasında daha belirgin bir yönlendirme yetersizliği gösterebilir. Bu durum, hem aracın yavaşlama sürecinde hem de viraj içi kararlılığında kendini hissettirir.

One Pedal Driving (OPD) modunda rejeneratif frenleme genellikle ön aks üzerinden gerçekleştirildiğinden, bu kütle dağılımı ön lastiklerin hem yavaşlatma hem de yönlendirme görevini aynı anda yerine getirmesini gerektirir. Ön aksın bu çift fonksiyonlu yüklenmesi, yüksek yavaşlama seviyelerinde ön lastiklerdeki kayma oranının artmasına ve direksiyon tepkisinin gecikmesine neden olabilir. Sonuç olarak, taşıtın dönme eğilimi azalır ve sistem understeer karakteristiği gösterir
Ağırlık merkezi ön tarafa kaydıkça, taşıtın viraj içi denge momenti artar; ancak viraj boyunca dengeyi koruma eğilimi de kuvvetlenir. Bu nedenle, söz konusu kütle dağılımı yüksek stabilite düşük çeviklik dengesini temsil eder. Bu yapı, sürücü güvenliği açısından avantajlı olmakla birlikte, düşük hızlarda ve dar dönüşlerde yönlendirme kabiliyetinin azalmasına neden olabilir.

Sonuç olarak, bu araç konfigürasyonu itibarıyla doğal olarak understeer eğilimli bir dinamik davranış sergilemektedir. OPD koşullarında, rejeneratif fren torkunun ön aksa uygulanması bu eğilimi daha da belirginleştirebilir. Bu nedenle, ilerleyen analizlerde arka aks yük dağılımının veya rejeneratif tork paylaşımının optimize edilmesi, sistemin yönlendirme kararlılığını iyileştirebilecek bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Amaç burada, OPD koşullarında rejeneratif frenleme torku, ağırlık transferi ve direksiyon tepkisi arasındaki etkileşimi analiz etmek; böylece sürüş konforu, enerji geri kazanımı ve taşıt kararlılığı arasındaki dengeyi ortaya koymaktır.

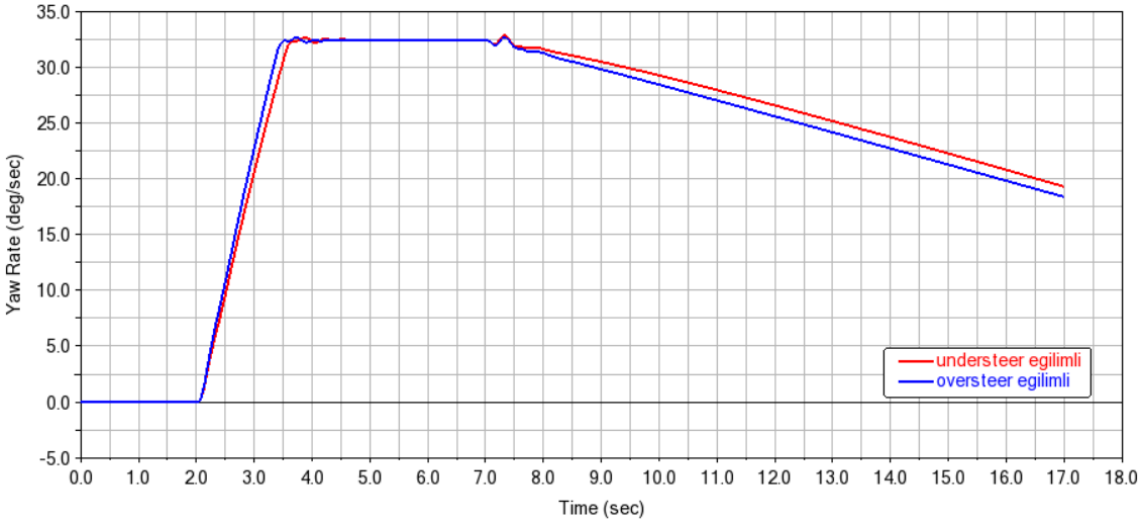
4.7.6. Viraj Anında Gücü Kesme Testi ile OPD Davranışının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, One Pedal Driving (OPD) modunda viraj içi güç kesme (power-off cornering) koşullarında taşıtın kararlılık davranışı incelenmiştir. OPD sistemi, gaz pedalı bırakıldığında sürücü komutu olmaksızın rejeneratif frenleme uygulayarak aracı yavaşlatır. Bu durum, geleneksel içten yanmalı araçlardaki "motor freni" etkisine benzer şekilde, boyuna yük transferine ve yaw momentinin yeniden dağılımına neden olur.
Bu analiz, OPD modunun viraj içinde güç kesildiği (pedal bırakıldığı) anda aracın dönme kararlılığına, yaw rate tepkisine ve aks yük dağılımına nasıl etki ettiğini anlamayı amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında iki farklı taşıt karakteristiği değerlendirilmiştir:

- Understeer eğilimli (ön ağırlıklı) araç
- Oversteer eğilimli (arka ağırlıklı) araç

Her iki durumda da süspansiyon, lastik modeli, yol koşulu ve OPD pedal haritası sabit tutulmuştur. Böylece gözlenen farklar yalnızca statik ağırlık dağılımının OPD etkisini nasıl şekillendirdiğini göstermektedir.



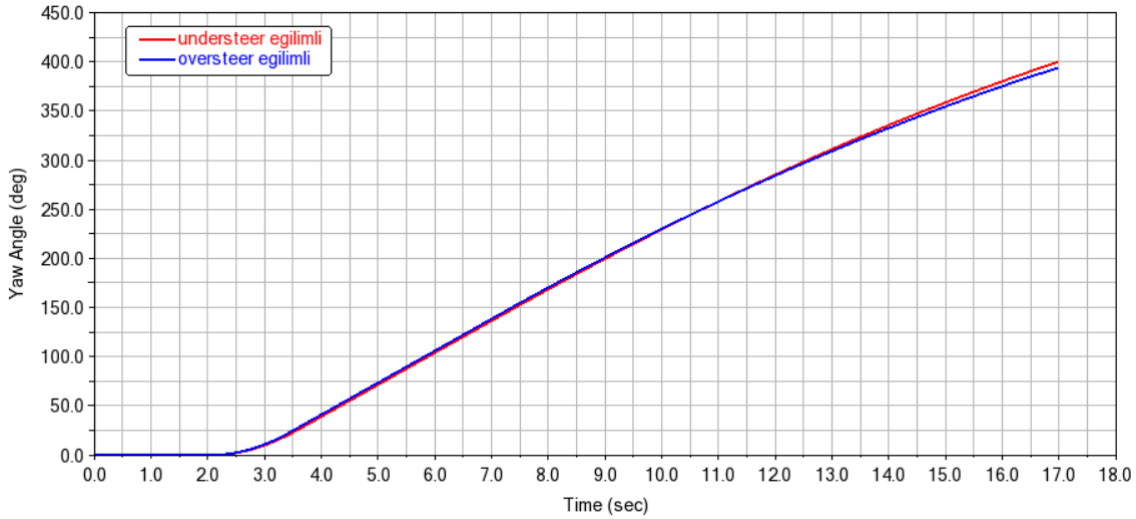
Şekil 4.27. Yaw Rate Grafiği

Şekil 4.27'dE, her iki konfigürasyon için yaw rate'in (r) zamanla değişimi verilmiştir. Araçlar 3. saniyeden itibaren viraj girişine başlamış, yaklaşık 4. saniyede kararlı dönme hızı değerine ulaşmıştır. OPD'nin devreye girdiği 7. saniye civarında, hem understeer hem de oversteer eğilimli araçlarda belirgin bir yavaşlama eğilimi görülmektedir.
t ≈ 2.5–3 s civarında araç viraj hareketine geçiyor, 3–4 s civarında kararlı yaw rate değerine ulaşıyor.

OPD'nin devreye girdiği anda (yaklaşık t ≈ 7 s civarı) şu durum gözleniyor:

- Understeer eğilimli araçta (kırmızı): yaw rate hafif şekilde azalıyor, yani dönme hızı düşüyor.
- Oversteer eğilimli araçta (mavi): yaw rate düşüşü daha ani, eğim daha yüksek.

Bu da OPD sırasında ön aksın rejeneratif frenlemeden ötürü daha fazla yüke maruz kaldığını, oversteer araçta ise arka aksın hafiflemesiyle dönme momentinin ani azaldığını gösteriyor.



Şekil 4.28. Yaw Açısı Grafiği

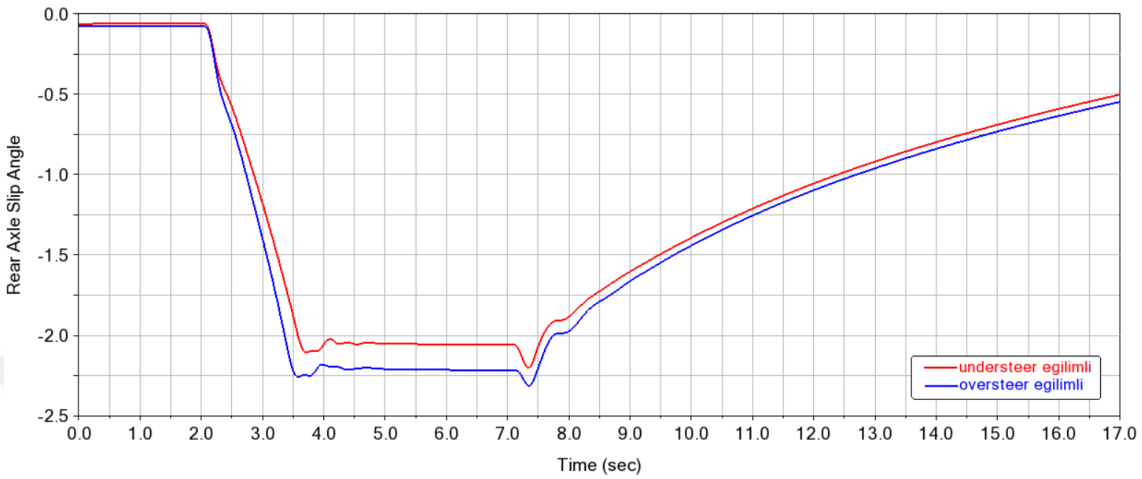
Bu grafik, OPD modunda gerçekleştirilen viraj içi manevrada taşıtın yaw açısının zamanla değişimini göstermektedir. Her iki taşıt konfigürasyonu da yaklaşık 3. saniyeden itibaren dönme hareketine başlamakta ve 17. saniye sonunda 400° civarında toplam yaw açısına ulaşmaktadır.

Understeer eğilimli araçta (kırmızı eğri), yaw açısının zamana göre değişim hızı kademeli olarak azalmaktadır. Bu durum, OPD devreye girdikten sonra (yaklaşık 7. saniye) ön aks üzerindeki rejeneratif frenlemenin, aracın dönme eğilimini sınırlandırdığını göstermektedir. Oversteer eğilimli araçta (mavi eğri) ise yaw açısı benzer büyüklükte artmasına karşın, eğri daha doğrusal seyretmekte ve OPD sonrası dönme azalma eğilimi daha belirgin değildir.

