REJENERATİF FRENLEME SİSTEMİ VE BATARYAYA ETKİLERİ

MAHMUT ÜNALDI
AYHAN UYAROĞLU

EĞİTİM
yayınevi

REJENERATİF FRENLEME SİSTEMİ VE BATARYAYA ETKİLERİ

Mahmut Ünaldı, Ayhan Uyaroğlu

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)
Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)
Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam
Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Grafik Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı
Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-5059-91-8
1. Baskı, Ekim 2026

Kütüphane Kimlik Kartı

REJENERATİF FRENLEME SİSTEMİ VE BATARYAYA ETKİLERİ
Mahmut Ünaldı, Ayhan Uyaroğlu
E-ISBN: 978-625-5059-91-8
VIII+67 s., 135x215 mm
Kaynakça var, dizin yok.

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mekanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis:
Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
İstanbul: Salon Yayınları, Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye
Santral: +90 332 351 92 85
Editör hatları: +90 533 151 50 42, +90 507 151 50 43
bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.
P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America
americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr
Whatsapp hattı: +90 553 950 50 37
bilgi@kitapmatik.com.tr

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye
Whatsapp hattı: +90 501 651 92 85
bilgi@egitimkitabevi.com

EĞİTİM YAYINEVİ GRUBU

ÖN SÖZ

Günümüzde çevresel sürdürülebilirlik, fosil yakıtların tükenme riski, enerji verimliliği gereksinimleri ve ekonomik-ekolojik gelişmeler otomotiv sektörünü ciddi bir dönüşüme zorlamıştır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan elektrikli taşıtlar, alternatif bir ulaşım aracı olmaktan ziyade içten yanmalı motorlardan elektrikli sistemlere geçişte enerji verimliliğine odaklanılmış bir ürün olarak ortaya çıkmıştır. İçten yanmalı motorlu taşıtlarda günümüz ihtiyaçlarına göre enerji verimliliği yanında çevresel ve ekonomik durumlar ilk hedef olarak amaçlanırken elektrikli taşıtlarda ekolojik etkinin azalması ve yeni teknolojinin ekonomik olamayacağı da göz önünde bulundurularak verimlilik etkenleri üzerine yoğunlaşılmıştır. Bu geçişte amaç, aracın menzilini artırmak ve batarya yükünü azaltabilmektir. Elektrikli taşıtlarda atık enerji içten yanmalı motorlara nazaran fazla olmamasına karşın batarya ısısından ve frenleme esnasında oluşan ısıdan faydalanılma yöntemleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Taşıtlarda frenleme veya yavaşlama olayı, esasında termodinamik bir olay yani enerji dönüşüm işlemidir. Frenleme işlemi, kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümüdür. Taşıtın sahip olduğu kinetik enerji, ısı enerjisine dönüştürülerek fazla enerji ortama salınır ve sistem dengesi sağlanır. Ortama salınan bu enerjiden verimli şekilde faydalanabilmek günümüz teknolojisinde büyük önem taşımaktadır. Elektrikli ve hibrit taşıtlarda rejeneratif frenleme sistemleri, frenleme sırasında kinetik enerjinin bir bölümünü geri kazanırken fren kontrol sistemiyle eşgüdümlü çalışarak sürüş güvenliğinin korunmasına katkı sağlar.

Bu çalışmada, elektrikli ve hibrit taşıtlarda standart donanım haline gelen rejeneratif frenleme sistemlerinin çalışma mantığından ve bu taşıtların önemli bir parçası olan bataryaya etkilerinden bahsedilmiştir. Elektrikli ve hibrit taşıtların yaygınlaşmasıyla birlikte batarya ömrü, bu taşıtların performansını ve kullanım maliyetlerini etkileyen önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Batarya ömrüne ilişkin bilgi birikimi; şarj-deşarj

döngüleri ve gerçek sürüş koşullarında yürütülen testlerden elde edilen verilerle gelişmektedir. Şarj döngüsü batarya teknolojisine bağlı olarak batarya ömrünü etkileyen önemli unsurlardan biridir. Bu noktada rejeneratif frenleme sistemlerinin de bataryayı şarj etme durumu olduğundan batarya ömrüne etki etmektedir. Ayrıca, frenleme sırasında batarya üzerinde oluşan etkiler; enerji kazanım verimliliği, termal yük ve döngü ömrü gibi hususlar incelenmiştir.

Mahmut Ünaldı – Ayhan Uyaroğlu

İÇİNDEKİLER

Ön Söz ..... **III**
İçindekiler ..... **V**
Şekiller Listesi ..... **VI**
Kısaltmalar ..... **VII**
1. GİRİŞ VE KAPSAM **1**
2. FİZİKSEL TEMELLER VE SİSTEM MİMARİSİ **7**
2.1. Tarihçesi 7
2.2. Rejeneratif Frenleme Sistemi 8
3. FREN HARMANLAMA VE KONTROL **13**
3.1. Kontrol Girdileri ve Çalışma Koşulları 13
3.2. Fren Harmanlama ve Kontrol Stratejileri 18
4. ENERJİ DEPOLAMA TÜRLERİ **31**
4.1. Enerji Depolama Yöntemlerine Göre Sistemler 31
4.1.1. Elektrikli (Batarya veya Ultra/Süper Kapasitörlü) 31
4.1.2. Mekanik (Volan veya Yaylı) 32
4.1.3. Yüksek Basınç Akümülatörlü (Sıvı veya Gaz) 33
5. GERİ KAZANIM ÖLÇÜTLERİ VE SÜRÜŞ ÇEVRİMİ ETKİLERİ **35**
5.1. Sistem Verimliliği ve Sürüş Çevrimi Etkileri 35
6. BATARYA ŞARJ KABULÜ, ISIL DAVRANIŞ VE YAŞLANMA **44**
7. LİTERATÜR SENTEZİ VE SINIRLILIKLAR **54**
7.1. Rejeneratif Frenlemenin Avantajları ve Sınırlamaları 54
7.2. Batarya Etkileri Üzerine Literatür Sentezi 55
8. SONUÇ VE ARAŞTIRMA GEREKSİNİMLERİ **57**
KAYNAKLAR **61**

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Fren enerjisi üretimini etkileyen faktörler 10
Şekil 2. Rejeneratif frenleme enerji akış diyagramı 11
Şekil 3. Enerji kontrol stratejisinin akış şeması 14
Şekil 4. Elektrikli taşıtlarda frenleme sisteminin genel yapısı 19
Şekil 5. Rejeneratif frenleme sistemindeki temel hedefler 21
Şekil 6. Rejeneratif frenleme kontrol stratejisinin farklı girdileri 25
Şekil 7. Üç farklı frenleme kuvveti dağılım kontrol stratejisi 25
Şekil 8. Seri ve paralel frenleme akış şeması 29
Şekil 9. İYM'lerin şehir içi ve otoyolda enerji verimliliği 36
Şekil 10. DoE'ye göre şehirlerde ve otoyollarda elektrikli araçların rejeneratif enerji verimliliği 39
Şekil 11. Lambada elektrik enerjisinin ısı enerjisi ve ışığa dönüşmesi 46

KISALTMALAR

ABS : Anti-Lock Brake System (Kilitlenme Önleyici Fren Sistemi)

AC : Alternating Current (Alternatif Akım)

ADAS : Advanced Driver Assistance Systems (Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri)

ASR : Anti Spin Regulation (Patinaj Önleme Sistemi)

BAS : Brake Assist System (Fren Destek Sistemi)

BCU : Brake Control Unit (Fren Kontrol Ünitesi)

BLDC : Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım Motoru)

BMS : Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)

BPP : Brake Pedal Position (Fren Pedalı Konumu)

DC : Direct Current (Doğru Akım)

DoD : Depth of Discharge (Deşarj Derinliği)

DoE : U.S. Department of Energy (ABD Enerji Bakanlığı)

EBD : Electronic Brake Force Distribution (Elektronik Fren Kuvveti Dağıtımı)

ECU : Electronic Control Unit (Elektronik Kontrol Ünitesi)

EMB : Electro-Mechanical Brake (Elektromekanik Fren)

ESP : Electronic Stability Program (Elektronik Kararlılık Programı)

İYM : İçten Yanmalı Motor

KERS : Kinetic Energy Recovery System (Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi)

Li-ion : Lityum İyon Batarya

LiPo : Lityum İyon Polimer Batarya

MPC : Model Predictive Control (Model Öngörülü Kontrol)

NiCd : Nikel-Kadmiyum Batarya

NiMH : Nikel-Metal Hidrür Batarya

PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor (Sabit Mıknatıslı Senkron Motor)

SC : Supercapacitor (Süper Kapasitör / Ultra Kapasitör)

SEI : Solid Electrolyte Interphase (Katı Elektrolit Ara Yüzeyi)

SoC : State of Charge (Şarj Durumu / Doluluk Oranı)
SoH : State of Health (Batarya Sağlık Durumu)
TCS : Traction Control System (Çekiş Kontrol Sistemi)
V2I : Vehicle-to-Infrastructure (Araçtan Altyapıya İletişim)
V2V : Vehicle-to-Vehicle (Araçtan Araca İletişim)
YSA : Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ VE KAPSAM

Küresel düzeyde karbon salımının ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması ile enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda elektrikli taşıtlar, otomotiv sektöründeki dönüşümün temel unsurları arasında yer almaktadır. Geleneksel içten yanmalı motorlu taşıtlara kıyasla kullanım sırasında egzoz emisyonu oluşturmamaları ve enerjiyi daha verimli kullanabilmeleri önemli üstünlükleridir. Bununla birlikte çevresel üstünlükleri değerlendirilirken elektriğin üretim biçimi, batarya üretimi ve taşıtın yaşam döngüsü de göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrikli taşıtların yaygınlaşmasını etkileyen teknik konular arasında sürüş menzili, şarj olanakları ve batarya ömrü bulunmaktadır. Bu nedenle enerji yönetimi ve kullanım sırasında ortaya çıkan enerjinin geri kazanılması, elektrikli taşıt teknolojilerinin önemli çalışma alanları hâline gelmiştir (Hamada ve Orhan, 2022; Szumska, 2025).

Elektrikli taşıtların menzilini artırmanın yollarından biri, yavaşlama sırasında taşıtın kinetik enerjisinin bir bölümünü geri kazanmaktır. Geleneksel sürtünmeli frenlerde bu enerji büyük ölçüde fren bileşenlerinde ısıya dönüşerek çevreye yayılır. Rejeneratif frenleme sisteminde ise elektrik motoru, uygun çalışma koşullarında jeneratör gibi davranır; tekerleklerden aktarılan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Üretilen enerji bataryaya veya uygun başka bir enerji depolama birimine yönlendirilebilir. Böylece sonraki hızlanma için dışarıdan sağlanması gereken enerji azalabilir. Ancak frenleme enerjisinin tamamı geri kazanılamaz: Motor ve güç elektroniğindeki dönüşüm kayıpları, bataryanın kabul edebileceği şarj gücü ve güvenli frenleme gereksinimleri geri kazanımı sınırlar (Hamada ve Orhan, 2022; Szumska, 2025).

Burada birbirinden farklı iki enerji konusu açıklığa kavuşturulmalıdır. Rejeneratif frenlemenin temel işlevi frenleme

sırasında ortaya çıkmış ısıyı yeniden elektriğe çevirmek değil, kinetik enerjinin sürtünmeli frenlerde ısıya dönüşmesinden önce bir bölümünü elektrik enerjisi olarak geri kazanmaktır. Bataryanın çalışma sırasında ürettiği ısının yönetimi ise ayrı bir termal yönetim problemidir. Batarya sıcaklığı rejeneratif frenleme açısından yine önemlidir; çünkü geri kazanılan elektriğin bataryaya aktarılması, hücrelerde şarj akımı ve buna bağlı ısıl yük oluşturur. Dolayısıyla enerji kazanımı ile bataryanın sıcaklığını güvenli aralıkta tutma hedefi birlikte değerlendirilmelidir (Huang, Qin ve Peng, 2015; Chidambaram ve ark., 2023).

Rejeneratif frenleme, taşıtın yavaşlatılması sırasında başka koşullarda kaybedilecek mekanik enerjinin yeniden kullanılmasına olanak sağlayan bir enerji dönüşüm ve kontrol sürecidir. Elektrikli ve hibrit taşıtlarda bu süreç, tek başına bir motorun jeneratör modunda çalışmasına indirgenemez. Motor, evirici ve diğer güç elektroniği bileşenleri, enerji depolama birimi, sürtünmeli frenler, sensörler ve kontrol yazılımı birlikte çalışır. Kontrol sistemi sürücünün fren talebini karşılarken rejeneratif frenleme ile mekanik frenleme arasındaki dağılımı belirler. Bu dağılımın amacı yalnızca mümkün olan en yüksek enerjiyi toplamak değildir; öngörülebilir yavaşlama, taşıt kararlılığı ve fren güvenliği de korunmalıdır (Saiteja ve ark., 2022).

Sistemin temel bileşenleri işlevleri bakımından şöyle özetlenebilir. İlk bileşen, frenleme sırasında jeneratör modunda çalışan ve taşıtın hareket enerjisinin bir bölümünü elektrik enerjisine dönüştüren elektrik motorudur. İkinci bileşen, geri kazanılan enerjiyi kabul eden depolama birimidir. Bu birim çoğu elektrikli taşıtta bataryadır; bazı tasarımlarda yüksek güç gereksinimlerini karşılamak üzere süper kapasitör gibi ek depolama elemanları da kullanılabilir. Üçüncü bileşen, frenleme talebini rejeneratif sistem ile sürtünmeli frenler arasında paylaştıran kontrolördür. Araç hızı, pedal konumu, motorun çalışma durumu ve bataryanın şarj durumu gibi verileri sağlayan sensörler ile bu verileri işleyen yazılım ve kontrol üniteleri de sistemin ayrılmaz parçalarıdır (Saiteja ve ark., 2022; Szumska, 2025).

Taşıtın tekerlekleri ile enerji depolama birimi arasındaki enerji akışı, motor kontrol ünitesi ve batarya yönetim sistemi tarafından birlikte düzenlenir. Frenleme sırasında oluşan elektrik enerjisinin bataryaya aktarılabilmesi, yalnızca enerjinin üretilmesine değil, bataryanın o anda bu enerjiyi güvenli biçimde kabul edebilmesine bağlıdır. Bu nedenle batarya yönetim sistemi, rejeneratif frenleme kararının pasif bir alıcısı değil, sınırlarını belirleyen etkin bir unsurudur. Bataryanın şarj durumu, sıcaklığı ve izin verilen şarj akımı değiştikçe aynı sürücünün aynı frenleme talebi için uygulanabilecek rejeneratif fren miktarı da değişebilir. Kullanılamayan frenleme talebi, taşıtın güvenle yavaşlatılması için sürtünmeli frenlerle karşılanmalıdır. Rejeneratif frenleme bu nedenle mekanik frenlerin tüm koşullarda yerine geçen bağımsız bir sistem olarak düşünülmemelidir (Saiteja ve ark., 2022; Chidambaram ve ark., 2023).

Enerji geri kazanımının miktarı sürüş koşullarına göre de farklılaşır. Sık durup kalkılan bir yolculukta yavaşlama olayları daha çok gerçekleşirken, sabit hızda sürdürülen bir yolculukta geri kazanılabilecek fren enerjisi daha sınırlı olabilir. Bununla birlikte frenleme sayısının fazla olması tek başına yüksek sistem verimi anlamına gelmez. Her frenleme olayında taşıtın hızı, istenen yavaşlama, motorun ve güç elektroniğinin çalışma bölgesi, enerji depolama biriminin durumu ve sürtünmeli frenlerin ne ölçüde devreye girdiği belirleyicidir. Bu değişkenler nedeniyle rejeneratif frenlemeyi her araç ve yol için geçerli tek bir verim oranıyla açıklamak yanıltıcı olur. Daha uygun yaklaşım, geri kazanılan enerjiyi belirli bir sürüş çevrimi ve açıkça tanımlanmış bir enerji hesabı içinde değerlendirmektir (Hamada ve Orhan, 2022; Szumska, 2025).

Rejeneratif frenlemenin bataryaya etkisi, bu kitabın merkezindeki sorudur. İlk bakışta bataryanın frenleme sırasında yeniden şarj edilmesi, dışarıdan gereken enerjiyi azaltacağı için bütünüyle olumlu görünebilir. Gerçekte ise batarya, taşıtın hızlanma ve yavaşlama döngüsü boyunca değişken deşarj ve şarj akımlarına maruz kalır. Frenleme sırasında ortaya çıkan kısa süreli şarj darbeleri, bataryanın elektriksel ve termal çalışma koşullarını

değiştirir. Bu darbelerin yaşlanma üzerindeki etkisi, yalnızca akımın büyüklüğünden değil; sıcaklık, şarj durumu, şarj süresi, hücre özellikleri ve kullanım geçmişi gibi etkenlerden de etkilenir (Keil ve Jossen, 2017; Chidambaram ve ark., 2023).

Özellikle lityum iyon bataryalarda yüksek şarj akımı, düşük sıcaklık ve yüksek şarj durumu bir araya geldiğinde istenmeyen yaşlanma mekanizmalarının değerlendirilmesi gerekir. Bununla birlikte, rejeneratif frenlemenin batarya ömrünü mutlaka kısalttığı sonucuna varmak doğru değildir. Keil ve Jossen'in (2017) temsilî bir dinamik sürüş profiline dayalı deneysel yaşlanma çalışmasında, incelenen koşullarda rejeneratif frenlemenin çevrim derinliğini azaltarak kapasite kaybı ve iç direnç artışını sınırladığı bildirilmiştir. Ancak bu sonuç, rejeneratif şarj akımlarının her batarya kimyasında ve her çalışma koşulunda zararsız olduğu biçiminde genellenmemelidir. Batarya üzerindeki net etki; sıcaklık, şarj durumu, akım profili ve bataryanın özellikleri gibi etkenlere bağlıdır. Bu nedenle temel soru, rejeneratif frenlemenin bataryaya mutlak olarak zarar verip vermediğinden çok, enerji geri kazanımı ile batarya yaşlanması arasındaki dengenin hangi koşullarda yönetilebileceğidir (Keil ve Jossen, 2017; Chidambaram ve ark., 2023).