Grafik genel olarak, OPD'nin understeer eğilimli araçta dönme kararlılığını artırıcı, oversteer eğilimli araçta ise daha serbest bir dönme dinamiği yarattığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, statik ağırlık dağılımının OPD etkisinin yönünü belirleyen temel parametre olduğunu doğrulamaktadır.

Grafik genel olarak düzgün bir dönme hareketini gösteriyor. Understeer eğilimli araç (kırmızı) oversteer eğilimliye (mavi) göre biraz daha yüksek toplam yaw açısına ulaşıyor. Bu, ilk bakışta ters gibi görünebilir; fakat burada fark çok küçük (~5° civarında) ve t_0

anındaki dinamik tepkiden ziyade uzun vadeli dönme hızı farkının birikimi. Farklılık küçük olduğu için OPD etkisinin "genel yön değiştirme miktarına" değil, geçici dönme kararlılığına yansıdığı anlaşılıyor.



Şekil 4.29. Ön Aks Slip Açısının Zamanla Değişimi

Şekil 4.29, OPD modunda gerçekleştirilen viraj manevrası sırasında ön aks slip açısının zamanla değişimini göstermektedir.

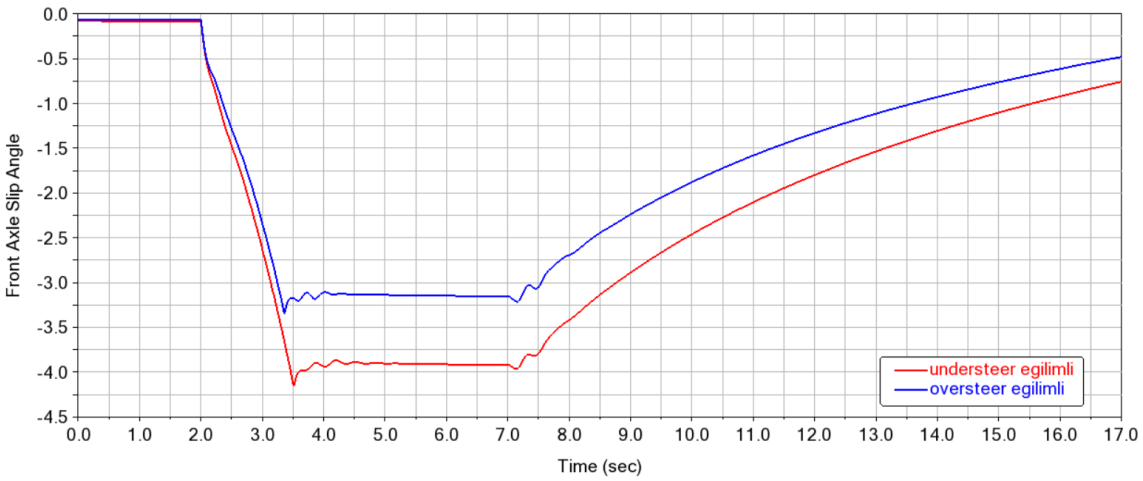
0–2,5 s aralığında her iki konfigürasyon da sabit hızla ilerlemekte ve slip açısı sıfıra yakın değerlerde seyretmektedir. 2,5 s sonrasında taşıt viraja girmekte, bu esnada ön tekerler yönlendirme momentiyle birlikte yanal kuvvet üretmeye başlamakta ve slip açısı hızla artmaktadır. Understeer eğilimli araçta (kırmızı eğri), viraj girişinde slip açısı daha büyük değerlere ulaşmaktadır (yaklaşık −4° civarı). Bu durum, ön aksın yanal yükleme oranının yüksek olmasından ve ön lastiklerin daha fazla yönlendirme kuvveti üretmesinden kaynaklanmaktadır. Oversteer eğilimli araçta (mavi eğri) ise aynı koşulda kayma açısı daha düşüktür (yaklaşık −3°), çünkü bu konfigürasyonda arka aksa daha fazla yük düşmekte, ön lastiklerin yönlendirme kapasitesi bir miktar azalmaktadır.

Yaklaşık 7. saniye civarında OPD sistemi devreye girmekte ve ön aksa rejeneratif fren momenti uygulanmaktadır. Bu anda ön lastikler hem yanal hem de boyuna kuvvet taşımaya başlar; bu da toplam tutunma limitinin yeniden dağılmasına yol açar.

Grafikte bu etki, her iki konfigürasyonda da slip açısının azalması olarak görülmektedir. Ancak azalma miktarı understeer eğilimli araçta daha sınırlıdır; çünkü bu araçta ön aks zaten daha yüklü olduğu için ek fren momenti, lastiğin çalışma noktasını kararlılık sınırının dışına taşımamıştır.

Oversteer eğilimli araçta ise ön aks yükündeki ani artış slip açısında daha hızlı bir azalmaya yol açmıştır. Bu durum, OPD'nin devreye girmesiyle birlikte ön aksın yanal kuvvet üretiminde geçici bir azalma meydana geldiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, OPD frenlemesinin ön aks slip açısını dengeleyici yönde etkilediği, ancak bu etkinin büyüklüğünün aracın ağırlık dağılımına bağlı olduğu görülmüştür. Understeer konfigürasyonda OPD, aracın kararlılığını artırıcı; oversteer konfigürasyonda ise kısmen dengesizleştirici bir davranış sergilemiştir.



Şekil 4.30. Arka Aks Kayma Açısının Zamanla Değişimi

Şekil 4.29'da, aynı manevra koşulları altında arka aks kayma açısının zamanla değişimi verilmiştir. Viraj girişinde (2,5–3,0 s) her iki araçta da slip açısı hızla artmakta ve −2° civarında kararlı hale gelmektedir. Understeer eğilimli araçta (kırmızı eğri) bu değer −1,8° civarında kalırken, oversteer eğilimli araçta (mavi eğri) kayma açısı −2,1°'ye kadar ulaşmaktadır. Bu fark, arka aksın statik yük oranının fazla olduğu oversteer araçta lastiklerin daha yüksek yanal kayma oranı ile çalıştığını göstermektedir.

Yaklaşık 7. saniyede OPD devreye girdikten sonra her iki araçta da kayma açısı eğrileri yukarı yönlü bir toparlanma göstermektedir. Bu toparlanma, rejeneratif frenleme nedeniyle ön aksa yük transferi oluştuğunda arka aksın yükünün azalması ve buna bağlı olarak arka lastiklerin kayma oranının düşmesi ile açıklanabilir.

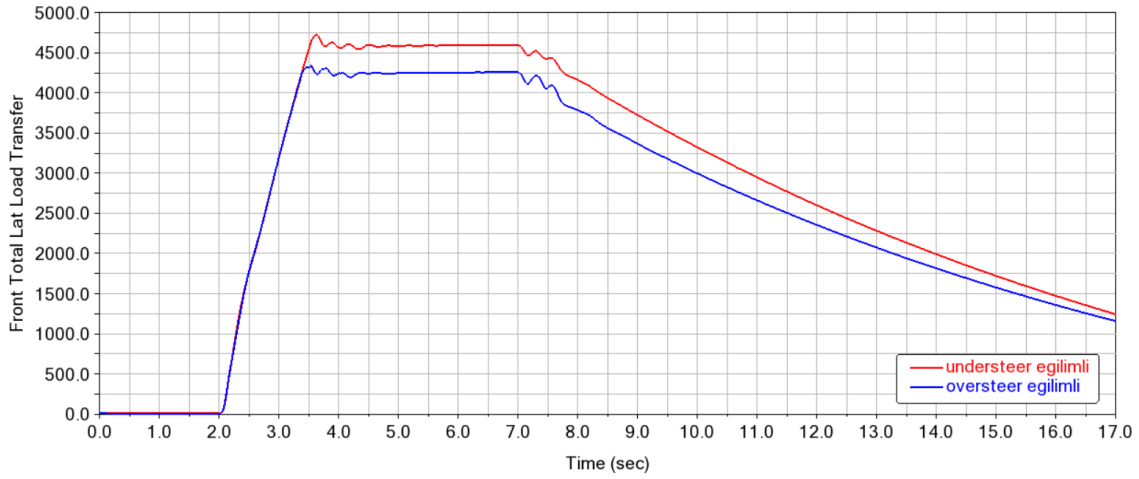
Ancak oversteer eğilimli araçta bu toparlanma daha gecikmeli ve düşük genliktedir, çünkü arka aksın yük kaybı daha fazla olup, arka lastikler kısa süreli tutunma kaybına maruz kalmaktadır. Bu durum, OPD modunda arka ağırlıklı taşıtların "lift-off" sırasında arka aks stabilitesinin azalabileceğini göstermektedir. Understeer eğilimli araçta ise OPD frenlemesi arka kayma açısında daha kararlı bir azalma sağlamış, bu da aracın genel dönme kararlılığını desteklemiştir. Genel olarak bu grafik, OPD'nin viraj içi dinamiklerde yalnızca boyuna yavaşlamayı değil, teker slip dinamiklerini de doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Rejeneratif fren momentinin yalnızca ön aksta uygulanması, arka aks yükünün azalmasına neden olmakta; bu da arka kayma açısında geçici dengesizliklere yol açabilmektedir.

Ön ve arka aks slip açıları birlikte incelendiğinde, OPD modunun frenleme anında teker yük dağılımını değiştirmesiyle birlikte akslar arası slip farkını ($\Delta\alpha = \alpha_front - \alpha_rear$) da değiştirdiği görülmektedir.

- OPD öncesinde $\Delta\alpha$ pozitif olup, araç understeer karakteristiği göstermektedir.
- OPD devreye girdikten sonra $\Delta\alpha$ azalmakta, bazı anlarda sıfıra yaklaşmakta; bu da taşıtın nötr veya hafif oversteer eğilimli hale geldiğini göstermektedir.

Bu sonuç, OPD sisteminin viraj içi rejeneratif frenleme anında taşıtın doğal yönlendirme eğilimini geçici olarak değiştirebileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, özellikle arka ağırlıklı konfigürasyonlarda OPD kontrol algoritmasının yük transferini dengeleyici önlemler içermesi (örneğin fren momenti sınırlama veya arka aks tork desteği) taşıt kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.31. Ön Aks Toplam Yanal Yük Transferinin Zamanla Değişimi

Şekil 4.30, OPD modunda gerçekleştirilen viraj manevrası sırasında ön aks üzerindeki toplam yanal yük transferinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.

0–2,0 s aralığında her iki araç da sabit hızda doğrusal olarak ilerlemekte ve yük transferi ihmal edilebilir düzeydedir. 2,0–3,0 s aralığında direksiyon girdisi uygulanmakta, bu sırada viraj girişine bağlı olarak yanal ivme hızla artmakta ve buna paralel şekilde ön aks yük transferi yükselmektedir.