Batarya sıcaklığı, söz konusu dengenin önemli bir boyutudur. Rejeneratif frenlemeden elde edilen şarj akımı bataryada ısı oluşumunu etkileyebilir; sıcaklıktaki değişim ise bataryanın davranışını ve izin verilebilir şarj gücünü yeniden belirler. Dolayısıyla frenleme kontrolü ve batarya termal yönetimi birbirinden ayrı ele alınmamalıdır. Huang, Qin ve Peng'in (2015) simülasyon temelli çalışması, rejeneratif frenleme oranının ve buna bağlı şarj akımının kontrol edilmesiyle batarya sıcaklık artışının sınırlandırılabileceğini incelemiştir. Ancak bir simülasyonda elde edilen iyileşme, her batarya kimyası, araç mimarisi ve iklim koşulu için aynı sonucun alınacağı anlamına gelmez. Bu nedenle bataryaya ilişkin değerlendirmelerde kullanılan modelin, sürüş çevriminin ve sıcaklık koşullarının açıkça belirtilmesi gerekir.

Bataryaya aktarılan kısa süreli güç taleplerinin yönetiminde farklı depolama düzenleri de gündeme gelmektedir. Batarya ile süper kapasitörün birlikte kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemleri, yüksek güç gerektiren anlarda yük paylaşımına olanak verebilir. Böyle bir düzen, frenleme enerjisinin bir bölümünü bataryaya doğrudan yönlendirmek yerine farklı bir depolama elemanında karşılayarak sistem tasarımına esneklik kazandırır. Bununla birlikte ek bileşenler; maliyet, ağırlık, kontrol ve sistem karmaşıklığı bakımından yeni ödünleşimler yaratır. Bu sebeple bir çözümün yararlılığı, tek bir bileşenin performansından çok tüm taşıt sistemindeki kazanım ve maliyetler üzerinden değerlendirilmelidir (Szumska, 2025).

Kontrol algoritmaları bu ödünleşimlerin yönetilmesinde belirleyici rol oynar. Frenleme talebine verilen yanıt, enerji geri kazanımı ile sürüş güvenliğini aynı anda gözetmelidir. Literatürde bulanık mantık, uyarlamalı kontrol, kayma kipli kontrol ve model öngörülü kontrol gibi farklı yaklaşımlar ele alınmıştır. Bu yöntemlerin ortak hedefi, araç hızına ve frenleme koşullarına göre enerji geri kazanımını düzenlerken fren performansını korumaktır. Ancak daha gelişmiş bir algoritmanın kullanılması tek başına daha iyi bir taşıt sistemi elde edildiğini göstermez. Hesaplama gereksinimi, sensör verisinin güvenilirliği, farklı yol koşullarındaki dayanıklılık ve batarya üzerindeki etkiler de uygulama açısından önemlidir (Saiteja ve ark., 2022; Szumska, 2025).

Bu çerçevede rejeneratif frenleme, yalnızca “kaybolan enerjiyi geri alma” yöntemi olarak değil, taşıt dinamiği, güç elektroniği, enerji depolama ve batarya yönetimini birleştiren bir sistem olarak incelenmelidir. Geri kazanılan enerji arttığında menzil açısından kazanç elde edilebilir; fakat bu kazancın bataryanın izin verilen çalışma sınırları ve güvenli frenleme gereksinimleri pahasına sağlanmaması gerekir. Öte yandan rejeneratif frenlemenin batarya ömrüne etkisi tek yönlü değildir: Şarj darbeleri ve sıcaklık koşulları olası yaşlanma yükleri oluştururken, daha düşük çevrim derinliği batarya ömrü bakımından yarar sağlayabilir. Bu iki etkinin birlikte ele alınması, sistemin gerçek katkısını anlamak için gereklidir (Keil ve Jossen, 2017; Chidambaram ve ark., 2023).

Bu çalışmada elektrikli ve hibrit taşıtlarda kullanılan rejeneratif frenleme sistemlerinin türleri, çalışma ilkeleri, kontrol algoritmaları ve batarya üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Öncelikle rejeneratif frenleme ile sürtünmeli frenleme arasındaki işlevsel farklar açıklanacak; ardından enerji geri kazanımını belirleyen taşıt, yol ve kontrol koşulları değerlendirilecektir. Daha sonra frenleme sırasında bataryada oluşan şarj akımları, sıcaklık değişimleri ve yaşlanma ile ilişkili olası etkiler tartışılacaktır. Farklı sürüş koşullarında elde edilen enerji kazanımının, batarya ömrü ve frenleme güvenliğiyle birlikte yorumlanması amaçlanmaktadır. Son olarak enerji yönetimi, batarya teknolojisi ve otomotiv elektroniği arasındaki ilişki üzerinden mevcut uygulamalara yönelik çözüm yaklaşımları ve araştırma gereksinimleri ortaya konacaktır.

2. FİZİKSEL TEMELLER VE SİSTEM MİMARİSİ

2.1. Tarihçesi

Kinetik enerjiyi geri kazanma yani potansiyel enerjiye dönüştürme fikri ilk olarak 1800'lerde ortaya atıldı ve genellikle at arabalarına entegre edilen yaylı tipler kullanıldı. 1886'da Frank J. Sprague tarafından kurulan Sprague Elektrikli Demiryolu ve Motor Şirketi, sabit fırçalı, sabit hızlı, kıvılcım çıkarmayan motor ve rejeneratif frenleme olarak iki önemli buluşu tanıttı (Hamada ve Orhan, 2022; Anonim-A, 2025).

Karayolu taşıtlarında bu sistemin ilk örnekleri, 1890'larda Paris'te Louis Antoine Krieger tarafından atlı taksilerin önden çekişli modellerinde denendi. Krieger elektrikli kara aracının ön tekerleklerinde, rejeneratif frenleme için ikinci bir dizi paralel sargılı tahrik motoru kullandı. Birinci Dünya Savaşı sırasında İngiltere'de tanıtılan Orwell elektrikli kamyonu, sürücü tarafından devreye alınan rejeneratif frenlemeyi kullanıyordu ve sonrasında 1900'lerin başında tramvay işletmecilerine otomatik rejeneratif kontrol tanıtıldı. Bu sistemde vagonların hızını yavaşlatan veya yokuş aşağı inişlerde kontrolü elinde tutan motorlar, jeneratör görevi yaparak vagonların frenlenmesini sağlıyordu. Tramvay vagonlarında ayrıca elektrikli fren sistemlerinin arızalanması durumunda tramvayı durdurabilecek tekerlek frenleri ve paletli kızak frenleri de vardı. Rawtenstall'da yaşanan ciddi bir kazanın ardından 1911'de bu çekiş sistemi yasaklandı ve rejeneratif fren sistemi yirmi yıl sonra yeniden kullanılmaya başlandı. Rejeneratif frenleme sistemi, yüzyılı aşkın süredir demiryollarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakü-Tiflis-Batum demiryolu (Transkafkasya Demiryolu) 1930'ların başında rejeneratif frenlemeyi kullanmaya başladı. Bu özellikle dik ve tehlikeli Surami geçidinde etkili ve faydalı bir sistem olarak kullanılmaktadır.

İskandinavya'daki elektrikli demiryolu, bugüne kadar demir cevherini İsveç'in kuzeyinde yer alan Kiruna'daki madenlerden

Norveç'in Narvik limanına kadar dik kademeli bir rotada taşır. Narvik'e giden demiryolu vagonları binlerce ton demir cevheriyle doludur ve bu trenler, maksimum 750 kN'luk geri kazanılmış frenleme kuvvetiyle, rejeneratif frenleme yaparak büyük miktarlarda elektrik enerjisi üretir. Narvik limanına kadar, trenler yeniden geri kazandıkları gücün yalnızca beşte birini kullanabilirler. Geri kalan enerji şehir şebekesine aktarılarak ekonomi sağlanır.

Elektrikli otomobiller imal edilmeye başlandıklarından bu yana rejeneratif frenlemeyi kullanıyorlar ve özellikle 1970'lerden sonra elektronikteki gelişmelere paralel olarak sürücüler tarafından kullanılırlıkları ve verimlilikleri arttı. Günümüzde sürücü ayağını fren pedalından çektiğinde ve/veya fren pedalına bastığında veya yokuş aşağı giderken fren pedalına basmadan rejeneratif frenleme etkisini artıran-azaltan sistemler kullanılmaktadır. Pek çok modern hibrit ve elektrikli taşıt, bataryayı otomatik olarak şarj edebilen ve taşıtın menzilini artıran bu teknolojiyi kullanıyorlar. Geri kazanılan enerjiyi depolamak için batarya yerine ultra veya süper kapasitörler (büyük kondansatör), volan, yay ve hidrolik-pnömatik sistemler de kullanılmaktadır. Bu sistemlerden ileriki bölümlerde bahsedilmiştir.

2.2. Rejeneratif Frenleme Sistemi

Günümüzde taşıtlarda kullanılan fren sistemlerinin büyük bir kısmı hidrolik sistemle çalışmaktadır. Bu sistemlerde, frenleme sırasında balatalar ile disk yüzeyi arasındaki temasta yüksek ısı açığa çıkmasıyla oluşan enerji dönüşümü sayesinde taşıtın yavaşlaması sağlanır. Frenleme sistemi taşıtın sadece yavaşlatılmasını sağlarken taşıtın durması veya durdurulması lastik ile yol arasındaki sürtünme katsayısına bağlıdır. Sonuç olarak ısı sebebiyle fren sisteminin performansı olumsuz etkilenir ve bu süreçte ortaya çıkan enerji çevreye salınarak boşa gider. Bu da enerji verimliliği açısından dezavantaj yaratmaktadır. Bu durum, sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu hedefleri doğrultusunda önemli bir sınırlama olarak görülmüş ve daha önce trenlerden elde edilen

bilgi ve tecrübe sayesinde kara taşıtlarına rejeneratif frenleme sistemlerinin entegre edilmesini sağlamıştır.

Rejeneratif frenleme sisteminin amacı taşıtın yavaşlatılması işlemi sırasında mümkün olduğunca fazla kinetik enerjiyi geri kazanmak olsa da frenleme stabilitesi ve performansı yanında taşıtın güvenli ve konforlu bir şekilde yavaşlatılabilmesi hayati önem taşır.

Birleşmiş Milletler Örgütü Avrupa Ekonomik Komisyonu'nun 13 No'lu Uyumlaştırılmış Uluslararası Frenleme Yönetmeliği (UN/ECE R13H) tarafından M1 kategorisindeki Karayolu Araçları (sürücü koltuğuna ek olarak en fazla sekiz koltuklu, yolcu taşımacılığında kullanılan araçlar) için konulan kurallarda frenleme işlemlerinin güvenli bir şekilde uygulanması için özel olarak belirlenmiş ve frenleme güvenliği ile stabilite, rejeneratif frenleme sistemlerini değerlendirmede temel kriterlerdir. Fakat yeterli araç stabilitesi ve kontrolü sağlanırken aynı anda verimli rejeneratif frenleme elde etmek oldukça zor bir iştir. Bunun nedeni, rejeneratif frenleme sistemi işlemlerinin Şekil 1'de gösterildiği gibi taşıt özellikleri, rota özellikleri ve trafik koşulları gibi birden fazla faktörden etkilenmesidir.

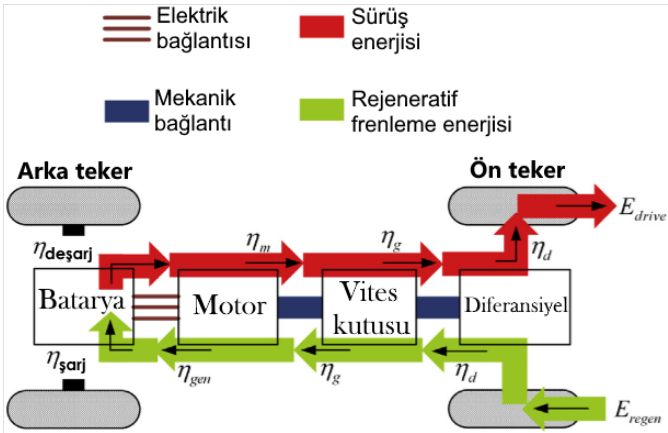


Şekil 1. Fren enerjisi üretimini etkileyen faktörler (Hamada ve Orhan, 2022).

Çevresel koşullar, taşıt ve yolun özellikleri, trafik durumu, iklim koşulları vb. gibi şartlar, aktarma organları bileşenlerinin operasyonel verimliliğini ve aracın dinamik davranışını etkiler ve bu da rejeneratif verimliliği doğrudan etkiler. Bunların dışında enerjinin depolandığı birim bile verimi etkiler. Düşük ortam sıcaklıkları, özellikle lityum iyon pillerin verimliliğini azalttığından frenleme sırasında geri kazanılan enerjinin depolanma kabiliyetini azaltır. Araştırmalar rejeneratif fren sisteminde hem düşük hem de yüksek ortam sıcaklıklarının, enerji geri kazanımını (regen) ve genel performansı olumsuz etkilediğini göstermiştir (Hamada ve Orhan, 2022). Bunlardan ileriki bölümlerde detaylıca bahsedilecektir.

Rejeneratif frenleme sistemiyle donatılmış bir elektrikli taşıt için itme ve rejeneratif frenlemeyi içeren çift yönlü enerji akışı Şekil 2'de gösterilmiştir. Normal sürüş esnasında bataryadan tekerleklere doğru olan enerji akışı frenleme esnasında terse

dönerek bataryaya doğru olur ve gerekirse batarya şarj edilir. Mekanik ve elektriksel kayıplar sebebiyle bataryanın enerjisinin tamamı tekerleklere aktarılamadığından aynı yolu kullanan rejeneratif frenlemede de frenleme enerjisinin tamamı kayıplar sebebiyle bataryaya aktarılamaz. Rejeneratif frenleme sistemlerinde özellikle fırçasız doğru akım (BLDC) ve sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2015; Vasiljević ve ark., 2022).



Şekil 2. Rejeneratif frenleme enerji akış diyagramı (Chen ve ark., 2015)

Fren uygulandığında, rejenerasyon sistemi elektrik motorunu ters yönde çalıştırarak jeneratör modunda çalıştırır, tork ve enerji akış yönünü tersine çevirir. Negatif tork uygulanan tekerlekler elektrik üretilmesini (mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür) sağlayarak doğru akımla (DC) batarya şarj edilir (Şekil 2-Yeşil çizgi). Bataryaya aktarılan enerji, Batarya Yönetim Sistemi (BMS) tarafından kontrol edilir. Rejeneratif frenlemenin yoğunluğu, geri kazanılan enerji miktarını sınırlayabilecek çok sayıda faktörden etkilenir. Bunlar, şarj durumu (SoC), ortam sıcaklığı ve şarj hızı gibi bataryayla ilgili parametreleri içerir. Ayrıca elektrik motorunun gücü, hızı, torku ve verimliliği de önemlidir (Munaaf ve ark., 2024).

Elektrikli taşıtlardaki hidrolik frenleme sistemi özellikle ani duruş gibi yüksek frenleme gerektiren durumlarda kullanılırken,

rejeneratif sistemler daha çok şehir içi yoğun trafikte ve yokuş aşağı yollarda etkin olmaktadır. Bu durum, enerji verimliliğini artırmakta, mekanik fren bileşenlerinin ömrünü uzatmakta ve enerji geri kazanımına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, rejeneratif frenleme sistemlerinin etkinliği; sürüş koşulları, batarya durumu ve sistem kontrol algoritmalarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle son yıllarda çift kontrollü (dual control) frenleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde rejeneratif ve mekanik frenleme gerçek zamanlı verilere göre birlikte çalışarak güvenli sürüş ve maksimum enerji geri kazanımı hedeflenmektedir (Gulhane ve ark., 2024).

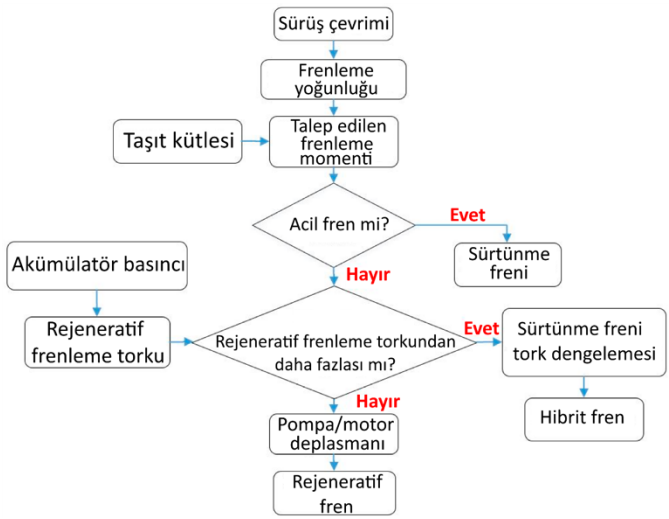
3. FREN HARMANLAMA VE KONTROL

3.1. Kontrol Girdileri ve Çalışma Koşulları

Yapılan bir çalışmada elektrikli taşıtın dik bir yokuşu çıkarken 72 kW'lık güç tükettiği, aynı yokuşu inerken ise elektrik motorunun jeneratör olarak çalışmasıyla 24 kW'lık bir gücü bataryaya aktardığı ve yakıt tüketimini %10-25 oranında azaltılabileceği bilimsel çalışmalarda belirtilmiştir (Küçükaydın, 2024; Lampton, 2024).

Bu sayısal değerlerin elde edilebilmesi için rejeneratif frenlemenin devreye girmesi ve bunun için de bir dizi koşulun eş zamanlı olarak sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar, sensörler yardımıyla algılanan verilerin Fren Kontrol Ünitesi'deki (Brake Control Unit, BCU) algoritma tarafından değerlendirilmesi için kullanılır. Şartların sağlanamaması durumunda sistem otomatik olarak hidrolik (sürtünmeli) frenlemeye geçer. Enerji kontrol stratejisi, enerji geri kazanım oranını doğrudan etkiler ve sürüş durumuna göre gerekli frenleme torkunun hesaplanmasını, akümülatörün basıncına göre hidrolik frenleme torkunun hesaplanmasını, pompa/motor için hedef torku ve diğer modüler değerleri içerir. Enerji kontrol stratejisinin akış şeması genel haliyle Şekil 3'te gösterilmiştir. İlk olarak, mevcut sürüş koşullarına göre gerekli frenleme torku hesaplanarak frenleme modu değerlendirilir ve kontrol ünitesi tarafından karar verilir. Bu kısımda birçok sensörden gelen veriye göre BCU, gerekli hesaplamaları yaparak hangi eyleyiciye yani komut göndereceği sistem parçasına hangi bilgiyi göndereceğini belirler. Bilgi yani emir gönderilen eyleyici gelen bilgiye göre hareket ederek sistemin çalışmasına katkı sağlar. Sensörlerden gelen bilgi değerlendirildikten sonra frenleme modu acil durum freni olmalıysa (BCU algoritmaya göre belirliyor), güvenliği sağlamak için BCU hidrolik sürtünme frenlerini aktif hale gelmesi için fren hidrolik sistem basıncının arıtılması emrini verir. Aksi takdirde, hedef tork rejeneratif frenleme torku ile karşılaştırılır. Hidrolik

rejeneratif frenleme sistemlerinde taşıt yavaşlarken tekerleklerden alınan mekanik enerji, pompa-motor aracılığıyla hidrolik akümülatörde basınçlı enerji olarak depolanır. Taşıt hızlandığında bu enerji, pompa-motorun motor modunda çalışmasıyla tahrik sistemine geri aktarılabilir. Rejeneratif sistem talep edilen fren torkunu karşılayamadığında, eksik tork sürtünmeli servis frenleriyle sağlanır. Hidrolik akışkanın sıkıştırılamaz olması tek başına arıza durumunda fren güvenliğini garanti etmez; güvenlik, sistemin tasarımına ve bağımsız frenleme düzeneklerine bağlıdır. Uygun tasarlanmış bir hidrolik hibrit sistem enerji verimliliğini artırabilir; bu katkı taşıtın ve kullanım koşullarının özelliklerine göre değişir (Xu, He ve Shen, 2019).



Şekil 3. Enerji kontrol stratejisinin akış şeması (Xu, He ve Shen, 2019)

Rejeneratif frenleme sisteminin çalışma durumu çeşitli sensörlerden gelen verilere göre Şekil 3'teki akış şemasına uygun olarak kontrol ünitesi tarafından değerlendirilerek belirlenir. Rejeneratif frenlemenin uygulanma düzeyi, sürücünün yavaşlama talebi ile motorun, bataryanın ve fren sisteminin anlık çalışma koşullarına göre belirlenir. Bu koşullardan biri enerji geri kazanımını sınırlandırdığında kontrol sistemi rejeneratif frenleme torkunu azaltabilir veya gerektiğinde devre dışı bırakabilir; güvenli

yavaşlama için gereken ek frenleme kuvveti sürtünmeli frenlerle sağlanır. Sistemin hangi durumda ve ne kadar süreyle yalnızca sürtünmeli frenlemeyi kullanacağı, taşıtın kontrol stratejisine bağlıdır. Rejeneratif frenlemeyi etkileyen başlıca çalışma parametreleri şunlardır (Gao, Chu ve Ehsani, 2007; Ehsani, Gay ve Emadi, 2018; Erdem ve Tacı, 2018; Xu, He ve Shen, 2019; Saiteja ve ark., 2022; Zhang ve ark. 2022; Chidambaram ve ark., 2023):

Fren pedalına basma hızı (İvme Şiddeti): Fren kontrol sistemi, sürücünün fren talebini pedal konumu, pedala uygulanan kuvvet veya fren hidrolik basıncı gibi girdilerden belirler; taşıt hızı, tekerlek hızları, yol-tutuş koşulları ve bataryanın şarj kabul sınırları gibi bilgileri de değerlendirir. Pedala hızlı veya kuvvetli basılması yüksek frenleme talebine işaret edebilir; ancak rejeneratif ve sürtünmeli frenlerin nasıl paylaştırılacağı taşıtın kontrol stratejisine bağlıdır. Bu nedenle hızlı pedal hareketi her araçta rejeneratif frenlemenin devre dışı kalacağı, yavaş pedal hareketi ise mutlaka rejeneratif frenleme uygulanacağı anlamına gelmez. Frenleme sırasında taşıtta oluşan boylamsal yavaşlama ivmesi, m/s² cinsinden ifade edilir; karşılaştırmayı kolaylaştırmak için bu değer yerçekimi ivmesine, $g_0 \approx 9{,}81$ m/s^2, bölünerek g cinsinden de belirtilebilir. Burada g kuvvet birimi değil, ivmenin yerçekimi ivmesine oranıdır. Örneğin 70 kg kütleli bir sürücünün bulunduğu otomobilin yatay ivmesinin büyüklüğü 2g ise, sürücünün ivmesine karşılık gelen net yatay kuvvet $F = m.a$ bağıntısıyla yaklaşık 70 x 2 x 9,81 = 1.373 N olur. Bu, sürücünün kütlesinin veya yerçekiminden kaynaklanan ağırlığının iki katına çıktığı anlamına gelmez; sürücünün maruz kaldığı yatay ivme ve buna karşılık gelen kuvveti ifade eder. Frenleme sırasında sürücünün hissettiği yükün yönü ve büyüklüğü, yavaşlama ivmesinin yanı sıra emniyet kemeri ve koltuk gibi temas noktalarının uyguladığı kuvvetlere de bağlıdır. Bir otomobilin duruştan 100 km/h hıza sabit ivmeyle çıktığı varsayılırsa ortalama ivme, hızlanma süresi sırasıyla 10, 5 ve 2 saniye olduğunda yaklaşık 0,28g, 0,57g ve 1,42g olur. Gerçek sürüşte ivme, hızlanma boyunca sabit olmayacağından bunlar yalnızca ortalama değerlerdir. İvmenin sürücü tarafından nasıl hissedildiği ise

büyüklüğünün yanı sıra yönüne ve ne kadar sürdüğüne bağlıdır. Formüla-1 pilotları virajlarda ve frenlemede –4g ila –5g değerinde kuvvetlere maruz kalabilir. Şehir içi seyahatte kontrollü yavaşlama yapılırken fren pedalına yavaşça basıldığından (–0,1g) - (–0,3g), normal frenlemede (–0,3g) - (–0,5g) ve ani frenlemede (–0,6g) - (–0,9g) frenleme kuvveti oluşur. Bu değerler, lastik ile yolun fiziksel durumuna, lastiklerin yol tutuşuna, taşıt kütlesine, ağırlık dağılımına ve fren sisteminin özelliklerine göre değişebilir. (–0,1g) ile (–0,3g) frenleme ivmesinde elektrik motoru fren torkunu en yüksek oranda karşılarken –0,4g'den sonraki değerler rejenerasyon kapasitesini aşar ve elektronik kontrol ünitesi sürtünme frenlerinin devreye girmesini sağlar. Kontrol ünitesi, regen ile sürtünme frenini harmonize ederek maksimum geri kazanımı hedefler. Gerekli yavaşlama –0,7g'den büyük olduğunda yalnızca mekanik frenleme kullanılır. Hem mekanik hem de rejeneratif fren sistemleri (–0,1g) ile (–0,7g) arasında çalıştırılırlar. (Bu değerler belirli bir taşıta ve onun kontrol ayarlarına özgüdür; tüm taşıtlar için geçerli sabit değerler olarak yorumlanmamalıdır)

Pedal hareket miktarı: Pedal hızını ölçen sensör pedal hareket miktarını da ölçerek sürücünün uygulamak istediği fren kuvvetinin kontrol ünitesinde hesaplanmasını sağlar. Eğer pedal hareketi belirli değerden fazlaysa sistem bu durumu yüksek frenleme talebi olarak algılar ve yine hidrolik frenleme aktif edilir. Aksi durumda rejeneratif frenleme için ikinci şart sağlanmış olur.

Batarya doluluk oranı (State of Charge, SoC): SoC, batarya yönetim sistemi tarafından tahmin edilerek izlenir. SoC, rejeneratif frenleme sırasında bataryanın kabul edebileceği şarj gücünün belirlenmesinde kullanılan parametrelerden biridir. Batarya yüksek doluluk düzeyindeyken kontrol sistemi, bataryanın çalışma sınırlarını korumak için geri kazanılan enerjiyi ve rejeneratif frenleme torkunu azaltabilir; gerekli ek yavaşlama sürtünmeli frenlerle sağlanır. Bununla birlikte rejeneratif frenlemenin %80 SoC altında mutlaka etkinleştiği, %80–95 arasında azaltıldığı veya %95–100 arasında her taşıtta iptal edildiği söylenemez. Uygulanacak sınırlar ortam sıcaklığına, batarya kimyasına, hücre sıcaklığına ve BMS/taşıtın kontrol stratejisine bağlıdır. Dolayısıyla

SoC değeri, rejeneratif frenlemeye izin veren tek başına yeterli bir üçüncü şart olarak değil, diğer çalışma parametreleriyle birlikte değerlendirilmelidir (Keil ve Jossen, 2017; Chidambaram ve ark., 2023).

Batarya sıcaklığı: Daha önce de belirtildiği şekilde özellikle düşük ortam sıcaklıkları bataryaların çalışma performansını kötü etkiler. Bataryalar teknolojilerine ve yapımında kullanılan materyallerin özelliklerine göre farklı sıcaklık aralıklarında iyi performans gösterirler. Mesela, Li-ion (Lityum iyon) bataryalar 20–40 °C, NiMH (Nikel-Metal Hidrür) bataryalar ise 0-45 °C ortam sıcaklıklarında iyi performans gösterirler. Fakat ortam sıcaklığı 10 °C'nin altına düşmeye başlamasıyla batarya, şarj için akımı kabul etmemeye başlar. Ayrıca, batarya sağlığı (State of Health, SoH), da şarj alma kapasitesini etkiler. Bataryanın o anki performansının üretildiği andaki durumuna göre ne kadar iyi olduğunu gösteren bir ölçüt olan SoH, yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Bataryaların özellikle yüksek hızlı şarj ile sık sık şarj edilmeleri ve yaşı, SoH değerinin kötüleşmesine sebep olur yani esasında bataryada oluşan iç dirençle daha zor ve az şarj olur.

Elektrik motorunun tork kapasitesi: Son aşamada, elektrik motorunun mevcut devir sayısındaki tork üretim kapasitesi değerlendirilir. Düşük devirlerde daha verimli çalışan elektrik motoru, yüksek devirlerde yeterli torku sağlayamazsa sistem frenleme ihtiyacını karşılayamayacağına karar verir ve hidrolik frenlemeye geçilir. Ancak tork yeterliyse dördüncü şart da sağlanmış olur ve rejeneratif frenleme gerçekleşir (Xu, He ve Shen, 2019).

Taşıt sürati: İnvertör minimum frekans sınırları nedeniyle uygulanan geri kazanım torku sınırlı olduğundan taşıt sürati <10 km/h olduğunda rejeneratif sistem çalıştırılmaz. 20–50 km/h sürat aralığında elektrik motoru kendi verim haritasında tepe noktasına yakın değerlerde çalıştığından en yüksek rejenerasyon sağlanır. 60 km/h süratten yüksek değerlerde taşıtın aerodinamik ve rulman kayıpları arttığından net enerji geri kazanımı azalır.

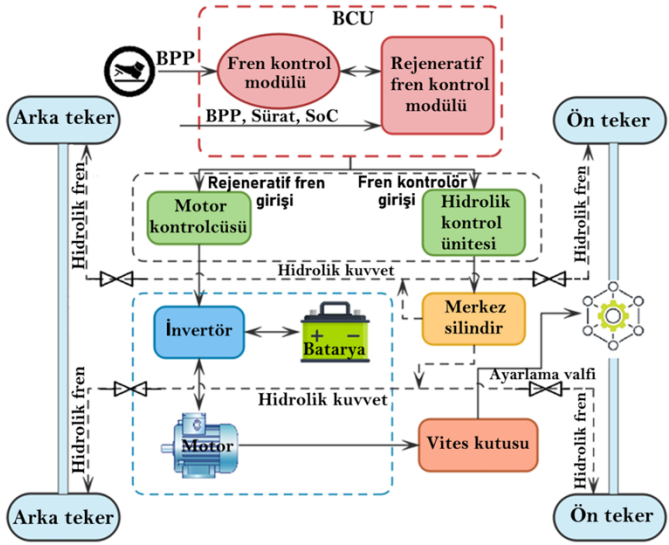
Elektrik motoru ve donanım: Düşük–orta devirlerde (rpm) motorun tork-verim eğrisi bu bölgede zirve yaptığından regen olayı iyileşir. Ayrıca invertör, DC-link, batarya gibi donanımların iyi soğutulması performansı artırır. Tek pedal sürüş modunun aktif olması veya rejeneratif frenleme seviyelerinin ayarlanabilmesi sayesinde sürücü fren pedalına dokunmadan regen oranını maksimize edebilir.

Yol ve arazi koşulları: Hafif eğimli inişlere sahip yollarda taşıt, daha uzun süreli ve sabit regen imkânı bulur. Yoğun trafikte sık ve yumuşak yavaşlamalar, toplam regen değerini ve yakıt ekonomisini yükseltir. Kaygan veya aşırı kuru zeminde yol-lastik arasındaki tutunma kötü etkileneceğinden regen kapasitesi sınırlanabilir; bu şartlarda EBD/ABS entegrasyonu kritik öneme sahip olur.

Elektrikli araçlardaki rejeneratif fren sistemleri, çalışma koşulları, rota özellikleri ve kinematik parametreler tarafından toplu olarak belirlenen enerji geri kazanım seviyeleri sergiler. En yüksek verimlilik genellikle değişken eğimli rotalarda, ılıman hava koşullarında ve sık, hafif frenleme manevraları ile yumuşak sürüş sırasında gözlenir. Bununla birlikte, aşırı sıcaklıklar, engebeli arazi ve otoyol sürüşü gibi zorluklar, enerji geri kazanımı potansiyelini sınırlar. Gelecekteki araştırmalar, değişen operasyonel koşullara uyum sağlayabilen daha gelişmiş rejeneratif sistemler geliştirmeyi ve çevresel ve kinematik verileri entegre etmeye öncelik olmalıdır (Szumska, 2025).

3.2. Fren Harmanlama ve Kontrol Stratejileri

Mevcut geleneksel içten yanmalı motorlu taşıtların çoğunda fren sistemleri için kontrol stratejileri ABS (Anti-Lock Brake System), ASR (Anti Spin Regulation), TCS (Traction Control System), ESP (Electronic Stability Program), EBD (Electronic Brake Force Distribution), BAS (Brake Assist System) vb. gibi yardımcı sistemlerle birlikte çalışmaktadır.



Şekil 4. Elektrikli taşıtlarda frenleme sisteminin genel yapısı (Saiteja ve ark., 2022)

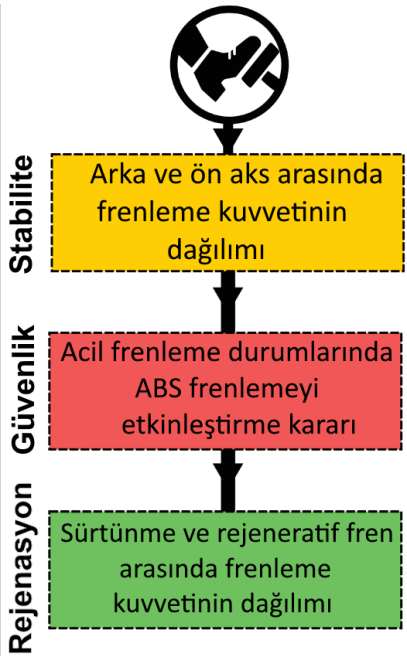
Sürücü frene bastığında fren pedalına basma hızı, pedal ilerleme miktarı (Brake pedal position, BPP), yol ve araç durumu, tekerlek ve motor devirleri gibi kriterler elektronik kontrol sistemi tarafından değerlendirilerek taşıtın güvenli şekilde yavaşlatılması veya durdurulması sağlanır. Elektrikli ve hibrit taşıtlarda ise enerji verimliliği de hesaba katıldığından rejeneratif frenleme işlemi içten yanmalı motorlu taşıtlardakinden çok daha fazla bileşenli ve karmaşık bir sistem haline gelmiştir. Şekil 4'te elektrikli taşıtlardaki frenleme sisteminin genel bir yapısı görülmektedir (Saiteja ve ark., 2022).

Rejeneratif frenleme, aracı güvenli bir şekilde durdurmak veya gerektiğinde hızlı şekilde yavaşlatmak için tek başına yeterli değildir. Bu nedenle, sürtünmeli veya hidrolik frenleme gibi başka bir frenleme sistemiyle birlikte kullanılır. Frenleme sırasında ve sonrasında sürücünün talebine bağlı olarak her iki fren sistemi de kullanılabilir ve bu nedenle fren kuvveti dağılımı için uygun bir kontrol sistemine ihtiyaç vardır. Bu komutları verimli bir şekilde yerine getirmek için, farklı kontrol stratejileri veya algoritmalar (Bulanık mantık, Yapay sinir ağları (YSA), Doğrusal olmayan

model kestirimci kontrol (NMPC), Model tahmine dayalı kontrol (MPC), kayma kipli kontrol, Dinamik programlama algoritmaları (DP), Kooperatif kontrol algoritması, Genetik algoritma (GA), H∞ vb. gibi) mevcuttur. Elektromekanik Fren (Electro-Mechanical Brake, EMB) sistemleri, hidroliği ortadan kaldırarak ve yerine elektrikli bileşenler kullanarak geleneksel hidrolik fren sistemlerinin yerini almaktadır. Genelde, rejeneratif frenleme torku ve EMB torku, sürücünün talebine, elektrik motorunun özelliklerine, akünün SoC değerine (şarj durumu) ve aracın hızına göre belirlenebilir. Rejeneratif frenleme gücü, sürücünün amaçladığı frenleme gücünden daha büyük olduğunda, fren sistemi yalnızca rejeneratif frenleme torkunu üretir. Bu durumda, Fren Kontrol Ünitesi (BCU), geleneksel bir araçtakine benzer bir fren hissi sağlamak için rejeneratif frenleme torkunun büyüklüğünü motor/jeneratörün rejeneratif elektrik gücünü kontrol ederek yapabilir (Saiteja ve ark., 2022; Shepard, 2023).