Understeer eğilimli araçta (kırmızı eğri) maksimum yanal yük transferi yaklaşık 4600 N civarındadır ve bu değer oversteer eğilimli araca göre (mavi eğri, yaklaşık 4300 N) biraz daha yüksektir. Bu fark, statik olarak ön aksın daha yüksek yük oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

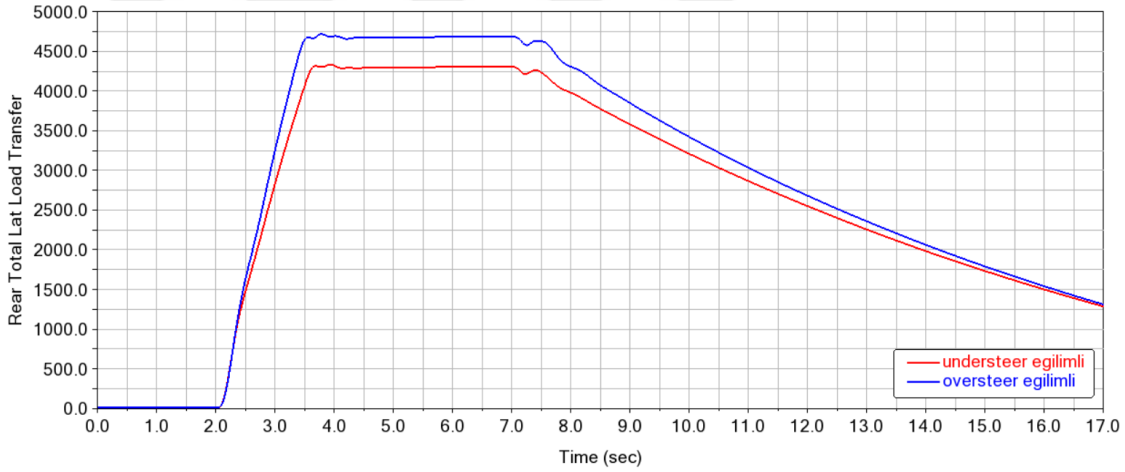
Virajın kararlı dönme fazında (3–7 s), her iki araçta da yük transferi plato bölgesinde sabit kalmaktadır. Ancak understeer eğilimli araçta bu fazda daha yüksek ve daha stabil bir yük dağılımı gözlenmektedir.

Yaklaşık 7. saniye civarında OPD sistemi devreye girdiğinde ön aks üzerine uygulanan rejeneratif fren momenti, ilave boyuna yük transferine yol açmaktadır. Bu nedenle 7. saniye sonrasında yük transfer eğrilerinde kısa süreli bir artış ve ardından azalma eğilimi

izlenmektedir. Özellikle understeer eğilimli araçta bu etki daha belirgin olup, ön aks yükü yüksek kaldığı için yanal kuvvet üretimi kararlı bir şekilde devam etmektedir.

Oversteer eğilimli araçta ise OPD devreye girdikten sonra yük transferi daha erken düşüş göstermekte, bu durum ön lastiklerin yanal kuvvet kapasitesinde kısmi azalmaya işaret etmektedir.

Bu grafik, OPD modunda fren momentinin ön aksa uygulanmasının, taşıtın statik kütle merkezi konumuna bağlı olarak yanal yük transfer dengesini değiştirdiğini göstermektedir. Ön ağırlıklı araçlarda OPD, dönme kararlılığını desteklerken; arka ağırlıklı konfigürasyonlarda ön lastiklerin yüklenmesi artmakta ve bu durum taşıtın yön kararlılığı üzerinde olumsuz etki oluşturabilmektedir.



Şekil 4.32. Arka Aks Toplam Yanal Yük Transferinin Zamanla Değişimi

Şekil 4.31'de, aynı manevra koşullarında arka aks üzerindeki toplam yanal yük transferinin değişimi görülmektedir. Viraj girişinde (2,0–3,0 s) her iki araçta da yük transferi hızla artmakta, ardından kararlı fazda sabitlenmektedir.

Oversteer eğilimli araçta (mavi eğri) maksimum yük transferi yaklaşık 4700 N seviyesine ulaşmaktadır. Understeer eğilimli araçta (kırmızı eğri) ise bu değer yaklaşık 4300 N civarındadır. Bu fark, arka ağırlıklı konfigürasyonda arka aksın hem statik hem de dinamik olarak daha fazla yük taşımasından kaynaklanmaktadır.

Yaklaşık 7. saniyede OPD'nin devreye girmesiyle birlikte ön aks fren momenti uygulanmaya başlanır ve buna bağlı olarak arka aks yükü azalmaya başlar. Grafikte bu durum, her iki eğrinin eğim değiştirdiği noktada açıkça gözlenmektedir.

Oversteer eğilimli araçta yük transferindeki azalma daha hızlı ve daha keskindir; çünkü ön aksa yönelen boyuna yük transferi arka lastiklerin tutunma kapasitesini düşürmektedir. Bu durum, OPD modunda arka ağırlıklı araçlarda viraj içi stabilitenin azalabileceğini göstermektedir. Understeer eğilimli araçta ise arka aks yük transferi daha kararlı biçimde azalmaktadır. Bu kararlılık, frenleme sırasında yükün daha dengeli dağılmasından ve ön aksın OPD momentini daha kontrollü biçimde karşılamasından kaynaklanmaktadır.

Genel olarak, bu grafik OPD'nin yalnızca frenleme yönündeki yük transferini değil, aynı zamanda yanal yük transfer dengesini de etkilediğini ortaya koymaktadır. Ön ağırlıklı (understeer eğilimli) araçlarda OPD devreye girişi viraj kararlılığını artırıcı yönde etki ederken, arka ağırlıklı (oversteer eğilimli) araçlarda aynı etki tersine dönerek arka aks yükünü azaltmakta ve aracın arka bölümünün yön kararlılığını zayıflatmaktadır.

4.7.7. Taşıt Toplam Kütlesinin OPD Davranışına Etkisi

Bu bölümde, taşıtın toplam kütlesinin One Pedal Driving (OPD) modundaki dinamik davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kütle parametresi, taşıtın hem boyuna ivmelenme kabiliyeti hem de rejeneratif frenleme sırasında oluşan enerji geri kazanımı açısından belirleyici bir unsurdur. OPD modunda gaz pedalının bırakılmasıyla devreye giren rejeneratif fren momenti, taşıtın eylemsizliğiyle doğrudan ilişkili olarak farklı tepki karakteristikleri sergiler. Bu nedenle, farklı toplam kütle değerlerine sahip modeller üzerinde OPD senaryoları uygulanarak taşıtın yavaşlama eğrisi, ivme değişimi (jerk), rejeneratif güç üretimi ve duruş mesafesi parametreleri analiz edilmiştir.

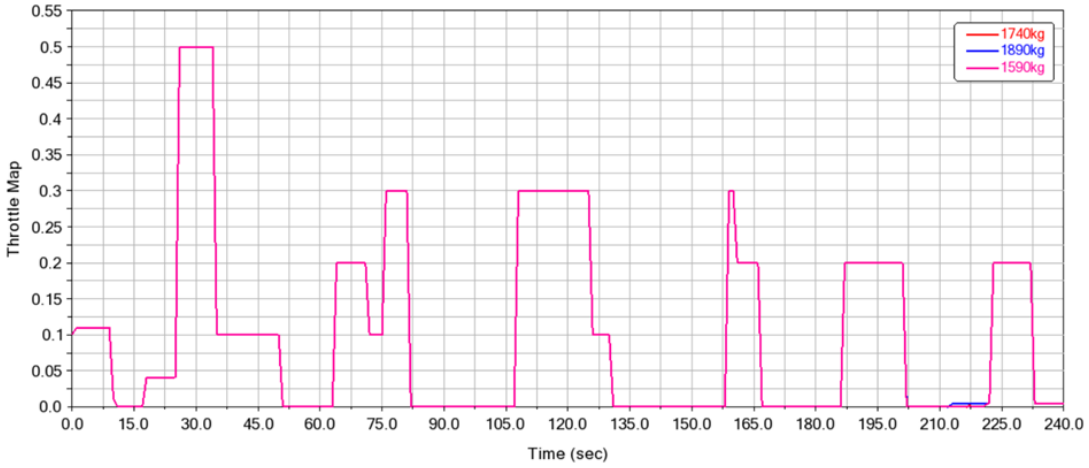
ADAMS/Car ortamında temel modelin toplam kütlesi referans alınmış, ardından taşıtın kütlesi artan ve azalan oranlarda değiştirilmiştir. Kütle varyasyonu, araç gövdesine tanımlanan ballast elemanlarıyla sağlanmış ve ağırlık merkezi konumu sabit tutulmuştur.

Böylece sadece toplam kütle artışının dinamik tepkiler üzerindeki etkisi izole edilmiştir. Tüm senaryolarda aynı OPD pedal-haritası, lastik modeli ve yol koşulları korunmuştur. Bu çalışmanın amacı, OPD sisteminin taşıt kütlesine duyarlılığını ortaya koymak, farklı kütlelerde rejeneratif frenlemenin verimlilik ve konfor üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir.

4.7.8. Urban Road Dosya Hazırlığı

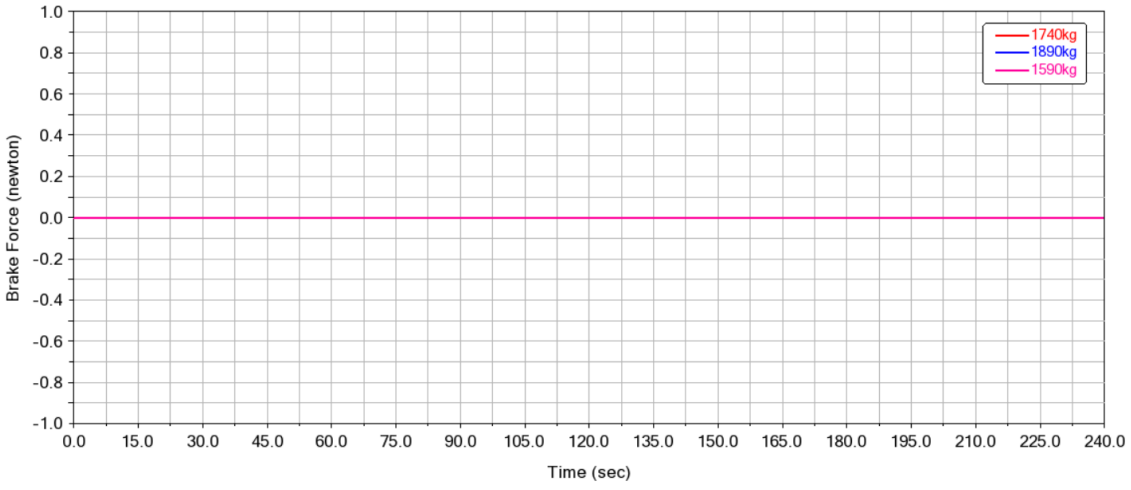
Bu çalışmanın yürütülebilmesi için öncelikle ADAMS/Car ortamında kullanılacak sürüş senaryosunun tanımlandığı Urban Road dosyası hazırlanmıştır. Hazırlanan bu sürüş haritası, aracın farklı hız bölgelerindeki dinamik tepkilerini gözlemleyebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Harita içerisinde, hem düşük hız aralıklarında meydana gelen dur-kalk ve düşük ivmelenme koşullarının, hem de daha yüksek hızlarda gerçekleşen yavaşlama ve rejeneratif frenleme davranışlarının analiz edilebilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaçla throttle girdileri, iki farklı hız koşulunu temsil edecek biçimde düzenlenmiştir. İlk bölümde araç düşük hızlarda (örneğin 0–30 km/h aralığında) hareket ederek kentsel sürüş karakteristiğini temsil ederken, ikinci bölümde orta-yüksek hız bölgesine geçilerek (örneğin 50–80 km/h) aracın rejeneratif frenleme kapasitesi ve OPD geçiş tepkisi incelenmiştir. Böylece, hem hızlanma hem de yavaşlama süreçlerinin dinamik bütünlüğü korunmuş ve OPD davranışının farklı sürüş koşullarında nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Senaryonun son bölümünde ise aracın tam duruşa geçiş davranışı incelenmiştir. Bu kısımda gaz pedalı sıfıra getirilmiş, OPD sistemi tarafından oluşturulan rejeneratif fren momenti ile taşıtın tamamen durması sağlanmıştır. Böylece, düşük hız rejeneratif frenleme verimi, duruş mesafesi ve pedal bırakma anından durma anına kadar olan geçiş süreci analiz edilmiştir. Bu bölüm, OPD sisteminin kentsel sürüş koşullarındaki konfor ve enerji geri kazanımı performansının değerlendirilmesi açısından temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.33. Gaz Pedalı Konumu (Throttle Map)