Şekil 5'te görüldüğü gibi rejeneratif fren sisteminin kontrol mimarisi, fren kontrolörü, rejeneratif fren kontrolörü ve fren kontrol stratejileri vb. gibi çeşitli alt sistemlere sahiptir. Fren kontrolörü, taşıtta bulunan çeşitli sensörlerden tekerlek hızı, fren pedalı konumu (BPP), SoC, motor, batarya ve diğer araç girdileri gibi çok sayıda gerçek zamanlı girdiyi yani sensörden gelen veriyi alır. Bu girdiler, taşıt için gereken frenleme kuvvetini, araç durumunu, fren durumunu vb. tahmin etmek için kullanılır. Fren kontrolörü yalnızca tekerleklerin hızını izlemekle kalmaz, aynı zamanda bataryaya geri beslenecek elektriği üretmek için ne kadar torkun (dönme kuvveti) mevcut olduğunu da hesaplayabilir. Frenleme işlemi sırasında, fren kontrolörü motor tarafından üretilen elektriği bataryaya veya ultra/süper kapasitörlere yönlendirir. Bataryaya optimum miktarda güç ulaşmasını sağlarken, aynı zamanda elektrik girişinin bataryanın kaldırabileceğinden fazla olmamasını da sağlar. Ancak fren kontrolörünün en önemli işlevi, elektrik motorunun taşıtı etkili şekilde yavaşlatmak için gereken kuvveti kaldırabilecek kapasitede olup-olmadığına karar vermektir. Eğer kaldıramıyorsa, fren kontrolörü yavaşlatma işini sürtünmeli frenlere aktararak elektrik

motorunun bozulmasını önler (Saiteja ve ark., 2022; Lampton, 2024).



Şekil 5. Rejeneratif frenleme sistemindeki temel hedefler (Hosseini ve ark., 2023)

Rejeneratif frenleme sırasında akünün aşırı şarj edilmesi, akünün dayanıklılığını azaltır. Bu nedenle, akünün SoC değeri %50-70 aralığında olduğunda, kontrol ünitesi en yüksek rejeneratif torku uygular; ancak SoC değeri %80'in üzerinde olduğunda rejenerasyon işlemi daha önce de bahsedildiği gibi yavaşlar (Shepard, 2023).

Rejeneratif frenleme algoritması, ölçüm sensörlerinden gelen sinyallere dayalı olarak çalışır ve frenleme yoğunluğu, Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU) tarafından gerçekleştirilen gerçek zamanlı hesaplamalarla belirlenir (Szumska, 2025).

Frenleme olaylarında aracın güvenliğini ve stabilitesini garanti altına almak ve rejeneratif frenlemeyi en üst düzeye çıkarmak için güvenilir bir kontrol stratejisine ihtiyaç vardır. Ayrıca sürüş

konforu, fren performansı ve enerji geri kazanım oranının yanı sıra dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktördür. Stabilite, güvenlik ve enerji geri kazanımı, rejeneratif frenleme sisteminin temel hedefleri olarak düşünülebilir (Şekil 5). Literatürde farklı kontrol stratejileri ve kontrolörler araştırılmıştır. En yaygın sınıflandırma, kullanılan kontrolörler dikkate alındığında bulanık mantık kontrolörleri, kayan kipli kontrolörler, PID kontrolörleri, sinir ağı kontrolörleri, model öngörücü kontrolörler, denetleyici kural tabanlı kontrol, çok katmanlı kontrolörler ve diğer yöntemler araştırılmaktadır (Hosseini ve ark., 2023).

Rejeneratif frenleme sistemine sahip elektrikli ve hibrit taşıtlarda sürtünmeli frenler de bulunur. Sürücünün yavaşlama talebi ve sistemin anlık çalışma sınırlarına göre frenleme torku üç temel biçimde sağlanabilir. Bunlar, birbirinden kesin sınırlarla ayrılmış ve her taşıtta aynı biçimde uygulanan kurallar değil, frenleme kuvvetinin nasıl üretildiğini açıklayan durumlardır (Saiteja ve ark., 2022; Chidambaram ve ark., 2023).

Birinci durum — Yalnızca rejeneratif frenleme: Yavaşlama talebi düşük veya orta düzeydeyse ve motor ile enerji depolama biriminin çalışma koşulları elveriyorsa, gerekli frenleme torku elektrik motoruyla sağlanabilir. Bu durumda sürtünmeli frenlerin katkısı gerekmeyebilir. Ancak yalnızca rejeneratif fren kullanılması, taşıtın frenleme sırasındaki kinetik enerjisinin tamamının geri kazanıldığı anlamına gelmez; enerji dönüşümü ve depolama sırasında kayıplar oluşur (Hamada ve Orhan, 2022).

İkinci durum — Karma frenleme: Gerekli frenleme torku, rejeneratif frenleme ile sürtünmeli frenler arasında paylaştırılır. Kontrol sistemi, sürücünün talep ettiği yavaşlamayı ve taşıtın kararlılığını korurken mümkün olan enerji geri kazanımını sağlamaya çalışır. Frenleme kuvvetlerinin bu şekilde birlikte yönetilmesi fren harmanlaması olarak adlandırılır. Literatürde geçen seri ve paralel düzenler, bu durumun kendisinden ziyade rejeneratif ve sürtünmeli frenlerin nasıl koordine edildiğine ilişkin farklı kontrol yaklaşımlarıdır; bunlar ilgili alt bölümde ayrıca açıklanabilir (Saiteja ve ark., 2022).

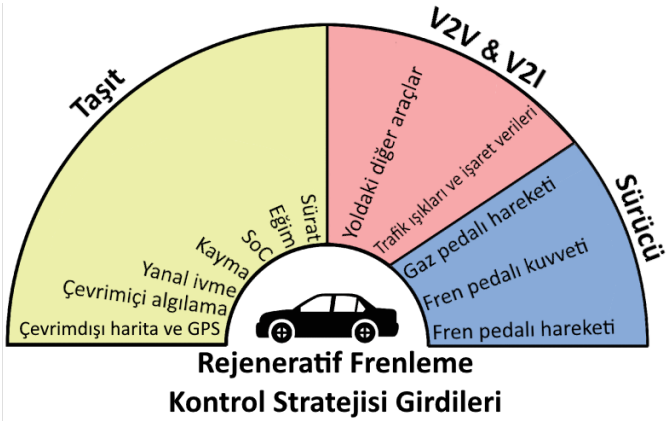
Üçüncü durum — Yalnızca sürtünmeli frenleme: Rejeneratif frenleme kullanılamadığında veya gereken torku sağlayamadığında yavaşlama sürtünmeli frenlerle gerçekleştirilir. Acil frenleme talebi, bataryanın geri kazanılan enerjiyi kabul edememesi veya düşük hızda motorun sağlayabildiği rejeneratif torkun yetersiz kalması bu duruma yol açabilir. Bununla birlikte acil frenleme sırasında rejenerasyonun her taşıtta mutlaka tamamen kapatıldığı, batarya doluyken fren enerjisinin geri kazanılmasına gerek olmadığı ya da 10 km/h değerinin bütün sistemler için geçerli kesin bir sınır olduğu söylenemez. Uygulanan frenleme dağılımı taşıtın tasarımına ve kontrol stratejisine bağlıdır; öncelik her koşulda güvenli yavaşlamadır (Saiteja ve ark., 2022; Chidambaram ve ark., 2023; Hosseini ve ark., 2023).

Rejeneratif fren sisteminin ana zorlukları, mümkün olan en yüksek enerji geri kazanımını elde etmek için rejeneratif ve mekanik fren sistemleri arasındaki frenleme kuvveti dağılımını yönetmek ve frenleme sırasında etkinlik ile güvenliği sağlamak için frenleme kuvvetinin ön ve arka tekerleklere dağılımını düzenlemektir. Sonuç olarak, mekanik fren sistemleri ve enerji geri kazanım sistemi için kontrol stratejisi, elektrikli ve hibrit taşıtlarda fren sisteminin etkinliğini önemli ölçüde etkiler. Uygun rejeneratif frenleme kontrol algoritmaları; sürücünün talep ettiği toplam fren torkunu güvenli ve öngörülebilir biçimde karşılamak, taşıt kararlılığını korumak ve batarya ile güç aktarma organlarının çalışma sınırları içinde enerji geri kazanımını artırmak üzere tasarlanır. Bu amaçlar doğrultusunda fren torku, rejeneratif ve sürtünmeli frenleme sistemleri arasında uygun şekilde paylaştırılır. Algoritma; fren ve hızlandırıcı pedallarının konumu, tekerlek ve taşıt hızı, bataryanın şarj durumu (SoC) ve sıcaklığı ile elektrik motoru ve güç elektroniğinin çalışma sınırları gibi anlık verileri işler. Bu nedenle sistemin performansı, ölçümlerin doğruluğuna ve kontrol algoritmasının bu verilere dayanarak gerçek zamanlı aldığı kararlara bağlıdır.

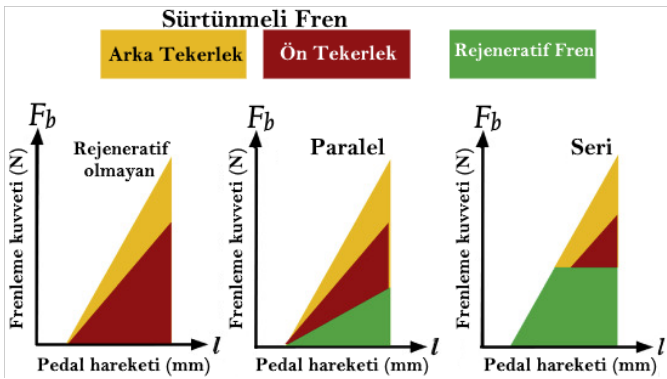
Genellikle, rejeneratif frenleme torku, taşıtın ihtiyaç duyduğu tüm frenleme torkunu sağlayacak kadar büyük yapılmaz. Ayrıca, rejeneratif frenleme sistemi, yüksek şarj durumu veya yüksek

batarya sıcaklığı gibi birçok koşulda kullanılamayabilir. Bu durumlarda, geleneksel hidrolik frenleme sistemi, gerekli toplam frenleme torkunu karşılamak için aktif edilir. Bu nedenle, hidrolik frenleme sistemi ve rejeneratif frenleme sistemi arasındaki iş birliği, elektrikli araç frenleme kontrol stratejisinin tasarımının temel bir parçasıdır ve bu iş birliği tork harmanlaması olarak bilinir. Bu tork harmanlama stratejisi, aktarma organlarındaki bozulmaları önlemeye yardımcı olur (Varocky, Nijmeijer ve Besselink, 2011).

Rejeneratif frenlemenin kontrol stratejisi için temel girdi, fren pedalından gelen sinyallerdir. Sürücü, pedal hareketi ve pedala uyguladığı kuvvetle bu sinyali oluşturur ve istenen frenleme kuvvetinin hesaplanmasını ve varsa kilitlenme önleyici sistemin etkinleştirilmesini sağlar. Daha önce de belirtildiği gibi, akünün SoC değeri rejeneratif frenleme sırasında önemli bir özelliktir. Ayrıca, farklı sensörlerden uygulanan hız, gerçek zamanlı yol eğimi, hidrolik frenlerden gelen geri bildirim vb. gibi birçok başka girdi de vardır. Kontrol stratejisi ayarlanması için kullanımı en sık tercih edilen üç faktör fren pedalı kuvveti, sürat ve SoC değeridir. Şekil 6, rejeneratif frenleme kontrol stratejisi tasarlamak için dikkate alınabilecek farklı girdi değişkenlerini üç farklı gruba ayrılmış halde göstermektedir. Araçtan gelen veriler (taşıt), araçtan araca iletişim (V2V) ve araçtan altyapıya iletişim (V2I) ile sürücü girdileri, gelişmiş rejeneratif frenlemede güvenlik ve performans için birleştirilir. Daha iyi frenleme için daha fazla veriyle rejeneratif fren kontrolleri, sürücü eylemlerinin ve temel pil durumu bilgilerinin ötesindeki girdilerle iyileştirilebilir. Uygun gelişmiş sürücü destek sistemi (ADAS) öğelerine sahip taşıtlarda araçtan araca (V2V) ve araçtan altyapıya (V2I) iletişim, önemli veri kaynaklarıdır (Shepard, 2023).



Şekil 6. Rejeneratif frenleme kontrol stratejisinin farklı girdileri (Shepard, 2023)



Şekil 7. Üç farklı frenleme kuvveti dağılım kontrol stratejisi (Lv ve ark., 2015).

Elektrikli ve hibrit taşıtların rejeneratif fren sistemlerinde tork harmanlaması için iki farklı kontrol stratejisi vardır: Paralel ve Seri kontrol (Şekil 7). Otomobiller için frenleme sistemlerindeki üç farklı kontrol stratejisi Şekil 7'de gösterilmiştir. Rejeneratif olmayan frenlenme grafiği referans grafik olarak verilmiş ve hidrolik frenleme sisteminin çalışma stratejisini göstermektedir. Rejeneratif frenleme kontrol stratejisi, aracın rejenerasyon verimliliği, frenleme performansı ve sürülebilirliği için çok önemlidir. Şekil 7'de, taşıtın fren pedal hareket mesafesine göre mekanik frenlerin ve rejeneratif frenin uygulanma stratejileri

görülmektedir. Şekilde görüldüğü, ilk strateji, yani rejeneratif olmayan, temel olarak ayarlanır ve bu stratejide yavaşlama sırasında yalnızca sürtünme frenleri kullanılır. Paralel stratejide, rejeneratif frenleme ve mekanik frenleme aynı anda başlar ve rejeneratif fren tepe değerlerine ulaşana kadar çalışır. Seri stratejide, rejeneratif frenleme mekanik frenlemeden önce başlar ve mekanik frenleme yalnızca rejeneratif fren tepe değerlerine ulaştığında başlar. Uygun koşullar altında rejeneratif frenleme ile %8-25 oranında enerji tasarrufu sağlanabilir. Ayrıca rejeneratif frenleme, önemli miktarda ekstra ekipman gerektirmediği için elektrikli ve hibrit taşıtlarda enerji tasarrufu için en cazip strateji olarak kabul edilir. Teorik olarak, frenleme işleminin önemli bir kısmı rejeneratif frenleme ile sağlanabilir. Ancak, sürüş güvenliği açısından gerçekte uygun oranda rejeneratif frenleme sağlanmalıdır. Bu nedenle farklı rejeneratif frenleme stratejileri oluşturulmuştur (Lv ve ark., 2015; Hosseini ve ark., 2023).

Paralel frenleme stratejisi, entegre bir kontrol olmadan birlikte çalışan sürtünme (hidrolik) tabanlı sistem ve rejeneratif frenleme sisteminin bir kombinasyonudur. Fren pedalı hareketine bağlıdır ve fren uygulandığında, ön ve arka tekerlek sürtünme frenleri ile rejeneratif frenler aynı anda aktif hale geçer. Paralel rejeneratif frenlemede, rejeneratif fren ve sürtünme freni tüm yavaşlama süreci boyunca kullanılır. Fren kontrolörü, uygulanacak rejeneratif frenleme türünü belirler. Paralel rejeneratif frenlemede, her iki fren sistemi de aynı anda uygulanır. Paralel kontrol stratejisinde frenleme enerjisi önce arka tekerlek sürtünme freni, sonra ön tekerlek sürtünme freni ve son olarak rejeneratif frenleme sırayla dağıtılır.

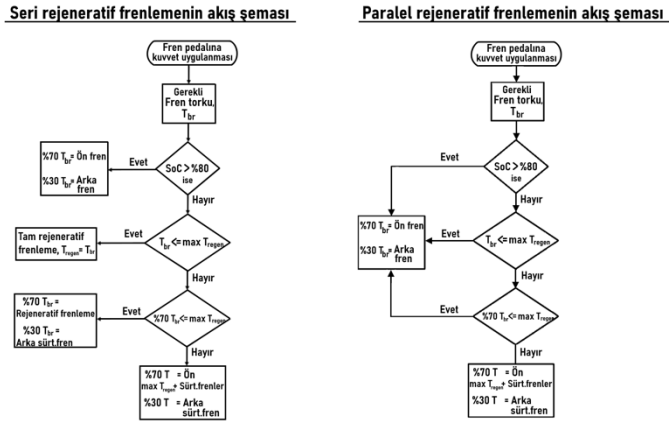
Paralel rejeneratif fren kontrol stratejisi, başka herhangi bir donanım eklenmesine gerek kalmadan kolay bir uygulama özelliğine sahiptir. Ancak, elektrik motorunun rejeneratif frenleme torku, orijinal sürtünme frenlerini modüle etmeden doğrudan tahrik tekerleklerine eklendiğinden, rejenerasyon verimliliği ve fren konforu düşüktür. Fren pedalının hareketi ne kadar yüksekse, o kadar fazla frenleme yapılır. Paralel rejeneratif frenleme, yakıt verimliliğinde %9-18 oranında bir artış sağlayabilir. Geleneksel

fren sistemlerine eklenebilir. Ancak bu durum pedal hissini olumsuz etkileyebilir ve dolayısıyla iyi bir tork karışımı elde etmek için daha iyi programsal ayarlama gereklidir. Rejeneratif tork ayar noktası belirlenen eşiği aştığında, elektronik kontrol ünitesi frenlerin hidrolik olarak çalıştırılmasını sağlar ve sistemi korur (Varocky, Nijmeijer ve Besselink, 2011; Lv ve ark., 2015; Chidambaram ve ark., 2023; Hosseini ve ark., 2023).

Seri frenleme kontrol stratejisinde fren pedalı az bir kuvvetle kısa mesafe hareket ettirildiğinde sadece rejeneratif frenleme kullanılır, ancak bu bataryanın şarj durumuna göre sınırlandırılabilir. Seri rejeneratif frenlemede, ihtiyaç duyulan fren kuvveti belirli bir noktayı aşmadığı sürece fren kuvveti rejeneratif frenleme tarafından üretilir. Taşıt sürati, pedal hareketi ve basma hızı gibi değişkenler arttıkça arka tekerlek sürtünme freni aktif edilir; frenleme ihtiyacı karşılanmıyorsa, ön tekerleklerde de frenleme yaptırılır. Seri kontrol frenlemesinin koordinasyonu, frenleme konforu veya enerji depolama tercih edilerek yapılır. Seri stratejide, rejeneratif frenleme oranı paralel rejeneratif frenleme stratejisine kıyasla artırılabilir. Ancak, aktif sürüş güvenliği sistemlerinde oluşabilecek sorunları önlemek için toplam frenlemenin sınırlı bir kısmına sahiptir. Bu oran, şarj durumu (SoC), fren pedalı konumu (BPP), fren pedalına uygulanan kuvvet, taşıt sürati ve batarya sıcaklığı gibi farklı temel faktörlere bağlı bir denetleyici/algoritma tarafından da belirlenebilir. Basit kurallar ve geleneksel ikili mantık kullanımı, sürekli olarak uygun bir rejeneratif frenleme oranı sağlamak için yetersizdir. Buna karşılık, farklı frenleme durumları bulanık kümeler ve kurallarla tanımlanabildiği için bu sorun bir bulanık mantık denetleyici algoritması ile aşılabilir. Seri strateji, rejeneratif ve sürtünme frenlerini gerçek zamanlı olarak koordine eder ve fren konforu ve rejenerasyon verimliliği açısından paralel stratejiye göre avantajlıdır. Ancak bu stratejinin uygulanabilmesi için sensörlerin sayısı, gelen verilerin çeşitliliği, fren tertibatlarının modifikasyonu uygulamanın karmaşıklaşmasına ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Seri rejeneratif frenleme, yakıt verimliliğinde %15-30 oranında bir artış sağlayabilir ve iyi tork karışım kabiliyeti

sayesinde daha tutarlı bir pedal hissiyatı sunar. Seri frenleme stratejisinde elektronik kontrol ünitesi optimum enerji kazanımı ve optimum frenleme performansı kriterlerini hesaba katarak performans sergiler. Seri rejeneratif frenlemede, fren maksimum kapasitesine ulaşana kadar regen (enerji geri kazanımı) kullanılır. Regen yetersiz kalırsa istenen yavaşlamayı sağlamak için sürtünme freniyle desteklenir (Varocky, Nijmeijer ve Besselink, 2011; Chidambaram ve ark., 2023; Hosseini ve ark., 2023).

Frenleme için gerekli güç ve tork değerleri, seri ve paralel frenleme stratejisi olarak adlandırılan frenleme stratejilerinin uygulanmasını sağlayan, elektronik kontrol ünitesindeki alt sistemin çalışma akış diyagramları Şekil 8'de verilmiştir. Frenleme torku, taşıtın ağırlık dağılımı, lastik-yol arasındaki sürtünme katsayısı, fren donanım özellikleri, hedeflenen negatif ivme ve ağırlık merkezi de hesaba katılarak ön ve arka tekerlekler arasında genelde 60:40 veya 70:30 gibi üretici tercihi, taşıt geometrisi, kütle dağılımı, fren donanımı ve mevzuat gibi değişkenlere bağlı olarak belirli oranlarda paylaştırılır. Fren pedalına basıldığında ve basma seviyesine bağlı olarak belirli bir fren torku gönderilir. Bu fren torku, fren kontrol stratejisi bloğuna (akış diyagramına) aktarılır. Burada, öncelikle akü şarj durumunun (SoC), izin verilen maksimum şarj seviyesi olarak ayarlanan %80'in altında olup olmadığı kontrol edilir. Bu koşul karşılanırsa, akü şarj edilir.



Şekil 8. Seri ve Paralel frenleme akış şeması (Varocky, Nijmeijer ve Besselink, 2011)

Sürücü tarafından fren pedalına basma hızı ve miktarına göre belirlenen (talep edilen) fren torku, motor-jeneratörünün maksimum rejeneratif tork sınırıyla karşılaştırılır. Talep edilen toplam fren torku, maksimum rejeneratif torktan düşük veya ona eşitse, taşıt yalnızca rejeneratif torkla fren yapar ve batarya şarj edilir. Nihai olarak verilen şarj miktarı, motor-jeneratör çalışma verimliliğine ve batarya şarj verimliliğine de bağlıdır. Talep edilen toplam fren torku, motor-jeneratörünün sağlayabileceğinden fazlaysa, sürtünme frenleri devreye girer. Araç önden çekişli ise önden talep edilen toplam fren torkunun, motor-jeneratörünün maksimum rejeneratif tork kapasitesinden düşük veya ona eşit olup-olmadığı kontrol edilir. Eğer öyleyse, ön teker frenleme tamamen rejenerasyonla, arka teker (tahriksiz aks) ise sürtünmeyle sağlanır. Toplam fren torku talebi daha da arttığında genel fren torku talebini karşılamak için ön teker sürtünme frenleri (tahrikli aks), arka teker sürtünme frenleri ve ön rejeneratif frenlemeyle birlikte devreye girer. Bu durum, Şekil 8'de akış şeması şeklinde gösterilmiştir (Varocky, Nijmeijer ve Besselink, 2011).

Fren pedalına basıldığında ve sürücü bloğundan istenen genel fren torku talebi gönderildiğinde, fren kontrol stratejisinden geçen bu fren torku her zaman rejenerasyon ve sürtünme frenlemesi arasında bölünür. Strateji; güvenlik, konfor ve fren pedalı hissi göz

önünde bulundurularak modellenir. Paralel rejeneratif frenleme, geleneksel sistemlere bir eklenti olduğundan, herhangi bir entegre kontrolden yoksundur. Bu nedenle, rejeneratif frenleme ile sürtünmeli frenleme arasında çalışma geçişini ve eş performansını sorunsuz hale getirmek için rejenerasyon ve sürtünme frenlemesinden elde edilecek fren torku miktarı arasında net bir ayrım olacak şekilde ayarlanır (Lv ve ark., 2015; Hosseini ve ark., 2023).

Varocky, Nijmeijer ve Besselink (2011) tarafından yapılan çalışmada paralel frenleme stratejisinin uygulanması gerçekleştirilmiştir. Frenlerin uygulanmasıyla ve motor-jeneratörün tasarımına uygun olarak, jeneratörü sabit bir jeneratör torku bölgesinde çalıştıracak şekilde tasarlanmıştır. Motor-jeneratör, temel hızda veya altında maksimum 322 Nm tork sağlayabildiği bulunmuştur. Jeneratör, temel hızının çoğu otoyoldaki maksimum sürat sınırı olan 124 km/h hıza karşılık gelecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Dolayısıyla, taşıt 124 km/h'in altındaki bir süratte fren yaptığı ve ön-arka fren dağılımı maksimum jeneratör torkuna eşit veya daha büyük olduğunda, ön tahrikli tekerleklerde istenen fren torku sağlandığı sürece rejenerasyonla frenleme yapmıştır. Bu koşul sağlandığında, rejeneratif ve sürtünmeli frenleme birlikte çalıştığı; aksi takdirde, sadece tahrikli ve tahriksiz akstaki sürtünmeli frenler çalıştığı bulunmuştur.

4. ENERJİ DEPOLAMA TÜRLERİ

4.1. Enerji Depolama Yöntemlerine Göre Sistemler

Rejeneratif frenleme sistemleri, genel olarak enerji depolama yöntemine ya da hibrit araçlardaki entegrasyon şekillerine göre sınıflandırılmaktadır. Enerji depolama aygıtına göre sınıflandırıldığında üç tür ön plana çıkmaktadır; Elektrikli (bataryalı veya ultra/süper kapasitörlü), Mekanik (volan veya yaylı) ve Yüksek basınçlı akümülatör (hidrolik veya sıkıştırılmış hava) (Hosseini ve ark., 2023; Ambe ve ark., 2024). Bunların taşıtlarda kullanım tercihlerinde dezavantajları önemli bir kriterdir.

4.1.1. Elektrikli (Batarya veya Ultra/Süper Kapasitörlü)

Rejenerasyon işlemi sürücünün fren pedalına basmasıyla birlikte devreye girer ve elektronik sistem devreye girerek elektrik motorunu ters yönde hareket ettirerek jeneratör olarak çalışmasını sağlar ve elektrik enerjisi üretilir. Üretilen enerji genellikle bataryalarda veya ultra/süper kapasitör banklarında depolanır. Bu sistemler sürtünmeli (mekanik) frenlerle birlikte kullanılır; böylece yalnızca rejeneratif sisteme bağlı kalınmaz ve güvenlik artırılmış olur. Ancak bu sistemlerde güç yoğunluğu fazla olmasına karşın taşıtın kinetik enerjisinin tamamı geri kazanılamaz ve şarj akımı sınırlıdır. Bu arada elektrikli taşıtlarda depolanan enerjinin özelliğini ifade eden güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu terimleri farklı özelliklerdir. Enerji yoğunluğu birim hacim başına bataryada depolanan enerji miktarını belirtir ve taşıtın menzilini etkiler. Güç yoğunluğu ise bataryanın, elektrik enerjisini ne kadar hızlı iletebileceğini belirtir ve elektrik motorunun tork üretebilme kapasitesini etkiler.

Bu sistemlerde genellikle Nikel-Kadmiyum (NiCd), Nikel-Metal-Hidrür (NiMH), Lityum-iyon (Li-ion), Lityum-iyon Polimer (LiPo) ve Sodyum Nikel Klorür (NaNiCl) gibi çeşitli türde bataryalar kullanılmaktadır. Kapasitörler ise gelişmiş kondansatörlerdir ve bataryalara kıyasla elektrik enerjisini kısa sürede depolayabilir ve istenildiğinde çok hızlı şekilde sisteme geri

verebilirler. Ancak enerji depolama kapasiteleri düşüktür (2,3~2,75 V ve 1~30 Wh/kg özgül enerji), o sebeple yığın halinde yani birçok kapasitör bir araya getirilerek kullanılır. Süperkapasitör (SC), aynı zamanda ultrakapasitör olarak da adlandırılır ve hücre/modül üretici değerlerine göre standart bir kapasitörün 10-100 katı enerjiyi anlık olarak depolayabilir, bataryalara göre daha hızlı şarj-deşarj olurlar (1~10 s) ve uzun ömürlüdürler (1 milyon çevrim). Süper kapasitörler yaklaşık olarak -50 ile +70 °C arasında çalışabilirler. Bataryalara kıyasla uzun bir kullanım ömrü ve daha yüksek güç yoğunluğu değerleri süper kapasitörleri elektrikli taşıtlarda rejenerasyon frenleme enerjisini yakalamak için iyi bir aday haline getirir. Çünkü elektrik motoru jeneratör modunda çalışırken alternatif akım (AC) üretebilir ve bu, bir diyot grubu (tablası) sayesinde DC akıma dönüştürüldüğünden elektrik enerjisi tepe noktalarını hızla yakalayıp iletebilirler. Ultra/Süper kapasitörler, yüksek deşarj hızları ve düşük enerji yoğunlukları nedeniyle sorunludurlar. Bataryalı sistemlerde şarj akımı sınırlıdır, Ultra/süper kapasitörler hızlı şarj-deşarj tepkisi sunar fakat sistemin genel verimi düşüktür (Hosseini ve ark., 2023; Ambe ve ark., 2024).

4.1.2. Mekanik (Volan veya Yaylı)

Volan; enerjiyi, kinetik enerji şeklinde depolayabilen mekanik bir enerji depolama ve iletme cihazıdır. Depolanan enerji, volanın eylemsizlik momentine ve açısal hızının karesine bağlıdır ve $E = ½.I.w^2$ bağıntısıyla ifade edilir. Burada I eylemsizlik momentini, w ise açısal hızı gösterir. Açısal momentum ise $L = I.w$ bağıntısıyla tanımlanır ve enerjiyle aynı büyüklük değildir. Volanın depolayabileceği enerji, yalnızca kütlesine değil, kütlenin dönme eksenine göre dağılımına ve dönme hızına da bağlıdır. Volan ne kadar ağırsa ve hızlı dönerse, depolayabileceği enerji miktarı da o ölçüde artar. Oyuncaklarda, rüzgar türbinlerinde, enerji depolamak için motorlu jeneratörlerde, içten yanmalı motorlarda, elektrikli otomobillerde, lokomotif tahrik sistemlerinde, yön kontrolü için uydularda kullanılan volanlar mekanik enerjiyi emer ve hızını azaltarak depolanan enerjiyi gerektiğinde sisteme geri verir. İçten

yanmalı motorlu taşıtlarda volan; motorun ilk hareketini yani çalışmasını sağlar ve krank milinde moment değişimleri sonucunda oluşan titreşimleri üzerine alarak motorun düzenli çalışmasını sağlar. Volan, ağırdır ve ekstra alan gerektirir. Ayrıca uzun süre enerji tasarrufu yapmak mümkün değildir. Bataryanın şarj edilmesi sırasında mekanik enerjinin elektrik enerjisine ve AC-DC dönüşümü yapılması gerekir. Batarya deşarj edilirken de bu işlemlerin tam tersi olur. Volanda depolanan mekanik enerji doğrudan araca dönüşümsüz olarak aktarıldığı için iletim kayıpları daha azdır ve daha verimlidir (Bhandari ve ark. 2017; Anonim-C, 2025).

Mekanik rejeneratif sistemlerde, geri kazanılan kinetik enerji dönel hareket şeklinde bir volanda veya yayda depolanır. Yaylarda enerji dönüşümde kayıp olmazken karmaşık mekanizmaları ağırlığın artmasına ve enerji geri kazanım miktarının sınırlı olmasına sebep olmaktadır. Yay enerjisi depolama sistemi gibi diğer enerji depolama sistemi türlerinde, frenleme işlemi sırasındaki kinetik enerji sıkıştırılmış bir yayda depolanır ve yayın potansiyel enerjisi gerektiğinde kinetik enerjiye geri dönüştürülür. Mekanik sistemlerin, bazı durumlarda elektrikli sistemlere göre daha verimli olduğu ifade edilmektedir (Hosseini ve ark., 2023; Ambe ve ark., 2024).

Formula-1 araçlarında yüksek teknoloji ürünü, volana sahip gelişmiş şanzımanlar, rejeneratif sistemler olarak kullanılmaktadır. Bu araçlardaki rejeneratif sistemlere kinetik enerjiyi geri kazamın sistemleri (KERS) adı verilmektedir (Küçükaydın, 2024).

4.1.3. Yüksek Basınç Akümülatörlü (Sıvı veya Gaz)

Ford Motor Company ve Eaton Corporation tarafından geliştirilen alternatif rejeneratif frenleme sistemine Hidrolik Güç Desteği adı verilmiştir. Hidrolik rejeneratif frenleme sisteminin temel fikri, taşıt yavaşladığında, başlangıçta momentum olan kinetik enerjiyi basınç şeklinde potansiyel enerji olarak depolamasıdır. Sistemin temelinde, aracın kinetik enerjisiyle çalışan tersinir bir hidrolik pompa bulunmaktadır. Sürücü fren pedalına bastığında, düşük basınçlı bir akümülatörden alınan

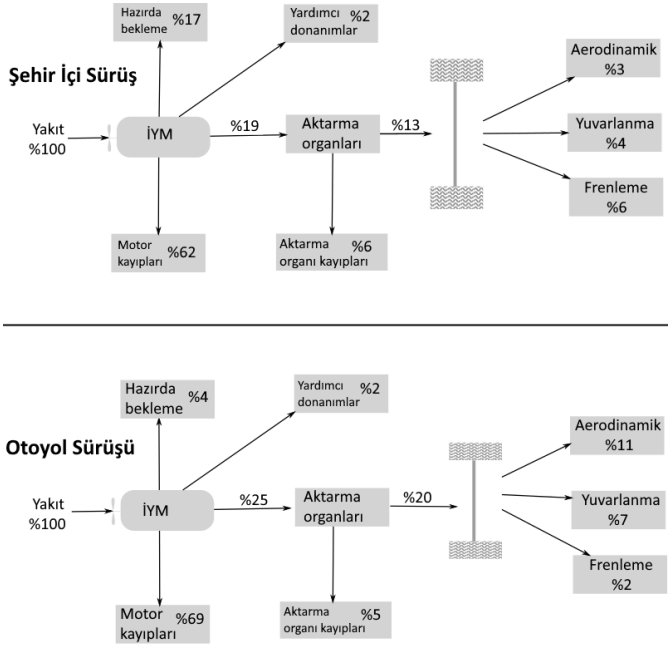
hidrolik sıvı, yüksek basınçlı bir akümülatöre pompalanır. Bu esnada, gaz (genellikle azot) sıkıştırılarak basınç artışı sağlanır ve bu basınç, aracı yavaşlatarak durmasına yardımcı olur. Sürücü fren pedalından ayağını çektiğinde ve tekrar gaz pedalına bastığında sistem tekrar devreye girerek taşıta enerji aktarımı yapılır. Yüksek basınçlı akümülatörler de şarj-deşarj hızı yüksek olmasına karşın ağırdır, alan ihtiyacı vardır ve binek taşıtlar için uygun değildir. Ticari taşıtlar ve mobil ekipmanlar için tasarlanan sistem gürültülüdür ve sızıntılara eğimlidir (Bhandari ve ark., 2017; Hosseini ve ark., 2023; Ambe ve ark., 2024; Küçükaydın, 2024).