Şekil 4.32. urban road senaryosu boyunca uygulanan gaz pedalı girdilerini göstermektedir. Farklı zaman aralıklarında değişken seviyelerde throttle sinyalleri uygulanmış, ardından pedal tamamen bırakılarak rejeneratif frenleme davranışı tetiklenmiştir. Pedal profilinde 0,1 ile 0,5 aralığında değişen gaz konumları aracın farklı hız ve ivmelenme koşullarını temsil etmektedir. Tüm kütle varyasyonlarında aynı throttle profili kullanılmıştır; bu sayede farklı kütlelerin OPD geçişlerine verdiği tepki doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.



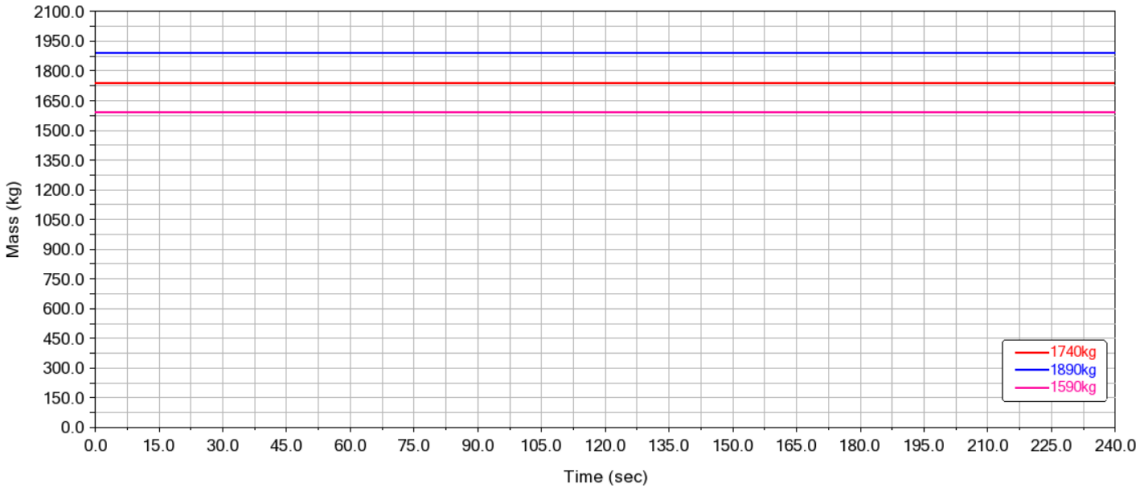
Şekil 4.34. Fren Kuvveti (Brake Force)

Bu grafikte üç farklı kütle konfigürasyonu için fren kuvvetinin zamanla değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere, simülasyon süresi boyunca fren kuvveti sıfır değerinde sabit

kalmaktadır. Bu durum, OPD modunda taşıtın pedal bırakma ile oluşturulan rejeneratif frenleme dışında herhangi bir mekanik fren girdisine maruz kalmadığını göstermektedir. Analizlerde bu yaklaşım, rejeneratif frenleme davranışının kütle etkisinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır.

4.7.9. Model Ağırlık Ayarlaması

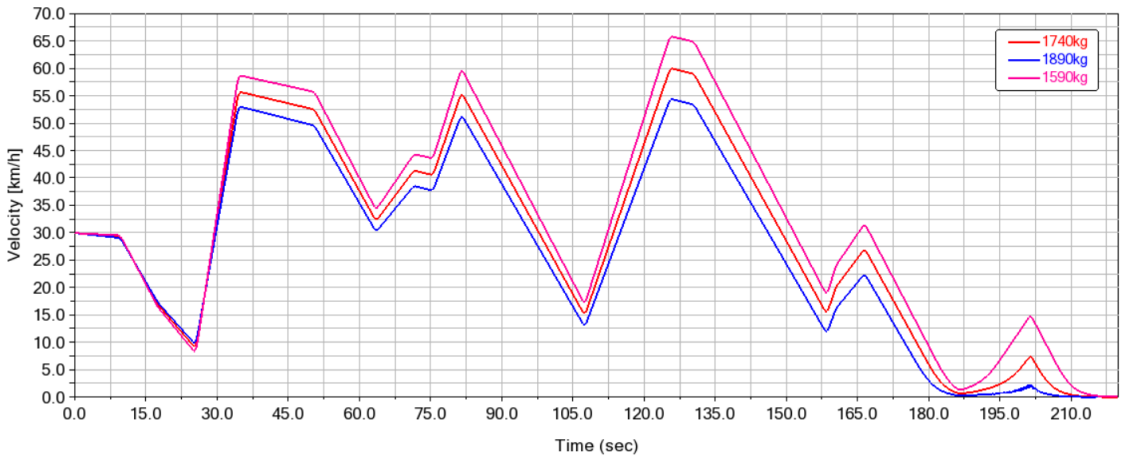
Bu çalışmada üç farklı araç kütlesine ait (1590 kg, 1740 kg ve 1890 kg) simülasyon koşulları gösterilmektedir. Tüm kütle varyasyonlarında değerler zaman ekseni boyunca sabit kalmaktadır. Bu durum, analiz süresince aracın kütlesinin değişmediğini, dolayısıyla yakıt tüketimi, batarya deşarjı veya yük aktarımı gibi kütle değişimine yol açabilecek etkilerin modelleme kapsamında değerlendirilmediğini göstermektedir. Bu sayede dinamik karşılaştırmalar yalnızca kütlenin büyüklüğüne bağlı eylemsizlik etkileri üzerinden yapılmıştır.



Şekil 4.35. Model Ağırlıkları

4.7.10. Analiz Çıktıları

Bu çalışmada hız profili, throttle ve rejeneratif frenleme bölgelerinin ardışık olarak gerçekleştiği kentsel sürüş koşullarını temsil etmektedir.

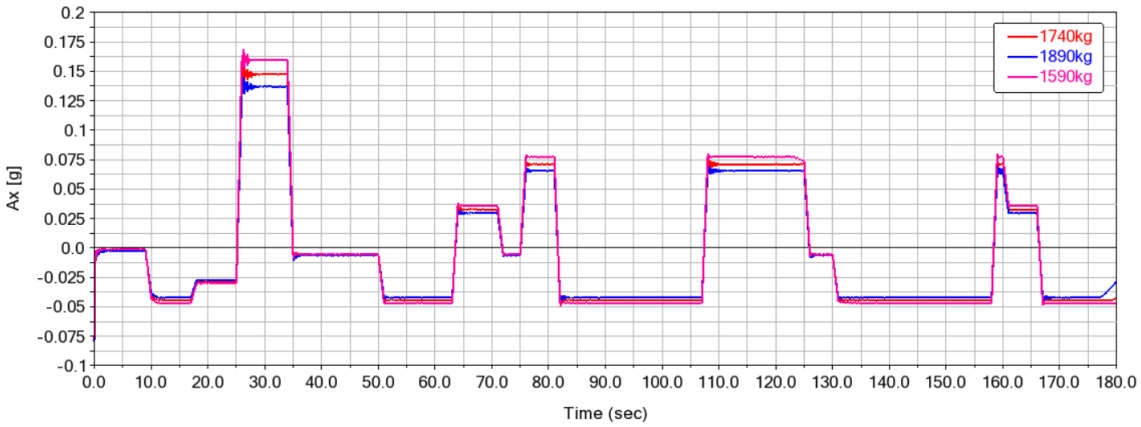


Şekil 4.36. Hız Zaman Grafiği

Bu grafik, farklı kütlelere sahip araçların (1590 kg, 1740 kg ve 1890 kg) OPD senaryosu boyunca elde edilen hız değişimlerini göstermektedir.

Düşük kütleli araç (1590 kg), her hızlanma periyodunda diğerlerine göre daha yüksek maksimum hız değerlerine ulaşmıştır. Bu farkın temel nedeni, aynı tahrik kuvveti altında kütlenin azalmasıyla aracın ivmelenme kabiliyetinin artmasıdır. Newton'un ikinci yasasına göre, aynı motor torku altında daha düşük kütleli bir araç, daha yüksek ivme üretir; bu da kısa sürede daha fazla hız kazanımıyla sonuçlanır. Örneğin 25–35 saniye aralığında 1590 kg'lık aracın yaklaşık 63 km/h hız seviyesine ulaştığı, aynı anda 1890 kg'lık aracın ise 55 km/h civarında kaldığı görülmektedir.

Pedal bırakıldığında OPD rejeneratif frenleme devreye girmekte ve tüm araçlar yavaşlama evresine geçmektedir. Bu evrelerde kütle etkisi ters yönde işler: daha büyük kütleye sahip araçlar, sahip oldukları daha yüksek kinetik enerji nedeniyle aynı rejeneratif frenleme torkuna daha uzun süre direnç gösterirler. Sonuç olarak yavaşlama oranları düşer ve durma süreleri uzar. Grafik üzerindeki yavaşlama eğrileri incelendiğinde, 1890 kg'lık aracın daha geç hız düşürdüğü, düşük kütleli aracın ise daha kısa sürede durduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.37. Boyuna İvme (Ax)

Throttle sinyalinin arttığı bölgelerde ivme pozitif değerlere ulaşmakta, pedaldan ayağın çekildiği anlarda ise negatif ivmeler oluşmaktadır. Bu periyodik yapı, Urban Road senaryosunda gerçekleştirilen hızlanma–yavaşlama döngülerine karşılık gelir.