Hidrolik rejeneratif sistemler, otomotiv endüstrisi tarafından hibrit araçlarda uygulanması için yıllardır değerlendirilmektedir. Gaz yüklü hidrolik akümülatör, basınç altında nispeten büyük miktarlarda hidrolik sıvı tutabilen, silindirik veya küresel bir kap formunda bir potansiyel enerji depolama cihazıdır. Cihaz, gazı (genellikle azot) sıkıştırarak enerjiyi depolar ve ağırlık veya yay yüklü tiplerden çok daha pratik olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca daha hafif, daha ucuz ve daha kompakttırlar. Hidrolik sistem bir akümülatör, bir yağ haznesi ve değişken deplasmanlı bir pompa/motordan oluşur. Tekerlekten tahrikli hidrolik pompa, akümülatörde basınç oluşturur ve enerji, pompa motor ünitesi tarafından aktarılır. Bu tür bir değişken deplasmanlı ünitenin kontrolü kolaydır. Bu sistemlerde önemli mekanik kayıplar olduğundan düşük güçte verimleri de düşüktür. Bosch firması böyle bir sistemin, taşıtın yavaşlama sırasında kaybettiği momentumun %80'inini depolayıp aracı tekrar hareket ettirmek için kullanabileceğini ve yakıt tüketimini %25'e kadar azaltabileceğini belirtiyor (Bhandari ve ark., 2017).

5. GERİ KAZANIM ÖLÇÜTLERİ VE SÜRÜŞ ÇEVRİMİ ETKİLERİ

5.1. Sistem Verimliliği ve Sürüş Çevrimi Etkileri

Rejeneratif frenleme sistemlerinin taşıtlarda kullanılmasını önemli hâle getiren başlıca etkenler, enerji verimliliğini artırma, frenleme sırasında kaybedilen enerjinin bir bölümünü geri kazanma, sürüş menzilini destekleme ve özellikle hibrit taşıtlarda yakıt tüketimi ile buna bağlı emisyonları azaltma hedefleridir. Rejeneratif frenleme, harici şarjın yerini almaz; kullanım sırasında geri kazanılan enerjinin yeniden değerlendirilmesini sağlar. İçten yanmalı motorlu taşıtlardan edinilen mühendislik birikimi ve elektrikli demiryollarındaki rejeneratif frenleme uygulamaları, elektrikli ve hibrit kara taşıtları için geliştirilen sistemlerin anlaşılmasına ve tasarlanmasına katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte bu sistemlerin taşıtlardaki performansı; motor, enerji depolama birimi ve frenleme kontrolünün birlikte çalışmasına bağlıdır (Hamada ve Orhan, 2022; Szumska, 2025).



Şekil 9. İYM'lerin şehir içi ve otoyolda enerji verimliliği (Anonim-A, 2025)

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DoE) tarafından yapılan çalışma sonucunda Şekil 9'da görüldüğü gibi içten yanmalı motorlu taşıtların şehir içi sürüşte genellikle %13, otoyol koşullarında ise %20 verimliliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Verim, yakıt/şebeke enerjisinin, tekerlek enerjisi, geri kazanılan fren enerjisi ya da yeniden hızlanma enerjisine oranıdır. Yani yakıttan (dizel, benzin veya LPG) elde edilen enerjinin (%100) ancak %13-20'si tekerleklere aktarılabiliyor. Otoyol sürüşlerinde taşıt süratinin artmasıyla birlikte taşıtın dış yapısına (görünümüne) bağlı olarak aerodinamik kayıplar (Cd) da artmaktadır. Yuvarlanma kayıpları lastik-yol etkileşimine bağlı olarak gelişen kayıplardır. Şehir içi sürüşlerde, frenleme sırasında kaybedilen enerji, faydalı mekanik enerjinin yaklaşık %46'sına (%6 / %13) karşılık gelmektedir ve otoyollarda bu oran %10 seviyesindedir. Şehir içi sürüşlerde taşıtı yavaşlatmak için tekerleklere aktarılan enerjinin %46'sı frenleme sırasında ısı enerjisi olarak kaybolur.

Elektrikli taşıtlarda ise bu enerjinin bir kısmı rejeneratif frenleme sistemi sayesinde geri kazanılabilir.

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'nın yayımladığı enerji akış şemaları, içten yanmalı motorlu taşıtlarda yakıttan sağlanan enerjinin yalnızca bir bölümünün taşıtı hareket ettirmek için kullanıldığını göstermektedir. Bu bölümün büyüklüğü taşıta ve sürüş çevrimine göre değiştiğinden, şehir içi ve otoyol kullanımı için tek bir verimlilik değeri bütün taşıtlara genellenmemelidir. Kalan enerji; motor ve aktarma organlarındaki kayıplar ile yardımcı sistemlerin tüketimi gibi farklı kalemlere dağılır. Taşıt hızı arttıkça aerodinamik direnci yenmek için gereken enerji de önem kazanır; yuvarlanma direnci ise başta lastiklerin yol ile etkileşimi ve deformasyonu olmak üzere çeşitli etkenlerle ilişkilidir. Özellikle sık durup kalkılan şehir içi sürüşte, geleneksel sürtünmeli frenleme sırasında taşıtın hareket enerjisinin bir bölümü ısıya dönüşerek kaybolur. Elektrikli ve hibrit taşıtlarda rejeneratif frenleme, uygun koşullarda bu enerjinin bir bölümünü elektrik enerjisi olarak geri kazanabilir (U.S. Department of Energy, 2020).

DoE, yaptığı çalışmada elektrikli taşıtların şebekeden gelen elektrik enerjisinin %77'sinden fazlasının tekerleklerde güce dönüştürülebildiğini belirtmektedir. Yapılan bilimsel çalışmalarda bu oranın %95 seviyelerine ulaşılabildiği fakat bunun için farklı yapıda ve maliyetli elektrik motorları, elektronik donanımlar ve yazılımların bütünleşik halde optimum seviyede çalışması gerektiği ifade edilmektedir. En kötü şartlarda elektrik şebekesi, ısıtma ve klimadan kaynaklanan kayıplar da hesaba katıldığında bir elektrikli aracın verimliliği en kötü şartlarda %50 civarında olacağı da belirtilmektedir. (Schwarzer, 2019; Anonim-B, 2021; Anonim-A, 2025).

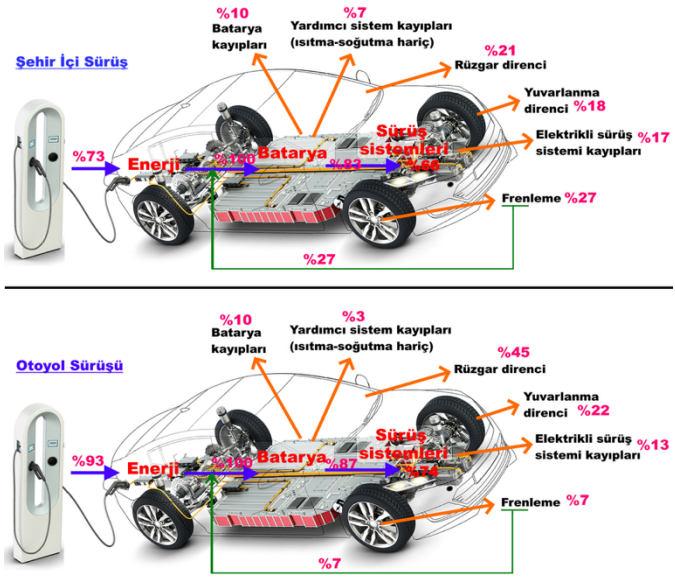
Schwarzer (2019), BMW tarafından 2018 model, 1.345 kg kütleli BMW i3 için açıklanan enerji tüketimi ve rejeneratif frenleme verilerini aktarmaktadır. Buna göre taşıtın 100 km/h sabit hızdaki tüketimi 13,9 kWh/100 km'dir. Taşıtı duruştan 100 km/h hıza çıkarmak için 204 Wh enerji gerekirken, belirtilen frenleme koşulunda 129 Wh enerji geri kazanılmıştır. Kaynakta bu geri

kazanım, hızlanma için gereken enerjinin %62,5'i olarak bildirilmiştir. Taşıtın 60 km/h sabit hızdaki tüketimi 8 kWh/100 km'dir; bu hızdan durana kadar frenleme sırasında 47 Wh enerji geri kazanıldığı ve yeniden hızlanma için gereken 74 Wh'nin %62,8'ine karşılık geldiği belirtilmiştir. 80 km/h için ise sabit hız tüketimi 10,5 kWh/100 km, frenleme sırasında geri kazanılan enerji 83 Wh ve yeniden hızlanma için gereken enerji 129 Wh olarak verilmiş; geri kazanım oranı %64,2 olarak raporlanmıştır. Bu oranlar, belirli bir taşıt ve frenleme koşulu için geri kazanılan enerjinin yeniden hızlanma enerjisine oranını ifade eder; bütün elektrikli taşıtlar için geçerli sabit bir rejeneratif frenleme verimi olarak yorumlanmamalıdır (Schwarzer, 2019).

Rejeneratif frenleme sistemlerinin geri kazanım verimliliği yani elektrik motoru ile tekerlekler arasındaki verimlilik ne kadar yüksekse o kadar fazla elektrik enerjisi kazancı sağlanabilir. Taşıtın kütlesi, sürati, yol-lastik durumu ve frenleme oranı yanında diğer unsurlara da bağlı olarak enerji geri kazanım oranı değişir. Otoyol sürüşlerinde fazla frenleme veya yavaşlatma işlemi uygulanmadığından şehir içi sürüşlere nazaran daha az enerji geri kazanımı olmaktadır. Şekil 10'da görüldüğü gibi otoyol sürüşünde enerji geri kazanım (regen) oranı %7 civarındayken şehir içi sürüşlerde sürekli yavaşlama ve dur-kalk dolayısıyla bu oran %27'lere kadar çıkmaktadır.

DoE tarafından yapılan araştırmada elektrikli taşıt, toplam enerjisinin %66'sını şehir içi sürüşte ve otoyol sürüşünde ise %74'ünü tekerleklere aktarabilmektedir. Rejeneratif frenleme de hesaba katılırsa verim şehir içi sürüşte %91'e (66/73), otoyol sürüşünde ise %80'e (74/93) çıkmaktadır. Pannone ve ark. (2017), Rhodes ve ark. (2017) ve Lohse-Busch ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda şehir içi sürüşte rejeneratif frenleme kazancı %34, tekerleklere aktarım oranı %94, elektrikli sürüş sistemi kayıpları %20 ve şarj kayıplarının %10 seviyelerine ulaştığı belirtilmiştir. Taşıt sürati ile rüzgar direnci doğru orantılı olduğundan şehir içi sürüşte rüzgar direnci %21 seviyesindeyken otoyol sürüşte %45'e kadar artmıştır. Batarya ve elektrikli sürüş sistemi kayıplarında çok fazla fark oluşmamıştır. Otoyol sürüşünde

sürat sabit olduğundan elektrikli sürüş sistemlerine aktarılan enerji miktarı %74 civarındayken şehir içi sürüşte %66 değerine ulaşılmıştır.



Şekil 10. DoE'ye göre şehirlerde ve otoyollarda elektrikli araçların rejeneratif enerji verimliliği (Anonim-B, 2021)

Elektrik motorları, ters yönde kullanıldığında jeneratör görevi görerek mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilirler. Elektrikli ve hibrit taşıtların frenlenmesi yani yavaşlatılması esnasında tekerleklerden gelen mekanik enerji, elektrik motorunun jeneratör olarak çalışmasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Tekerleklerden gelen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek genelde bataryada veya kondansatörde depolanmasını sağlayan sistem rejeneratif frenleme sistemi olarak adlandırılan enerji geri kazanım mekanizmasıdır. Rejeneratif frenleme sistemi, frenleme veya yavaşlama esnasında kaybolacak enerjiyi geri kazanmak için elektrik motorunu ters yönde çalıştırır ve elektrik tüketerek çekiş görevi gören elektrik motorunu elektrik üreten bir jeneratöre dönüştürür. Gücün bu şekilde sisteme geri beslenmesi, taşıtın yavaşlatılmasından elde edilen enerjinin batarya, kapasitör veya mekanik olarak dönen volan gibi bir enerji

depolama çözümüne yeniden beslenmesini sağlar. Depolandıktan sonra, bu güç yani elektrik enerjisi daha sonra taşıtın ileri itilmesine yardımcı olmak veya elektrikli alıcıları beslemek için kullanılabilir.

Rejenerasyon işlemi, aracın genel verimliliğini artırmanın yanı sıra, fren sisteminin ve balataların ömrünü de önemli ölçüde uzamasını sağlar. Bunun nedeni, geleneksel içten yanmalı motorlarda taşıtın güvenli bir şekilde yavaşlatılması ve durdurulması işleminin fren sistemindeki yüksek basınç hattı, fren diskleri, kaliperler ve balatalar gibi mekanik parçalar sayesinde olmasıdır. Bu parçalar taşıtın ağırlık ve süratinin de hesaba katıldığı tüm mekanik enerjisinin yok edildiği sistem parçalarıdır. Fren balatası ve fren diskinin birbirine sürtünmesiyle enerji dönüşümü gerçekleşir ve taşıt yavaşlatılır. Fren diski sert, balatalar yumuşak malzemeden yapıldığından balatalar daha kısa sürede aşınır ve iş göremez hale gelirler. Balatalar 30000-50000 km'de bakımları yapılmalı ve gerekirse değiştirilmelidirler.

Rejeneratif frenleme sistemi taşıtta enerji geri dönüşümü sağlarken taşıtın güvenli şekilde yavaşlamasını da sağlar. Fakat taşıtın güvenlik unsurları dikkate alındığında yavaşlatma işleminden ziyade güvenli şekilde durdurulabilmesi için sürtünmeli frenleme sistemiyle birlikte kullanılır. Özellikle düşük taşıt süratlerinde rejeneratif frenlemenin etkisi azaldığından taşıt makul sürede durdurulamaz, bu durumda mekanik fren sisteminden faydalanılarak taşıt durdurulabilir.

İçten yanmalı motorlarda enerji kaynağı olarak sıvı veya gaz yakıtlar kullanılması sebebiyle silindirlere gönderilecek yakıt miktarı sürücü tarafından belirlenir ve bu işlem gaz pedalının itilme mesafesine göre kontrol ünitesi tarafından belirlenir. Fakat elektrikli taşıtlarda yakıt olmadığından bu pedal için go-pedal, pedal, kumanda, hızlandırıcı vb. gibi farklı isimlendirmeler kullanılmaktadır. Bazı güncel elektrikli taşıtlarda tek pedallı sürüş modu bulunmaktadır. Bu modda sürücü hızlandırıcı pedala basarak taşıtı hızlandırır; ayağını pedaldan çektiğinde ise sistem, taşıtın ve bataryanın çalışma koşulları elverdiği ölçüde rejeneratif frenleme

uygulayarak taşıtı yavaşlatır. Bununla birlikte tek pedallı sürüş, fren pedalını yalnızca acil durumlarda kullanılan bir donanım hâline getirmez. İstenen yavaşlama rejeneratif frenlemeyle sağlanamadığında veya güvenli duruş için gerektiğinde sürücü fren pedalını kullanır. Bazı taşıtlarda rejeneratif frenleme düzeyi sürücü tarafından seçilebilir. Örneğin yokuş aşağı sürüşte daha yüksek bir düzey seçilmesi yavaşlama etkisini artırabilir; ancak geri kazanılabilecek enerji, bataryanın şarj kabulü ve sistemin diğer çalışma sınırlarıyla kısıtlıdır. Bu nedenle daha yüksek rejenerasyon ayarı her koşulda daha fazla enerjinin bataryada depolanacağı anlamına gelmez (Schwarzer, 2019; Augustynowicz, 2022; Chidambaram ve ark., 2023).

Zhao ve ark. (2023) tarafından yürütülen çalışma çeşitli sıcaklıklarda bir şasi dinamometre üzerinde yapılan elektrikli taşıt testlerinde, sıfırın altındaki ortam sıcaklıklarının regen verimliliğini önemli ölçüde azalttığı bulundu. Orta Avrupa iklim koşullarında üç farklı elektrikli aracın gerçek dünya testleri yoluyla, rejeneratif frenleme verimliliğinin özellikle 10 °C'nin altındaki batarya sıcaklığına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ve -4 °C'de sistemin tamamen devre dışı bırakılabileceğini ortaya koymuştur.

Yağmur, kar veya buz gibi atmosferik yağışlar, aracın çekiş parametrelerini önemli ölçüde değiştirir. Bu, artan yuvarlanma direnci ve azalan sürtünme katsayısı ile sonuçlanır ve sonuçta mekanik fren sistemlerine daha fazla güvenmeyi gerektirir. Bu sebeple güvenlik için rejeneratif frenleme verimliliği, elektronik kontrol ünitesi tarafından sınırlandırılır. Araştırma verileri, ideal kuru yüzey koşullarına kıyasla ıslak yol yüzeylerinde çalışırken enerji geri kazanımında %10-20'lik bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu, aracın kinetik enerjisini verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesinin azalmasından kaynaklanır ve enerji geri kazanımında önemli bir süreçtir. Ayrıca, sis ve yoğun rüzgar koşulları, sürüş dinamiklerine ek değişkenler ekler ve bu da toparlanma üzerinde dolaylı bir etkiye sahip olabilir. Bununla birlikte, bu faktörlerin enerji geri kazanım verimliliği üzerindeki etkisi, daha fazla araştırma ve daha derinlemesine

analiz gerektirir. Atmosferik koşullar, elektrikli taşıtlarda regen verimliliğini etkileyen kritik bir faktördür (Lee ve ark., 2023).