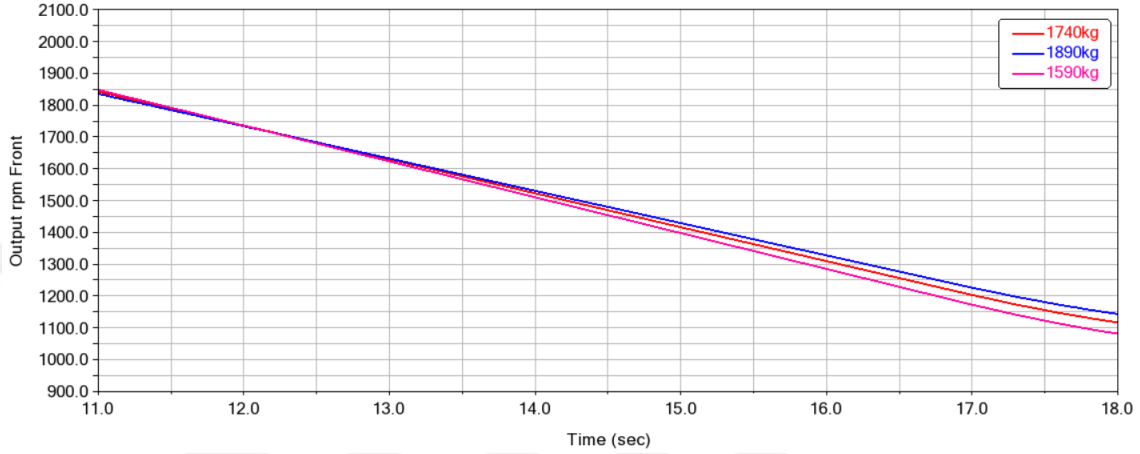
Farklı kütle varyasyonları incelendiğinde, ivme genliklerinin kütleyle ters orantılı olduğu görülmektedir. Daha düşük kütleli araç (1590 kg) hızlanma evrelerinde yaklaşık 0.17 g mertebesinde tepe ivmeye ulaşırken, 1890 kg'lık araç 0.14 g civarında kalmıştır. Bu fark, aynı tahrik kuvveti altında kütle azaldıkça ivmenin artmasıyla açıklanır. Newton'un ikinci yasası ($F = m \cdot a$) gereği, tahrik torku sabit tutulduğunda daha düşük kütleli araç daha yüksek ivmelenme kabiliyeti gösterir.

Benzer şekilde, OPD modunda pedaldan çekildiğinde aktif hale gelen rejeneratif frenleme evrelerinde de kütle etkisi belirgindir. Düşük kütleli araçlarda negatif ivme daha yüksek genliğe ulaşmakta, yani yavaşlama oranı daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, aynı rejeneratif frenleme torkunun daha küçük eylemsizliğe sahip sistem üzerinde daha güçlü bir yavaşlatıcı etki yaratmasıdır. Buna karşılık, yüksek kütleli araçlar sahip oldukları daha fazla kinetik enerji nedeniyle aynı tork altında daha uzun sürede yavaşlarlar; bu da negatif ivmenin düşük kalmasına yol açar.

Grafikte görülen ivme farkları, doğrudan hız grafiğiyle paralellik göstermekte ve kütle artışının OPD tepkisini hem hızlanma hem de yavaşlama fazlarında geciktirici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

4.7.11. Enerji Geri Kazanımı Hesabı

Torque map inde 4 kez gaz pedalı bırakma durumu haritalanmıştır. Geri kazanımı hesaplamak için bu 4 duruma ayrı ayrı bakılarak hesaplama yapılmıştır.



Şekil 4.38. Rejeneratif Frenleme Fazı 11–18 s arası (Output rpm front)

Bu aralıkta throttle sıfıra düştüğünden araç, rejeneratif frenleme moduna geçmiştir. Grafikte üç farklı kütle için motor çıkış torku ve motor devri (rpm) zamanla azalmaktadır.

Motor torku bu faz boyunca yaklaşık -22.000 N·mm seviyesinde (yaklaşık -22 N·m) sabit kalmıştır. Bu negatif tork, rejeneratif frenleme momentini ifade eder; tekerleklerden motora enerji akışı vardır. Torkun sabit kalması, sürüş kontrol algoritmasının sabit bir rejeneratif yavaşlama momenti uyguladığını göstermektedir.

Motor devri 1800 rpm'den yaklaşık 1100 rpm seviyesine düşmektedir. Bu azalma, aracın hız kaybıyla tutarlıdır. Dönme hızı azaldıkça, rejeneratif güç ($P = T \cdot \omega$) de doğrusal olarak düşmektedir.

Daha hafif (1590 kg) araç, aynı tork altında daha hızlı devir düşüşü yaşamaktadır. Bunun nedeni, momentin aynı olmasına karşın ataletin daha düşük olmasıdır; dolayısıyla yavaşlama daha belirgin olur. Daha ağır (1890 kg) araçta ise devir düşüşü daha yavaştır,

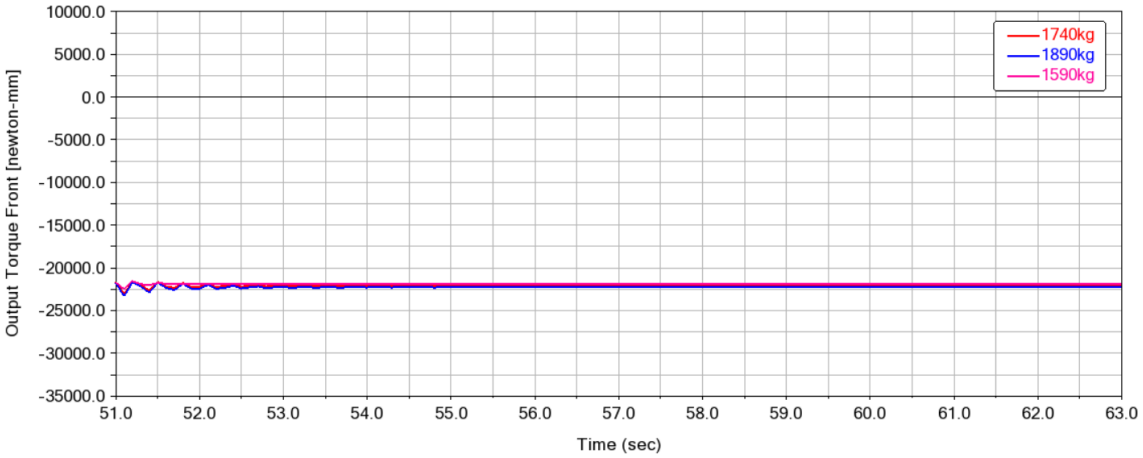
çünkü dönme enerjisi ve doğrusal atalet daha büyüktür; sistemin kinetik enerjisi fazla olduğundan rejeneratif fren torku bu enerjiyi daha uzun sürede sönümlemektedir.

Bu aralıkta ortalama tork -22 N·m ve ortalama devir 1500 rpm civarındadır. Bu değerler kullanılarak yaklaşık anlık güç:

$$P_{regen} = 22 \times \frac{2\pi \times 1500}{60} \approx 3450 \text{ W}$$

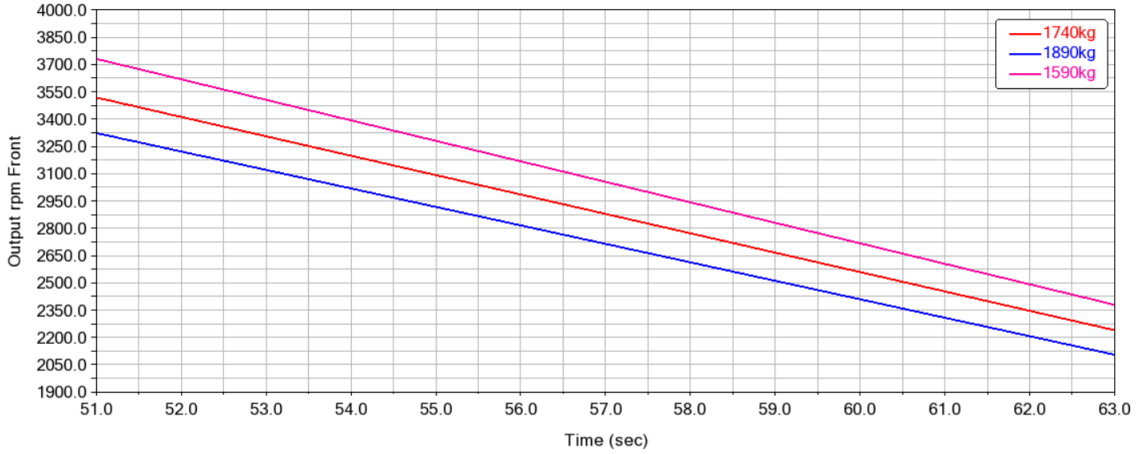
Anlık güç yaklaşık 3.5 kW mertebesindedir. 7 saniyelik bir periyot için bu, yaklaşık 24.000 J (yaklaşık 0.0067 kWh) geri kazanım potansiyeline karşılık gelir.

Bu faz, şehir içi koşullarda düşük hızlarda gerçekleşen ilk rejeneratif frenleme fazıdır. Bu hesaplamalarda motor–inverter–batarya zinciri verimleri (%80–85 arası) dikkate alınmamıştır; dolayısıyla hesaplanan değerler brüt mekanik enerji geri kazanım potansiyelini temsil etmektedir. Buradaki güç seviyesi görece düşük olmakla birlikte, sistemin enerji geri kazanım işlevinin aktif ve kararlı biçimde çalıştığı görülmektedir. Araç kütlesi arttıkça, daha yüksek toplam kinetik enerji nedeniyle toplam geri kazanılabilir enerji artacak; ancak birim zamanda güç seviyesi düşecektir.



Şekil 4.39. Rejeneratif Frenleme Fazı 51–63 s arası (Output Torque Front)

Torkun sabit kabul edilmesi, sistem kontrol algoritmasının nominal OPD modunda sabit tork üretimi yaptığı varsayımına dayanmaktadır. Gerçek sistemlerde tork–hız eğrisi hafif eğimli olabileceğinden, bu yaklaşım yaklaşık bir ortalama değeri temsil eder.



Şekil 4.40. Rejeneratif Frenleme Fazı 51–63 s arası (Output rpm front)

Bu bölümde 51–63 saniye aralığında gerçekleşen ikinci rejeneratif frenleme fazı analiz edilmiştir. Bu süre zarfında sürücü gaz pedalını tamamen bırakarak, One Pedal Driving (OPD) sisteminin rejeneratif yavaşlama karakteristiğini etkin hale getirmiştir. Grafiklerde, farklı araç kütleleri (1590 kg, 1740 kg ve 1890 kg) için motor çıkış devri (Output RPM Front) ve motor çıkış torku (Output Torque Front) değişimleri gösterilmektedir.

Motor torku, tüm kütleler için yaklaşık −22.3 N·m seviyesinde sabit kalmış olup, bu durum rejeneratif frenleme sisteminin sabit negatif tork stratejisiyle çalıştığını göstermektedir. Böylece, sürücü pedal tepkisine bağlı olarak kontrol ünitesi aracın hızına göre sabit bir enerji geri kazanım momenti uygulamaktadır. Motor devrinin zamanla azalması, rejeneratif frenleme sürecinde aracın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek yavaşlama elde edildiğini göstermektedir.

1590 kg kütleli araçta motor devri 3700 dev/dk seviyesinden 2400 dev/dk seviyesine gerilerken; 1740 kg araçta 3500 dev/dk'dan 2300 dev/dk'ya, 1890 kg araçta ise 3300 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya düşmüştür. Ortalama motor devri sırasıyla 3050, 2900 ve 2700 dev/dk olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak elde edilen ortalama açısal hızlar 319.4, 303.7 ve 282.7 rad/s olarak belirlenmiştir.

Sabit tork altında rejeneratif güç,

$$P=|T|\cdot\omega$$

denklemiyle hesaplanmıştır. Buna göre ortalama rejeneratif güç sırasıyla 7.12 kW, 6.77 kW ve 6.31 kW olarak bulunmuştur. On iki saniyelik zaman aralığında geri kazanılan enerji miktarları ise sırasıyla 85.47 kJ, 81.27 kJ ve 75.66 kJ olarak hesaplanmıştır. Enerji birim dönüşümüyle bu değerler yaklaşık olarak 0.0237 kWh, 0.0226 kWh ve 0.0210 kWh seviyelerine karşılık gelmektedir.

Bu sonuçlar, sabit tork stratejisinde araç kütlesi arttıkça rejeneratif güç ve toplam enerji geri kazanımının azaldığını göstermektedir. Bunun temel nedeni, ağır araçlarda motor devrinin daha düşük seviyelerde seyretmesidir. Dolayısıyla açısal hızın azalması, güç üretim potansiyelini doğrudan sınırlamaktadır. Daha hafif araçta ise aynı tork altında daha yüksek motor devri korunabildiğinden, birim zamanda daha fazla mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Bu faz, şehir içi sürüş koşullarında orta hız aralığında gerçekleşen bir yavaşlama fazını temsil etmektedir. Dolayısıyla burada elde edilen enerji geri kazanım değerleri, OPD sisteminin günlük kullanım senaryolarındaki etkinliğini göstermesi açısından önemlidir.

Varsayımlar

• Tork: Output Torque Front ≈ −22 300 N·mm → −22.3 N·m (sabit)

• Süre: $\Delta t = 12$ s (51–63 s)

• Güç: $P(t) = |T| \cdot \omega$, $\omega = 2\pi \cdot rpm/60$

• Sadece ön makine, verim çarpanları uygulanmadı (brüt mekanikten DC'ye çevrilmedi)

Ortalama rpm'ler (grafikten okunarak)

• 1590 kg: 3700 → 2400 rpm ⇒ rpm avg ≈ 3050

• 1740 kg: 3500 → 2300 rpm ⇒ rpm avg ≈ 2900

• 1890 kg: 3300 → 2100 rpm ⇒ rpm avg ≈ 2700

Hesaplanan büyüklükler:

- 1590 kg:

ω avg ≈ 319.40 rad/s

P regen ≈ 7.12 kW

Eregen ≈ 85.47 kJ ≈ 0.0237 kWh

- 1740 kg:

ωavg ≈ 303.69 rad/s

Pregen ≈ 6.77 kW

Eregen ≈ 81.27 kJ ≈ 0.0226 kWh

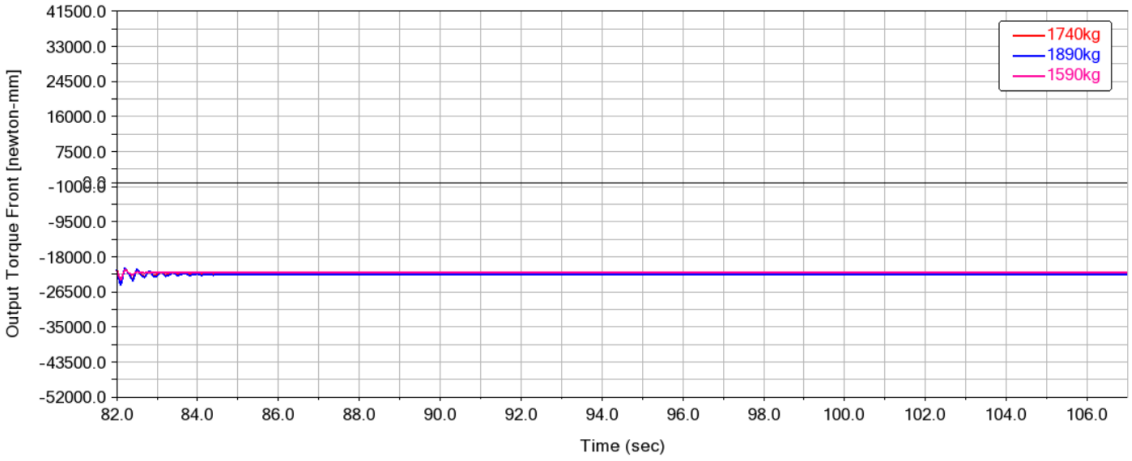
- 1890 kg:

ωavg ≈ 282.74 rad/s

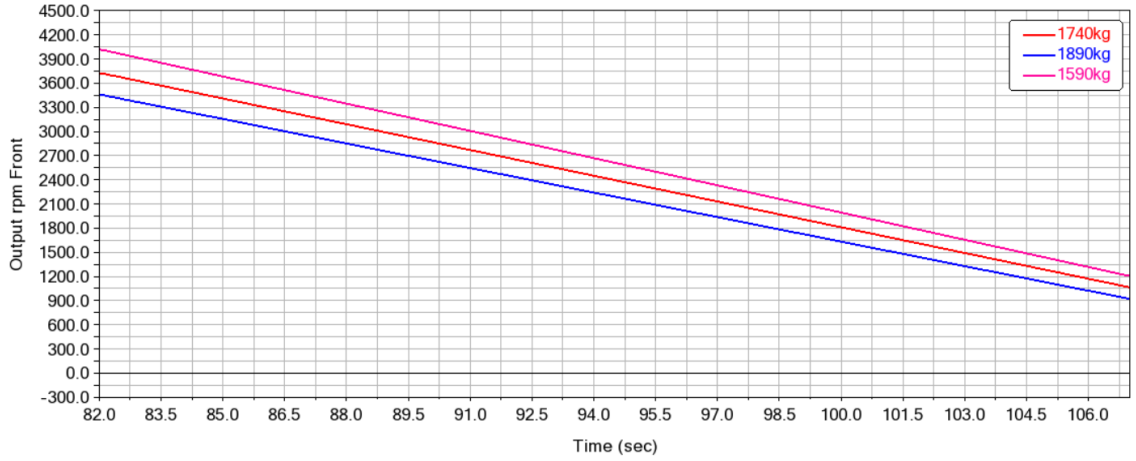
Pregen ≈ 6.31 kW

Eregen ≈ 75.66 kJ ≈ 0.0210 kWh

Aynı negatif tork altında daha yüksek ortalama rpm, daha yüksek ω ve dolayısıyla daha yüksek rejeneratif güç/enerji üretti. Bu fazda en hafif araç en yüksek enerji geri kazanımını sunuyor; kütle arttıkça rpm eğrisi daha düşük kaldığı için brüt geri kazanım azalıyor. Bu değerler makine çıkışındaki brüt güç/enerjiye yakınsaktır. Aktarma, inverter ve batarya şarj verimleri eklendiğinde net enerji kWh daha düşük olacaktır.



Şekil 4.41. Rejeneratif Frenleme Fazı 82–107 s arası (Output torque front)



Şekil 4.42. Rejeneratif Frenleme Fazı 82–107 s arası (Output rpm front)

Bu bölümde 82–107 saniye aralığında gerçekleşen üçüncü rejeneratif frenleme fazı analiz edilmiştir. Bu faz, orta-yüksek hız bölgesinden durağan duruma geçişi temsil eden ve rejeneratif sistemin yüksek kinetik enerji seviyelerinde nasıl davrandığını ortaya koyan kritik bir kesittir.

Grafiklerde farklı kütlelerdeki araçlara ait motor çıkış devri (Output RPM Front) ve motor çıkış torku (Output Torque Front) verileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tork grafiğinde görüldüğü üzere, üç kütle senaryosu için de rejeneratif frenleme boyunca motor torku yaklaşık −26 N·m seviyesinde sabit kalmıştır. Bu durum, sistemin yine sabit tork stratejisi altında çalıştığını ve pedal bırakma anından itibaren motorun jeneratör moduna geçtiğini göstermektedir.

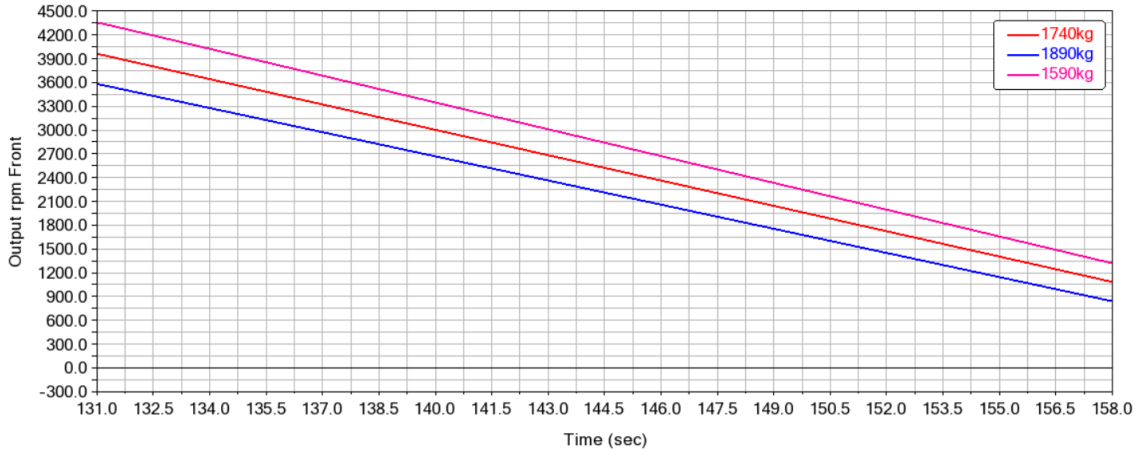
Motor devrinin zamana bağlı değişimi incelendiğinde, 1590 kg'lık aracın 4100 dev/dk seviyesinden yaklaşık 2500 dev/dk'ya, 1740 kg'lık aracın 3850 dev/dk'dan 2300 dev/dk'ya, 1890 kg'lık aracın ise 3600 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya düştüğü görülmektedir. Ortalama motor devirleri sırasıyla 3300, 3075 ve 2850 dev/dk olarak hesaplanmıştır. Bu değerler açısal hız cinsine çevrildiğinde, ortalama ω değerleri 345.4, 321.9 ve 298.5 rad/s olarak elde edilmiştir.