Bir rotanın topografik özellikleri ve yol yüzeyi özellikleri, frenleme frekansını ve geri kazanılabilecek kinetik enerji miktarını etkileyen birincil faktörler olduğu Kropiwnicki ve Gawlas (2023) tarafından yapılan çalışmada ifade edilmiştir. Elektrikli taşıtlardaki rejeneratif fren sistemlerinin verimliliğinin, elektrik motoru gücünün ve batarya kapasitesinin araç kütlesine oranı ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu ve irtifa değişiklikleri gibi arazi koşullarından önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir. Asfalt gibi düşük yuvarlanma direnci katsayısına sahip yüzeyler, enerji kayıplarını azaltır ve bu nedenle regen için mevcut kinetik enerji oranını artırır. Öte yandan, asfaltsız yolları içeren düz olmayan yüzeyler, yüksek yuvarlanma direnci nedeniyle daha yüksek enerji kayıplarına neden olur ve bu, geri kazanım verimliliğinde %5-15'lik bir azalmaya neden olur (Qiu ve ark., 2018).

Yokuş aşağı sürüş sırasında enerji geri kazanımı artarken, yokuş yukarı sürüş sırasında enerji tüketimi artar. Gerçek dünya yol-trafik çalışmalarında olduğu gibi yol topografyasının, ilk frenleme hızının ve fren pedalı uygulama süresinin geri kazanılan ve kaybedilen enerjiyi etkileyen ana faktörler olduğunu göstermektedir. Bilimsel çalışmaların sonuç verileri, %5-10 eğimli rotaların düz araziye kıyasla %40-60 daha yüksek enerji geri kazanımı ile sonuçlandığını göstermektedir. Bunun nedeni, elektrik enerjisi üretimi için yerçekimi kuvvetlerinin verimli bir şekilde kullanılmasıdır. Bununla birlikte, yokuş yukarı bölümlerde geri kazanım imkansız hale gelir, bu da enerji talebini artırır. Böylece tüm sürüş döngüsü boyunca ortalama enerji geri kazanım verimliliği azalır (Armenta-Déu ve Cortés, 2023; Valladolid, Calle ve Guiracocha, 2023).

Elektrikli araçlarda rejeneratif fren sistemlerinin etkinliği, çalışma koşullarıyla güçlü bir şekilde ilişkilidir. Dinamik sürüş ve sık hızlanma gibi frenleme döngüleri ile karakterize edilen kentsel ortamlarda, kinetik enerji geri kazanım sistemi taşıt tahriki için tüketilen enerjinin %20 ila 40'ını sağlayabilir. Şehir içi sürüş

koşullarından farklı olarak, sabit hızda sürüşün baskın olduğu otoyol güzergahlarında araç kullanımı, minimum enerji geri kazanımı ile sonuçlanır. Bu tür senaryolarda, frenleme manevralarının seyrek olması nedeniyle, geri kazanım verimliliği belirgin olarak daha düşüktür ve genellikle tahrik için tüketilen enerjinin %5'ini geçmez. Enerji geri kazanımı için en etkili ilk frenleme hızının 20-50 km/h arasında olduğunu belirtilmiştir (Gou, 2016; Szumska ve Jurecki, 2022).

6. BATARYA ŞARJ KABULÜ, ISIL DAVRANIŞ VE YAŞLANMA

Rejeneratif frenleme sisteminin elektrikli ve hibrit taşıtlarda verimlilik, yakıt tüketimi, emisyon, menzil, bakım maliyeti ve süresi için göz ardı edilemeyecek önemli avantajları vardır. Ancak her sistem gibi bunun da taşıtta ağırlık, maliyet, arıza ihtimali, bakımında uzmanlık ve düşük sistem verimliliği gibi bazı dezavantajları vardır. Fakat bu tip taşıtlarda batarya çok önemli olduğundan bu sistemin batarya üzerindeki etkileri daha önemlidir. Bu etkiler çok araştırılan bir konu olmamasına rağmen dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Elektrikli taşıtlarda bataryadan bahsedilirken ortam koşulları (sıcaklık, nem), şarj-deşarj miktarı, şarj-deşarj döngü sayısı, şarj-deşarj döngü derinliği (DoD), şarj-deşarj hızı, hızlanma-frenleme döngüsü, sürüş alışkanlığı, batarya kimyası, yazılım, donanım gibi unsurlar önceliklendirilerek olumsuz durumlar anlatılır. Bunlardan donanım ve şarj-deşarj unsurlarına rejeneratif frenleme sistemi de etki etmektedir. Daha önce de sıkça bahsedildiği şekilde rejeneratif frenleme sistemi tekerleklerdeki mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle bataryanın şarj edilmesini sağlamaktadır ve bunun için mekanik enerjiden AC akım üretilmesi, AC akımın bataryayı şarj edecek DC akıma dönüştürülmesi gerekmektedir ve uygun koşullarda bu akımın bataryaya yönlendirilmesi gerekmektedir.

İletken bir telden elektrik akımı geçerken elektrik enerjinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşür ve bu olay Joule ısıtma, dirençli ısıtma veya Omik ısıtma olarak bilinir. Akım bir elektrik devresinden veya iletken bir malzemeden geçtiğinde, devre veya malzeme ile ilişkili direnç, elektronların çarpışmasına neden olur. Birbiriyle çarpışan elektronlar, enerjiyi ısı şeklinde dağıtır ve güç kaybına neden olur. Elektrik giriş gücünün bir kısmı ısı enerjisi şeklinde kaybolur. Çıkış gücü, ısıtma kayıplarının varlığında her zaman giriş gücünden daha az olacaktır. Devrenin verimliliği, ısınma

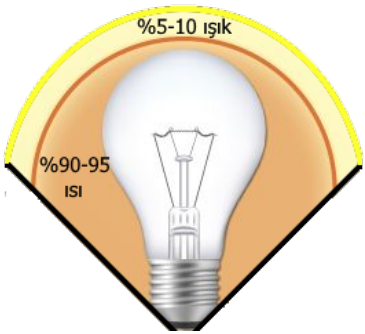
kayıpları ile %100'den daha az olacak şekilde sonuçlanır yani konumuzla ilişkilendirirsek sonuçta rejeneratif sistemin verimi düşmüş olur (Anonim-D, 2022).

Joule ısınması, elektrik akımı bir direnç üzerinden geçtiğinde elektrik enerjisinin bir bölümünün ısıya dönüşmesidir. Akımın ve direncin sabit olduğu basitleştirilmiş durumda, t süresince açığa çıkan ısı enerjisi $Q = I^2.R.t$ bağıntısıyla hesaplanır. Burada Q ısı enerjisini (joule, J), I akımı (amper, A), R direnci (ohm, Ω) ve t süreyi (saniye, s) gösterir. Bu eşitlik ısı enerjisinin üretilme hızını değil, belirtilen sürede oluşan toplam enerji miktarını verir.

Birim zamanda açığa çıkan ısı enerjisi, başka bir deyişle ısıl güç, $P = I^2.R$ bağıntısıyla ifade edilir ve birimi watt'tır (W). Dolayısıyla diğer değişkenler sabitken ısı oluşumu akımın kendisiyle değil, akımın karesiyle orantılıdır. Batarya hücrelerinde şarj ve deşarj akımlarına bağlı ısınma değerlendirilirken bu direnç kaynaklı ısı oluşumunun yanı sıra hücrenin özellikleri ve termal yönetim koşulları da dikkate alınmalıdır (Huang, Qin ve Peng, 2015).

Tıpkı sürtünme, porozitede olduğu gibi faydalı-zararlı olduğu durumlar Joule ısıtmada da amaca göre değişmektedir. Yani Joule ısıtma her zaman zararlı değildir, ancak elektrik sisteminde kayıplara neden olmaktadır. Kasıtlı olarak ısınma kayıpları yaratmanın yardımcı olduğu bazı uygulamalar da vardır. Elektrikli ısıtıcı, şofben ve akkor lambalar gibi çoğu ev aleti elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek ısı enerjisinden faydalanılmasını sağlar.

Isınmadan kaynaklanan güç kaybı, Şekil 11'de görülen akkor lambaların en büyük dezavantajıdır ve verimliliklerini azaltır. Akkor lambadaki filamentten geçen akım, teli kızgın ve parlak hale getirerek ortamın aydınlatılmasını sağlarken elektrik enerjisinin bir kısmı Joule'un ısıtma formülüne göre ısı enerjisi üretir. Oluşan bu ısınma etkisi sebebiyle akkor lambanın sıcaklığı elle tutulamayacak kadar artar (Anonim-D, 2022).



Şekil 11. Lambada elektrik enerjisinin ısı enerjisi ve ışığa dönüşmesi

Bundan dolayı elektrikli taşıtların bataryasının sıcaklıktan etkilenme durumundan da bahsetmek gerekir. Elektrikli taşıtların bataryası, şarj veya deşarj olurken de Joule ısıtma sebebiyle sıcaklıkları artar. Şarj veya deşarj sırasında batarya hücreleri, iç dirençleri üzerinden geçen akım dolayısıyla oluşan Joule ısıtma kayıpları nedeniyle ısınır. Oluşan ısı, hücre kütlesini ısıtarak hücre sıcaklığını yükseltir. Şarj veya deşarj olurken bataryadaki sıcaklık değişim miktarı şarj esnasında şarj hızı ve süreye göre ayrıca hücre kimyası, paketteki soğutma verimi ve çevre sıcaklığına bağlı olarak değişir. Batarya sağlığını korumak için kimyasal yapısına göre genelde hücre sıcaklığı 15 – 35 °C aralığında tutulması gerekir. Şarj olurken de batarya için aktif/pasif soğutma veya ısıtma sistemleriyle optimum sıcaklıkta tutulması sağlanmalıdır. Yani rejeratif frenleme sistemi sayesinde bataryanın şarj edilmesi avantajlı bir uygulama olmasına karşın batarya üzerinde olumsuz etkileri de vardır. Bu sistemle batarya ömrünün kısalmaması için şarj döngülerinin sıklığı azaltılmalı ve en önemlisi batarya sıcaklığını uygun aralıkta tutacak şekilde ısıtma-soğutma sistemi ve batarya yönetim sistemi ayarlaması gerekir.

Batarya ömrü yalnızca şarj-deşarj döngülerinin sayısına bağlı değildir; çevrim derinliği, sıcaklık, şarj durumu ve uygulanan akım profili de yaşlanmayı etkiler. Rejeneratif frenleme sırasında bataryaya kısa süreli şarj akımları aktarılabilir. Bu akımların etkisi, ne sıklıkta oluştukları kadar bataryanın o andaki çalışma koşullarına da bağlıdır. Özellikle düşük sıcaklık, yüksek şarj durumu ve yüksek şarj akımı bir araya geldiğinde lityum birikimi

gibi istenmeyen süreçlerin riski değerlendirilmelidir. İç dirençten kaynaklanan ısı oluşumu da bataryanın termal yüküne katkıda bulunabilir; ancak her frenleme olayının belirgin bir sıcaklık artışına veya daha hızlı yaşlanmaya yol açtığı varsayılmamalıdır. Öte yandan geri kazanılan enerjinin sürüşte yeniden kullanılması, bataryanın çevrim derinliğini azaltarak ömrüne olumlu katkı sağlayabilir. Bu nedenle batarya yönetim ve termal yönetim sistemleri, rejeneratif şarj akımını bataryanın şarj kabul ve sıcaklık sınırlarına göre düzenlemelidir (Keil ve Jossen, 2017; Huang, Qin ve Peng, 2015; Chidambaram ve ark., 2023).

Rejeneratif frenleme, sürüş sırasında bataryanın sürekli olarak küçük şarj ve deşarj döngülerine maruz kalmasına neden olur. Teorik olarak, bu durum zamanla bataryanın kimyasal yapısını etkileyerek lityum birikimi, elektrolit ara yüzeyi (SEI) oluşumu, gaz oluşumu, iç direnç artışı gibi olaylarla kapasitesinin düşmesine (degradasyon) yol açabilir. Ancak, bu etkiyi batarya yönetim sistemleriyle en aza indirmek mümkündür. Ayrıca kinetik enerjinin elektriğe dönüştürülmesi ve bataryaya aktarılması sırasında açığa çıkan Joule ısıtma olayı özellikle agresif veya sık frenlemelerde batarya paketini, ek bir ısı yüküne maruz bırakır. Bataryalar, ideal olarak belirli bir sıcaklık aralığında çalışmaktadırlar ve aşırı ısınma, batarya ömrünü kısaltan en önemli faktörlerden biridir. Yavaşlamayla elde edilen elektrik enerjisi bataryayı şarj ederken kısa süreliğine bir şarj-deşarj döngüsü meydana gelir ve bu batarya hücrelerinin daha hızlı eskimesine yol açabilir. Sert frenleme sırasında batarya ısınabilir ve ömrünü etkileyebilir. Batarya soğutma sistemi, aşırı ısınmayı önlemek için optimize edilmelidir.

Rejeneratif frenleme sisteminin batarya üzerindeki etkisi konusunda yapılan bilimsel araştırmaların sonuçlarından bahsedecek olursak; Elektrikli ve hibrit taşıtların kullanımında bataryalar, özellikle ani hızlanma, yavaşlama ve frenleme anlarında yüksek ve değişken yükler altında çalışırlar. Bu tür dinamik koşullar, pilin gerçek çalışma performansını doğrudan etkiler. Özellikle yüksek hızlanma ve rejen sırasında, lityum birikimi (Lithium plating) gibi olumsuz kimyasal etkilerin oluşma riski artar; bu durum, pilin ömrünü ve güvenliğini tehdit eder.

Keil ve Jossen'ın (2017) yaptıkları araştırma şarj-deşarj döngü derinliğinin (DoD) pil yaşlanmasıyla olan ilişkisi üzerinedir ve yüksek seviyeli rejeneratif fren kullanımının batarya ömrünü olumlu yönde etkileyebileceği sonucuna ulaşılmışlardır. Döngü derinliği arttıkça, kapasite kaybı ve iç direncin yükseldiği ifade edilerek bunun pilin genel performansını düşürdüğü belirtilmiştir. Bu durum, rejeneratif frenleme sisteminin bataryanın deşarj oranını azaltarak lityum birikimi olasılığını düşürdüğü şeklinde açıklanmıştır. Araştırmalarda ayrıca, kısa süreli ve yüksek akımlı şarjlara kıyasla uzun süreli ancak düşük akımlı şarj döngülerinin lityum birikimi olayının gerçekleşmesinde daha fazla katkı sağladığı belirlenmiştir. Bataryaların değişken yük senaryolarında test edilmesi hem dayanıklılıklarını anlamak hem de daha etkili yönetim stratejileri geliştirmek açısından kritik önem taşımaktadır. Özellikle yüksek şarj seviyesi ve düşük sıcaklıklarda rejeneratif frenleme, pilin kapasite kaybını ve iç direnç artışını azaltarak olumsuz etkileri dengelemektedir. Bu süreç, lityum birikimi riskini de düşürerek batarya sağlığına olumlu katkıda bulunmaktadır. Batarya ömrünü etkileyen ana faktörler akım, sıcaklık ve şarj durumu (SoC) olduğu ifade edilmiştir (Keil ve Jossen, 2017).

Wu ve ark. (2018) tarafından yürütülen simülasyon çalışmasında, bataryaya uygulanan şarj akımının kontrol edilmesiyle batarya üzerindeki ısıl ve çevrimsel etkilerin azaltılması amaçlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, batarya yaşlanmasının kontrol stratejisine dâhil edilmesi enerji geri kazanımını bir miktar azaltırken batarya ömrünü iyileştirmiştir. Bu bulgu, çalışmada kullanılan model ve koşullar çerçevesinde değerlendirilmelidir (Wu ve ark., 2018).

Rejeneratif frenleme sistemleri, enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda batarya sisteminde önemli bir kontrol sistemi olan termal yönetim sisteminin çalışma yükünü de etkiler. Yapılan bilimsel çalışmalarda bataryaların ısı üretiminin, frenleme gibi yüksek akım durumlarında arttığı belirtilmiştir. Bu nedenle, batarya sıcaklığını kontrol etmek için geliştirilmiş termal yönetim sistemlerinin kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Zaten batarya malzemesine göre şarj alma işleminde belirli bir sıcaklık aralığında

olması gerektiğinden termal yönetim sistemleri şarj esnasında bataryayı belirli bir sıcaklık değerinde tutmaktadır. Rejeneratif frenleme, taşıtın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek bataryayı şarj eder; ancak bu süreç, bataryada ani sıcaklık artışlarına neden olabilir. Taşıtlarda batarya termal yönetimi, özellikle hızlı şarj, ani hızlanma ve frenleme gibi durumlarda oluşan ısıyı (Joule ısıtma) dengelemek açısından önemlidir (Huang ve ark., 2015).

Elektrikli taşıt bataryalarında yaşlanma, zaman içinde kapasite kaybı ve iç direnç artışı gibi değişimlerle ortaya çıkar. Genellikle takvim yaşlanması ve çevrim yaşlanması olarak incelenir. Sıcaklık, şarj durumu (SoC), deşarj derinliği (DoD), şarj-deşarj akımı ve bataryanın kullanım profili yaşlanmayı etkileyen başlıca etkenlerdir. Keil ve Jossen'in (2015) belirli lityum iyon hücrelerle, farklı sıcaklık ve SoC koşullarında yürüttüğü deneylerde çevrim yaşlanmasının sıcaklık arttıkça azaldığı, takvim yaşlanmasının ise sıcaklık arttıkça arttığı bildirilmiştir. Bu sonuçlar test edilen hücre ve koşullar çerçevesinde değerlendirilmelidir; bütün bataryalara genellenemez (Keil ve Jossen, 2015).

Yüksek sıcaklıklar bazı durumlarda kalıcı kapasite kaybını yavaşlatsa da yaşlanmayı hızlandırmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise iç basınç artışı ve gaz birikimi gibi olumsuzluklar gözlendiğinden bu durum, pilin yapısal bütünlüğü için risk oluşturabilecek bir durum olduğu ifade edilmiştir (Keil ve Jossen, 2017).