Sabit tork altında rejeneratif güç, $P=|T|\cdot\omega$ denklemiyle hesaplandığında, ortalama rejeneratif güç sırasıyla 8.98 kW, 8.37 kW ve 7.76 kW olarak bulunmuştur. Bu fazın yaklaşık 25 saniye sürdüğü dikkate alındığında, geri kazanılan enerji miktarları sırasıyla

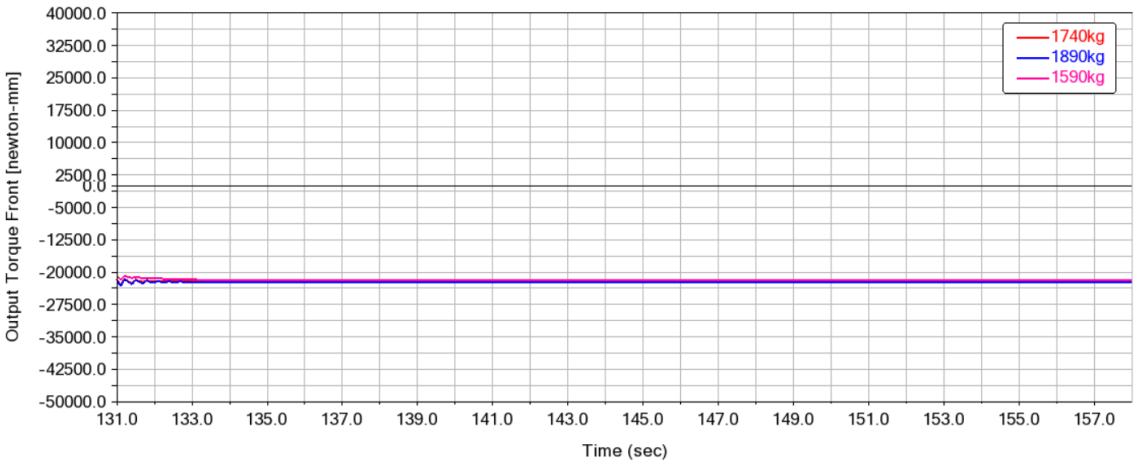
224.4 kJ, 209.2 kJ ve 194.0 kJ olarak hesaplanmıştır. Enerji birimi dönüşümü yapıldığında bu değerler yaklaşık olarak 0.0623 kWh, 0.0581 kWh ve 0.0539 kWh seviyelerine karşılık gelmektedir.

Bu bulgular, rejeneratif sistemin yüksek hız bölgelerinde daha fazla enerji geri kazanımı sağladığını, ancak araç kütlesinin artmasıyla birlikte bu kazancın azaldığını göstermektedir. Daha ağır araç, sahip olduğu daha yüksek atalet nedeniyle aynı tork altında daha yavaş devir düşüşü sergilemekte, dolayısıyla ortalama açısal hız ve güç değeri daha düşük kalmaktadır. Bunun sonucunda, enerji geri kazanım miktarı da düşmektedir.

Genel olarak bu faz, OPD stratejisinin yüksek kinetik enerji koşullarında enerji geri kazanım potansiyelini göstermekte ve farklı kütleler arasında oluşan farkların sistem verimliliği üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.43. Rejeneratif Frenleme Fazı (131–158 s)



Şekil 4.44. Rejeneratif Frenleme Fazı (131–158 s)

Bu bölümde 131–158 saniye aralığında gerçekleşen dördüncü rejeneratif frenleme fazı değerlendirilmiştir. Bu faz, sürücünün gaz pedalını bırakarak aracın son yavaşlama ve durma manevrasını gerçekleştirdiği bölümü temsil etmektedir. Dolayısıyla sistemin düşük hızlarda enerji geri kazanım kapasitesi bu aralıkta analiz edilmiştir.

Motor çıkış torku grafiği incelendiğinde, üç farklı kütle senaryosunda da torkun sabit negatif değerde, yaklaşık −21.5 N·m seviyesinde korunduğu görülmektedir. Bu durum, sistemin düşük hız rejiminde de sabit rejeneratif tork stratejisini sürdürdüğünü göstermektedir. Torkun süre boyunca stabil kalması, inverter kontrol algoritmasının düşük hızlarda dahi kararlı bir rejeneratif akım üretimi sağladığını ifade eder.

Motor devri grafiğinde ise 1590 kg kütleli araçta devir 4300 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya, 1740 kg araçta 4000 dev/dk'dan 1900 dev/dk'ya, 1890 kg araçta ise 3700 dev/dk'dan 1650 dev/dk'ya kadar düşmektedir. Ortalama devirler sırasıyla 3200, 2950 ve 2675 dev/dk olarak belirlenmiştir. Buna karşılık gelen açısal hızlar 335.1, 308.7 ve 280.2 rad/s olarak hesaplanmıştır.

Rejeneratif güç, sabit tork koşulu altında $P=|T|\cdot\omega$, denklemiyle hesaplanmıştır. Buna göre ortalama güç değerleri 7.20 kW (1590 kg), 6.63 kW (1740 kg) ve 6.03 kW (1890 kg) olarak bulunmuştur. Yaklaşık 27 saniyelik bu faz süresince geri kazanılan enerji miktarları sırasıyla 194.4 kJ, 179.0 kJ ve 163.0 kJ olarak elde edilmiştir. Enerji birim

dönüşümünde bu değerler sırasıyla 0.0540 kWh, 0.0497 kWh ve 0.0453 kWh olarak ifade edilebilir.

Elde edilen sonuçlar, araç kütlesinin rejeneratif enerji geri kazanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu bir kez daha göstermektedir. Daha ağır kütlelerde motor devri aynı tork altında daha düşük seviyelerde gerçekleştiğinden, ortalama açısal hız azalmakta ve dolayısıyla rejeneratif güç üretimi düşmektedir. Buna karşılık hafif araç, düşük hız fazında dahi daha yüksek motor devrini koruyarak birim zamanda daha fazla enerji dönüşümü sağlamaktadır.

Bu faz, düşük hız bölgesindeki enerji geri kazanım etkinliğini temsil etmesi açısından önemlidir. Özellikle şehir içi trafik koşullarında sık dur-kalk manevralarının yaşandığı senaryolarda, sistemin bu seviyedeki verimliliği toplam enerji ekonomisini doğrudan etkilemektedir.

240 saniyelik sürüş senaryosu boyunca dört adet rejeneratif frenleme fazı tanımlanmış olup, bu fazlar toplamda yaklaşık 0.137 kWh düzeyinde brüt mekanik enerji geri kazanımı sağlamıştır. Bu durum, her dakikada bir yavaşlama olayının gerçekleştiği orta yoğunlukta bir şehir içi sürüş profilini temsil etmektedir.

Aynı pedal bırakma sıklığının 10 dakikalık (600 s) bir sürüş döngüsünde sürdüğü varsayıldığında, toplam brüt enerji geri kazanımı yaklaşık 0.34 kWh seviyesine yükselmektedir. Bu değer, sistemin inverter ve batarya şarj verimleri (%80–85) dikkate alındığında yaklaşık 0.26 kWh net enerji geri kazanımına karşılık gelmektedir.

Tipik bir şehir içi enerji tüketiminin 15–17 kWh/100 km aralığında olduğu dikkate alındığında, bu kazanç 10 dakikalık bir sürüşte yaklaşık %1.5–2 oranında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ortalama 50 km'lik bir şehir içi kullanımda ise rejeneratif frenleme sistemi toplamda yaklaşık 1.3–1.5 kWh enerji geri kazanımı potansiyeli sunmaktadır.

Bu genelleme, One-Pedal Driving stratejisinin kısa süreli dur–kalk koşullarında bile enerji verimliliği açısından anlamlı bir katkı sağladığını ve sistemin şehir içi kullanım senaryolarında etkin biçimde çalıştığını göstermektedir.

Elde edilen 0.34 kWh/10 dk brüt enerji geri kazanımı değeri, literatürde bildirilen rejeneratif enerji geri kazanım aralıklarıyla uyumludur. Nissan Leaf, Hyundai Kona EV ve Tesla Model 3 gibi modern BEV'ler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda şehir içi çevrimlerde 0.25–0.45 kWh/10 dk aralığında enerji geri kazanımı rapor edilmiştir. Bu çalışma kapsamında simülasyonla elde edilen değer, aynı tork tabanlı sabit rejeneratif strateji altında, %80–85 verim dikkate alındığında yaklaşık 0.26 kWh net enerji kazancına karşılık gelmektedir. Bu sonuç, sistemin One Pedal Driving modunda enerji verimliliği açısından literatür değerleriyle tutarlı ve gerçekçi bir performans sergilediğini göstermektedir.

Bu noktada elde edilen net enerji geri kazanımının araç menziline olan etkisini nicel olarak değerlendirmek mümkündür. Şehir içi tipik bir BEV tüketim değeri yaklaşık 15–17 kWh/100 km aralığında olduğundan, birim mesafe başına enerji tüketimi yaklaşık 0.15–0.17 kWh/km düzeyine karşılık gelmektedir. Bu değer referans alındığında, 10 dakikalık sürüşte elde edilen 0.26 kWh net enerji geri kazanımı, aracın menziline yaklaşık:

- 0.26 kWh / 0.15 kWh/km ≈ 1.73 km,
- 0.26 kWh / 0.17 kWh/km ≈ 1.53 km

aralığında bir katkı sunmaktadır. Başka bir ifadeyle, One-Pedal Driving tabanlı rejeneratif frenleme stratejisi, yalnızca 10 dakikalık tipik bir şehir içi kullanım süresinde yaklaşık 1.5–1.7 km düzeyinde ilave menzil kazanımı sağlamaktadır.

Bu eğilim daha uzun kullanım süresi ölçeğine taşındığında sistemin potansiyeli daha belirgin hale gelmektedir. Ortalama bir sürücünün şehir içi trafikte 50 km'lik bir günlük kullanım profiline sahip olduğu düşünüldüğünde, çalışma kapsamında elde edilen pedal bırakma frekansı ve rejeneratif tork karakteristiği korunduğu takdirde, toplam menzil kazancı:

- 1.3–1.5 kWh net enerji geri kazanımı potansiyeli
- Şehir içi tüketim değerleri ışığında 7.5–10 km ek menzil aralığı

şeklinde hesaplanabilmektedir. Bu sonuç, aracın toplam günlük enerji gereksiniminin anlamlı bir bölümünün rejeneratif frenleme mekanizmasıyla geri kazanılabildiğini ve One-Pedal Driving modunun menzil üzerinde ölçülebilir bir iyileştirme yarattığını göstermektedir.

Dolayısıyla, rejeneratif frenleme etkinliğinin artırılması özellikle dur-kalk yoğunluğu yüksek olan şehir içi koşullarında elektrikli araçların toplam enerji verimliliğinin yükseltilmesine ve menzil endişesinin azaltılmasına doğrudan katkıda bulunmaktadır. Simülasyon sonuçları, kullanılan tork tabanlı sabit rejeneratif stratejinin literatürde bildirilen gerçek araç deneyimleriyle uyumlu biçimde çalıştığını ve enerji kazanımı açısından modern BEV platformlarıyla benzer bir performans ortaya koyduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, One-Pedal Driving stratejisinin hem enerji geri kazanımı hem de menzil iyileştirmesi açısından mühendislik olarak uygulanabilir ve pratikte karşılığı olan bir çözüm sunduğu söylenebilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen analizler, rejeneratif frenleme stratejilerinin taşıt dinamiği, enerji geri kazanımı ve sürüş konforu üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Geliştirilen model, ADAMS/Car platformu üzerinde oluşturulmuş ve taşıtın boylamasına dinamikleri, frenleme davranışı, süspansiyon tepkisi ve aks yük transferi gibi alt sistemler detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bu kapsamda, farklı sürüş senaryoları altında gerçekleştirilen simülasyonlar, OPD stratejisinin hem taşıtın kararlılığına hem de enerji verimliliğine doğrudan etki ettiğini göstermiştir. OPD davranışıyla birlikte, hızlanma–yavaşlama geçişlerinin sürekliliği artmakta, pedal geçişlerinde ivme değişimi (jerk) düzeyi azalarak sürüş akıcılığı ve konfor iyileşmektedir.

Elde edilen sonuçlar, rejeneratif frenleme momentinin kontrol karakteristiğinin taşıtın duruş kararlılığı, gövde hareketleri ve yolcu konforu açısından belirleyici olduğunu göstermektedir. OPD uygulamasında enerji geri kazanımı ile konfor arasında bir denge bulunduğu tespit edilmiştir: rejeneratif frenleme oranının artırılması, enerji verimini yükseltirken taşıtın boyuna eğilme (pitch) genliğini artırmakta; buna karşın düşük rejeneratif tork stratejileri sürüş konforunu iyileştirerek yolcu algısını olumlu yönde etkilemektedir. Bu bulgu, rejeneratif frenleme sistemlerinin yalnızca enerji kazanımı değil, aynı zamanda sürüş kalitesi hedefleri doğrultusunda da optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın önemli bir çıktısı, OPD sisteminin boylamasına dinamik performans–konfor–enerji geri kazanımı arasındaki çok boyutlu etkileşimi sayısal olarak ortaya koyabilmesidir. Analizlerde kullanılan parametreler, rejeneratif fren torku, süspansiyon tepkisi, aks yük transferi ve pitch açısı gibi fiziksel değişkenlerin birlikte değerlendirilmesiyle, sistemin bütünsel davranışı güvenilir biçimde incelenmiştir. Bu yönüyle çalışma, taşıt dinamiği analizlerinde klasik enerji odaklı yaklaşımlardan farklı olarak dinamik performans ve konforu aynı anda ele alan bir modelleme metodolojisi önermektedir.

Bunun yanında, elde edilen bulgular, OPD kontrol stratejilerinin farklı sürüş koşullarına göre uyarlanabilir biçimde tasarlanmasının gerekliliğini de göstermektedir. Sabit rejeneratif tork yaklaşımı belirli koşullarda kararlı ve verimli sonuçlar verse de, değişken yol eğimleri, batarya durumu ve sürücü tepkileri altında sistemin dinamik olarak ayarlanması, hem enerji verimini hem de sürüş konforunu artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, elektrikli araç teknolojilerinin hızla gelişmesi ve kullanıcı beklentilerinin çeşitlenmesi, bu alanda daha derinlemesine ve çok boyutlu araştırmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda aşağıdaki konulara odaklanılması önerilmektedir:

İlk olarak, mevcut çalışma boylamasına dinamiklere odaklanmış olup, yanal ivmelenme, direksiyon tepkileri ve viraj içi dinamikler gibi yanal dinamikler kapsam dışında bırakılmıştır. Gelecekteki araştırmalarda, rejeneratif frenlemenin viraj alma sırasında taşıtın denge ve yol tutuş performansına etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Bu tür çalışmalar, özellikle yüksek hızda viraj alma ve ani manevralar sırasında taşıtın stabilitesini artırmaya yönelik kontrol stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

İkinci olarak, sabit rejeneratif frenleme seviyeleri, farklı sürüş koşullarında optimal performans sağlamayabilir. Bu nedenle, sürüş koşullarına, yol eğimine, trafik yoğunluğuna ve sürücü davranışlarına göre dinamik olarak ayarlanabilen adaptif kontrol algoritmalarının geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu tür algoritmalar, enerji geri kazanımını maksimize ederken, sürüş konforunu ve güvenliğini de artırabilir.

Üçüncü olarak, rejeneratif frenleme sırasında geri kazanılan enerjinin etkin bir şekilde depolanması ve kullanılması, batarya yönetim sistemlerinin performansına bağlıdır. Gelecekteki çalışmalarda, rejeneratif frenleme stratejilerinin batarya sıcaklığı, şarj durumu (SOC) ve batarya ömrü üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Ayrıca, enerji geri kazanımının batarya sağlığına uzun vadeli etkileri de araştırılmalıdır.

Dördüncü olarak, rejeneratif frenleme sistemlerinin sürücü tarafından algılanması ve

kabul edilmesi, sistemin etkinliği açısından kritiktir. Gelecekteki araştırmalarda, farklı rejeneratif frenleme seviyelerinin sürücü davranışları, algılanan konfor ve güvenlik üzerindeki etkileri simülasyon ve sürüş simülatörleri kullanılarak analiz edilmelidir. Bu tür çalışmalar, kullanıcı odaklı sistem tasarımı için değerli geri bildirimler sağlayacaktır.

Beşinci olarak, bu tezde kullanılan simülasyon modelleri, belirli varsayımlar ve ideal koşullar altında çalışmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, geliştirilen rejeneratif frenleme stratejilerinin gerçek zamanlı donanım testleri ve yol testleri ile doğrulanması önemlidir. Bu tür testler, simülasyon sonuçlarının gerçek dünya koşullarında geçerliliğini değerlendirmek için gereklidir.

Son olarak, bu çalışma belirli bir taşıt tipi ve sürüş senaryosu üzerine odaklanmıştır. Gelecekteki araştırmalarda, farklı taşıt tipleri (örneğin, ağır vasıtalar, otobüsler) ve çeşitli sürüş senaryoları (örneğin, otoyol sürüşü, dağlık arazi koşulları) altında rejeneratif frenleme stratejilerinin performansı incelenmelidir. Bu tür çalışmalar, sistemin genelleştirilebilirliğini ve farklı uygulama alanlarındaki etkinliğini değerlendirmek için önemlidir.

Bu önerilen araştırma alanları, rejeneratif frenleme sistemlerinin daha etkin, güvenli ve kullanıcı dostu hale getirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, elektrikli araç teknolojilerinin sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine ulaşmasına da destek olacaktır.

KAYNAKLAR

Greencars. (2023, Mart 20). Is coasting better than one pedal driving? GreenCars. Erişim adresi: https://www.greencars.com Hussain, I., Mekhilef, S., Saidur, R., Hussain, A., Khan, M. A. ve Razzaq, N. A. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Energy*, 1, 100005.

Carmekan. (t.y.). Süspansiyon nedir? Çeşitleri nelerdir? Erişim adresi: https://carmekan.com/blog/suspansiyon-nedir-cesitleri-nelerdir/

Wang, C., Ouyang, J., Cao, P., Song, J. ve Yu, S. (2024). Development and validation of 3D commercial vehicle multibody dynamics model to assess dynamic load coefficient. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 150(3), 04024028.

Numanoy, N., Chamniprasart, K. ve Srisertpol, J. (2023). Enhancing the performance and durability of commercial vehicle cargo box frames through modal analysis. *Applied Sciences*, 13(16), 9303.

Dalla Chiara, G., Alho, A. R., Cheng, C., Ben-Akiva, M. ve Cheah, L. (2020). Exploring benefits of cargo-cycles versus trucks for urban parcel delivery under different demand scenarios. *Transportation Research Record*, 2674(5), 553-562.

Jain, P. (2007). Design and analysis of a tractor-trailer cabin suspension (No. 2007-26-047). *SAE Technical Paper*.

Mohan, A., Balasubramani, S., Pandurangan, R., Cornelio, R., Senrayaperumal, S. ve Patel, M. (2024). Scientific approach for pickup cargo weight reduction (No. 2024-26-0192). *SAE Technical Paper*.

Jiang, Z., Zhu, Y., Du, J. ve Sun, S. (2024). The structure design and performance analysis of an automated guided vehicle (AGV) frame for large load. *Intelligent Equipment and Special Robots*, 3-13. IOS Press.

Canpolat, B., Akbaba, M., Çifci, E. ve Doğan, M. A. (2024). Determination of helical spring coefficient of electric motor micro-truck vehicle with independent suspension on front axle (No. 2024-01-5020). *SAE Technical Paper*.

Heissing, B. (2011). *Chassis Handbook.* Wiesbaden: Springer Vieweg.

Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics.* Warrendale: SAE International.

SAE. (2022). *Vehicle Dynamics Terminology.* SAE International.

Genta, G. ve Morello, L. (2009). *The Automotive Chassis.* Springer.

Car and Driver. (2019). Drivers of electric cars enjoy one pedal operation. Car and Driver. Erişim adresi: https://www.caranddriver.com

Greencarreports. (2022). One pedal driving in EVs isn't efficient, says Porsche. GreenCarReports. Erişim adresi: https://www.greencarreports.com

Lifewire. (2021, Eylül 27). How does regenerative braking work? Lifewire. Erişim adresi: https://www.lifewire.com

Medicine Hat Nissan. (2025, Mayıs 19). Nissan: maximizing EV range and efficiency with the e-Pedal. Medicine Hat Nissan Blog. Erişim adresi: https://www.medicinehatnissan.com

My Nissan Leaf Forum. (2024). Use e-Pedal to reduce physical brake wear? My Nissan Leaf Forum. Erişim adresi: https://www.mynissanleaf.com

Tesla Motors Club. (2024, Şubat). Comparing stopping modes: Creep – Roll – Hold. Tesla Motors Club Forum. Erişim adresi: https://www.teslamotorsclub.com

Tesla. (2025). Braking and stopping [Owner's Manual excerpt]. *Tesla Model Y Owner's Manual*. Erişim adresi: https://www.tesla.com

Wise Auto Acce. (2023). Tesla one pedal driving: A comprehensive guide. Wise Auto Acce Blog. Erişim adresi: https://www.wiseautoacce.com

Wired. (2017, Temmuz 24). Look Ma, no brake! You'll drive electric cars with one pedal. Wired. Erişim adresi: https://www.wired.com

YouTube. (2025, Mart). *Tesla stopping modes (Roll, Creep, Hold) – regenerative braking explained* [Video]. YouTube

YouTube. (2025, Mayıs). *Hyundai IONIQ 5: Understand ALL regenerative braking & drive modes* [Video]. YouTube. Erişim adresi: https://www.youtube.com

MG Motor India. (2021, 2 Eylül). *Taking a look at the three levels of regenerative braking in your ZS EV*. Erişim adresi: https://www.mgmotor.co.in/blogs/taking-a-look-at-the-three-levels-of-regenerative-braking-in-your-zs-ev

Nissan Motor Co. (2022). Nissan Leaf e-Pedal System Technical Description. Nissan Technical Whitepaper.

S&P Global. (2023). Energy Recovery Efficiency in Modern Electric Vehicle Regenerative Braking Systems. S&P Global Mobility Report.

General Motors. (2021). One-Pedal Driving Performance Evaluation for Chevrolet Bolt EV. GM Technical Communication.

MDPI. (2024). Regenerative Braking Energy Analysis in Urban Driving Conditions. Applied Sciences, 14(3).

Chevrolet Bolt EV Owner Community. (2022). User-Based Regenerative Braking Efficiency Observations. Owner Technical Feedback Document.

Tesla Inc. (2021). Regenerative Braking Control Strategy in Model 3. Tesla Engineering Overview Document.

Hyundai Motor Group. (2022). Smart Regenerative Braking System Operation Guide. Hyundai Technical Manual.