Szumska ve Jurecki tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada elektrikli taşıtların frenleme sırasında geri kazandığı enerjinin miktarının, sürüş koşullarına göre değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Özellikle şehir içi gibi sık sık dur-kalk ve yavaşlama yapılan ortamlarda, rejeneratif frenleme sistemleri sayesinde toplam enerji tüketiminin yaklaşık %20'si geri kazanılabilmektedir. Bu geri kazanım, enerjinin doğru şekilde yönetilerek bataryaya aktarılmasıyla aracın menzilini artırmada önemli bir katkı sağlar. Ayrıca, günün farklı saatlerinde yapılan sürüşlerde de enerji kazanımı değişebilir; örneğin güzergâh/sürüş

profillerine göre öğleden sonra yapılan sürüşlerde yaklaşık %2 daha düşük enerji geri kazanılabildiği belirlenmiştir. Bu bulgular, elektrikli araçlarda frenleme stratejilerinin sürüş ortamına ve trafik yoğunluğuna göre ayarlanmasının hem enerji tasarrufu hem de batarya ömrünün uzaması açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Rejeneratif frenleme sistemleri elektrikli taşıtlarda olduğu kadar hibrit taşıtlarda da güvenli şekilde kullanılmaktadır. Hibrit taşıtlar göz önüne alındığında atık enerjiden faydalanılması egzoz emisyonlarının ve yakıt tüketiminin azaltılmasında etkili olmaktadır. Ayrıca mekanik fren sistemine ihtiyaç azaldığından balata tozlarının oluşumu azaldığı için çevreye olumsuz etkisi de azalır.

Keil ve Jossen (2017), elektrikli taşıtlardaki dinamik sürüş yükleri ve rejeneratif frenlemenin lityum iyon bataryaların yaşlanması üzerindeki etkisini farklı sıcaklık, şarj durumu (SoC) ve çevrim derinliği koşullarında incelemiştir. Çalışmada, değerlendirilen sürüş profili altında rejeneratif frenlemenin çevrim derinliğini azaltarak kapasite kaybını ve iç direnç artışını sınırladığı görülmüştür. Bununla birlikte batarya yaşlanmasının sıcaklık ve yük profiline verdiği yanıt değişebildiğinden, bu sonuç bütün bataryalara ve kullanım koşullarına genellenmemelidir. Batarya ömrünü değerlendirirken SoC, sıcaklık, çevrim derinliği ve şarj akımını birlikte dikkate almak gerekir (Keil ve Jossen, 2017).

Elektrikli bataryada iç direnç, bataryanın içindeki elektrik akımının akışına karşı gösterdiği toplam dirençtir. Bu direnç, elektrotlar, elektrolit, ayırıcı malzeme ve bağlantı elemanlarının birleşik etkisiyle oluşur. İç direnci etkileyen faktörler (Wu, 2025):

- **Sıcaklık:** yüksek sıcaklık iç direnci düşürürken pil yaşlanmasını hızlandırır; düşük sıcaklık ise direnci artırır.
- **Şarj Durumu (SoC):** Orta SoC aralığında direnç genellikle minimum, tam boş veya tam dolu halde yüksektir.
- **Yaşlanma ve Döngü Sayısı:** Zamanla malzeme değişiklikleri ve yan reaksiyonlar iç direnci artırır ve performansı düşürür.

Yüksek iç direnç, akım geçişi sırasında terminal voltajını azaltır ve Joule yasası uyarınca ısı üretimini artırır. Artan direnç verimliliği düşürür, maksimum deşarj akımını sınırlayarak menzil ve batarya ömrünü kısaltabilir. Kumar ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada bataryada iç direnç artışına bağlı olarak batarya sıcaklığının yükselmesi, gerçek zamanlı sıcaklık, batarya durumu (SoC) ve sağlığı (SoH) verilerine göre frenleme oranını ayarlayan kontrol sistemlerinin önemini ortaya koymuştur. Ayrıca, ultra kapasitörlerin kullanımı sayesinde hem ani güç taleplerinin karşılandığı hem de tepe akımların azaltılarak batarya ömrünün uzatıldığı vurgulanmaktadır.

Yapılan araştırmalar, geri kazanım oranlarının taşıt koşullarına, çevresel faktörlere ve batarya durumuna göre değiştiğini özellikle hafif ve düzgün frenleme hareketlerinde, enerji kazanım (regen) oranlarının %60'a kadar çıkabildiğini göstermiştir. Ancak, sıcaklıklar, arazi yapısı ve hız gibi faktörler bu oranları olumsuz etkilemektedir. Gelişmiş kontrol algoritmaları, taşıtın ve bataryanın anlık çalışma koşullarını dikkate alarak güvenli frenleme gereksinimlerini karşılamaya ve uygun olduğunda enerji geri kazanımını artırmaya yardımcı olur. Batarya yönetim sistemi (BMS), hücre gerilimlerini ve sıcaklıklarını izleyerek bataryanın kabul edebileceği şarj akımını sınırlar; hücreler arasındaki şarj durumu farklılıklarını da dengelemeye çalışır. Böylece hücrelerin izin verilen çalışma sınırlarının aşılması önlenebilir. Bu koruma, batarya performansının sürdürülmesine katkı sağlar; ancak batarya ömrünün uzamasını tek başına garanti etmez (Szumska, 2025).

Rejeneratif frenleme sistemlerinin performansı; aracın ilk hızı, frenleme sırasındaki yavaşlama ivmesi ve araç kütlesi gibi değişkenlere doğrudan bağlıdır. Yapılan teorik analizler ve pratik testlerle desteklenen bulgulara göre, şehir içi trafik koşullarında yavaş frenleme ivmesi (-1,0 m/s^2 altında) uygulandığında geri kazanılabilen maksimum güç genellikle 10 kW civarındayken daha yüksek ivmeli frenlemelerde (örneğin -1,6 m/s^2) bu değer 20 kW'ya kadar çıkabilmektedir. Bu, batarya şarj akımının doğrudan frenleme koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Batarya geriliminin 250 V olduğu basitleştirilmiş bir hesapta,

bataryaya aktarılan şarj gücü 10 kW ise akım yaklaşık 40 A, 20 kW ise yaklaşık 80 A olur (I = P/V). Gerçek sürüşte batarya gerilimi sabit kalmadığından ve enerji dönüşümünde kayıplar oluştuğundan bu değerler yaklaşık değerlerdir. Bir Ni-MH bataryanın kabul edebileceği anlık şarj akımı ise hücre ve paket tasarımına bağlıdır; 5C sınırı bütün Ni-MH bataryalar için genel bir özellik olarak verilmemelidir. Yalnızca 5C'ye izin veren belirli bir batarya varsayılırsa, 4–8 Ah kapasite yaklaşık 20–40 A akıma karşılık gelir; 80 A için aynı sınır altında en az 16 Ah kapasite gerekir. Dolayısıyla 4–8 Ah kapasitenin her iki frenleme güç düzeyi için yeterli olduğu sonucuna varılamaz. Frenleme sırasında bataryaya aktarılabilen enerji; frenleme talebi, sürüş koşulları ve bataryanın o andaki şarj kabul sınırlarıyla birlikte değerlendirilmelidir (Rakov, 2020; Szumska, 2025).

Rejeneratif frenleme, uygun çalışma koşullarında kinetik enerjinin bir bölümünü geri kazanarak enerji tüketiminin azaltılmasına ve sürüş menzilinin desteklenmesine katkı sağlar. Ayrıca sürtünmeli frenlerin kullanımını azaltarak balata ve disk aşınmasını sınırlayabilir; ancak bu etkinin büyüklüğü taşıtın kullanım koşullarına bağlıdır. Batarya üzerindeki etkisi ise tek yönlü değildir. Rejeneratif frenleme sırasında bataryaya aktarılan şarj akımlarının yaşlanmaya etkisi; hücre kimyası, sıcaklık, şarj durumu (SoC), akım profili ve batarya yönetim stratejisi gibi etkenlere bağlıdır. Geri kazanılan enerjinin daha sonra kullanılması bazı sürüş profillerinde bataryanın deşarj derinliğini azaltabilir, ancak kısa süreli rejeneratif şarj darbeleri tek başına batarya ömrünün uzayacağını veya kısalacağını göstermez. Batarya yönetim sistemi (BMS), bataryanın şarj kabul sınırlarını gözeterek aşırı şarjı önlemeye ve güvenli çalışmayı sürdürmeye yardımcı olur. Bu nedenle rejeneratif frenlemenin batarya sağlığına ve fren bileşenlerinin kullanım ömrüne etkisi, belirli taşıt ve kullanım koşulları çerçevesinde değerlendirilmelidir.

Rejeneratif frenleme, elektrikli ve hibrit taşıtların verimliliği ve menzili için en önemli teknolojilerden biridir. Her ne kadar bataryanın ömrü üzerinde döngüsel stres ve ısı gibi potansiyel olumsuz etkileri olsa da batarya yönetim sistemleri bu riskleri etkin

bir şekilde yönetmektedir. Gelişmiş yazılım ve donanım bileşenleri, bataryanın çalışma sınırlarını gözeterek rejeneratif frenleme sisteminin taşıt performansını ve enerji verimliliğini desteklemesine katkı sağlar (Chidambaram ve ark., 2023).

Hibrit taşıtlarda kullanılan batarya türü, üreticiye ve model sürümüne göre değişmektedir. Örneğin Toyota'nın 2021 Prius ürün bilgilerinde bazı sürümler için nikel-metal hidrür (NiMH), diğerleri için lityum iyon batarya listelenmiştir. Bu nedenle Toyota'nın hibrit modellerinde lityum iyon yerine genel olarak Ni-MH batarya tercih ettiği söylenemez. Tam elektrikli taşıtlara örnek olarak 2023 model Nissan Leaf S, üreticinin teknik bilgilerine göre 40 kWh lityum iyon batarya ve 110 kW elektrik motoruyla sunulmuştur. Aynı sürüm için 6,6 kW araç içi AC şarj cihazı ve 50 kW DC hızlı şarj bağlantısı belirtilmektedir. Bu değerler, şarj donanımının özelliklerini tanımlar; frenleme sırasında bataryaya aktarılabilecek rejeneratif gücü doğrudan göstermez. Rejeneratif frenleme gücü ayrıca taşıtın hızı, frenleme talebi ve bataryanın anlık şarj kabul koşullarına bağlıdır. Bu nedenle rejeneratif frenlemenin batarya üzerindeki etkisi, belirli bir araç sürümü ve tanımlanmış ölçüm koşulları üzerinden değerlendirilmelidir (Toyota, 2021; Anonim-E, 2022; Nissan, 2023; Szumska, 2025).

7. LİTERATÜR SENTEZİ VE SINIRLILIKLAR

Hem elektrikli hem de hibrit araçlarda rejeneratif frenleme konusu bilimsel alanda oldukça ilgi çeken araştırma ve analiz konusudur. En sık ele alınan konuların ise enerji geri kazanım sistemi kontrolündeki algoritmalar (elektrik motoru kontrolü, kontrolör çalışma kontrolü), enerji geri kazanım sisteminin sürtünmeli fren sistemi ile entegrasyonu, geri kazanılmış enerji depolama sistemleri, elektrikli makineler ve sürtünmeli frenlerde kullanılan malzemeler olduğu görülmektedir.

7.1. Rejeneratif Frenlemenin Avantajları ve Sınırlamaları

Rejeneratif frenleme sistemlerinin başlıca avantajı, taşıt yavaşlarken kinetik enerjinin bir bölümünü elektrik enerjisine dönüştürerek yeniden kullanılmasına olanak sağlamasıdır. Geri kazanılan enerji, uygun koşullarda bataryada depolanabilir; bu da elektrikli taşıtlarda enerji tüketimini azaltıp menzili destekleyebilir. Sürtünmeli frenlere duyulan gereksinimin azalması, balata ve disk aşınmasını ve buna bağlı bakım ihtiyacını sınırlayabilir. Hibrit taşıtlarda ise enerji geri kazanımı yakıt tüketiminin ve buna bağlı egzoz emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Ancak bu kazanımlar sürüş koşullarına ve taşıt tasarımına bağlıdır; bütün taşıtlar için %25 yakıt tasarrufu veya içten yanmalı motor ömründe belirli bir artış garanti edilemez (Hamada ve Orhan, 2022; Szumska, 2025).

Sistemin sınırlamaları yalnızca elektriksel değildir. Frenleme sırasında geri kazanılabilecek enerji; motorun üretebildiği fren torku, güç elektroniğinin kapasitesi, bataryanın şarj kabul sınırları ve güvenli yavaşlama gereksinimiyle sınırlanır. Motor ile eviricinin çalışması sırasında elektriksel büyüklüklerin, bataryaya enerji aktarılırken de gerilim ve akımın uygun biçimde kontrol edilmesi gerekir; bu nedenle üretilen elektrikle besleme frekansının eşleştirilmesi bütün rejeneratif frenleme sistemlerini açıklayan genel bir ifade değildir. Batarya yüksek doluluk düzeyindeyse

kontrol sistemi rejeneratif frenleme torkunu azaltabilir veya devre dışı bırakabilir; bu durumda gerekli frenleme sürtünmeli frenlerle sağlanır. Ek bileşenler maliyet, kütle ve kontrol karmaşıklığı yaratabilir. Ancak sistemin her taşıtta 25–30 kg kütle artışına neden olduğu söylenemez; böyle bir değer yalnızca ait olduğu taşıt ve sistem tasarımı belirtilerek kullanılmalıdır (Bhandari ve ark. 2017; Saiteja ve ark., 2022; Küçükaydın, 2024; Szumska, 2025).

7.2. Batarya Etkileri Üzerine Literatür Sentezi

Kitabın temel değerlendirme konusu olan batarya etkisi, rejeneratif frenlemenin yarar ve sınırlamalarının bir arada görüldüğü alandır. Taşıtın hızlanma ve yavaşlaması, bataryada sürekli değişen bir deşarj ve şarj yük profili oluşturur. Frenleme sırasında geri kazanılan enerji kısa süreli şarj akımları biçiminde bataryaya aktarılabilir. Bu akımların etkisi yalnızca büyüklüklerine bağlı değildir; bataryanın sıcaklığı, şarj durumu (SoC), hücre özellikleri ve sürüş boyunca tekrarlanma biçimleri de önemlidir. Bu sebeple batarya üzerindeki etkiler değerlendirilirken tek bir frenleme anına değil, taşıtın tüm kullanım profiline bakılmalıdır (Keil ve Jossen, 2017; Chidambaram ve ark., 2023).

Rejeneratif frenlemenin batarya ömrünü mutlaka kısalttığı veya mutlaka uzattığı söylenemez. Yüksek şarj akımları, düşük sıcaklık ve yüksek şarj durumu gibi koşullar, belirli yaşlanma mekanizmaları açısından dikkat gerektirir. Öte yandan geri kazanılan enerjinin sürüşte yeniden kullanılması, bataryanın deşarj derinliğini azaltarak yararlı bir etki oluşturabilir. Keil ve Jossen'in (2017) gerçekçi sürüş yükleriyle yürüttüğü deneysel çalışmada rejeneratif frenleme, çevrim derinliğini düşürmüş; bununla ilişkili olarak kapasite kaybı ve iç direnç artışı azalmıştır. Bu bulgu, şarj darbelerine ilişkin olası risklerin göz ardı edilmesi gerektiği anlamına gelmez. Asıl sonuç, batarya ömrü üzerindeki net etkinin çalışma koşullarına göre belirlenmesi gerektiğidir (Keil ve Jossen, 2017; Chidambaram ve ark., 2023).

Sıcaklık, bu değerlendirmede özellikle önemlidir. Düşük sıcaklıkta bataryanın şarj kabulü ve yaşlanmaya ilişkin davranışı değişebilir; yüksek sıcaklıklarda ise bataryanın termal yükünün

yönetilmesi gerekir. Ancak yaşlanmanın sıcaklığa verdiği yanıt bütün mekanizmalar için aynı değildir. Dolayısıyla belirli bir ortam sıcaklığını tüm bataryalar açısından değişmez bir optimum değer olarak sunmak doğru olmaz. Batarya kimyası, şarj durumu ve yük profiliyle birlikte sıcaklığın nasıl değiştiği incelenmelidir. Huang, Qin ve Peng'in (2015) simülasyon çalışması, rejeneratif frenleme oranına bağlı şarj akımının düzenlenmesiyle bataryanın sıcaklık artışının sınırlanabileceğini göstermiştir. Bu sonuç, frenleme kontrolü ile batarya termal yönetiminin birlikte tasarlanmasının önemini ortaya koymaktadır; ancak simülasyon sonucunun farklı araç ve batarya düzenlerinde ayrıca doğrulanması gerekir.

Batarya yönetim sistemi (BMS), rejeneratif frenleme sırasında oluşan değişken enerji akışlarının güvenli biçimde işlenmesinde merkezi bir rol üstlenir. Bataryanın şarj durumu, sıcaklığı ve izin verilen şarj akımı izlenerek geri kazanılan enerjinin ne kadarının bataryaya yönlendirilebileceği belirlenmelidir. Bataryanın enerji kabulünün sınırlı olduğu koşullarda, sürücünün yavaşlama talebinin karşılanması için sürtünmeli frenlerle uyumlu bir geçiş sağlanmalıdır. Batarya sağlık durumunun (SoH) izlenmesi de uzun dönemli performansın değerlendirilmesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte yalnızca SoH tahmin yönteminin geliştirilmesi veya rejenerasyon düzeyinin artırılması, tek başına batarya ömrünün uzayacağını garanti etmez. Belirleyici olan, bataryaya uygulanan yükün güvenlik ve yaşlanma sınırları içinde yönetilmesidir (Saiteja ve ark., 2022; Chidambaram ve ark., 2023).

8. SONUÇ VE ARAŞTIRMA GEREKSİNİMLERİ

Yükseköğretim kurumları, bilginin üretilmesi, bilimsel araştırmaların gerçekleştirilmesi ve eğitim faaliyetlerinin mükemmeliyetçilik anlayışı çerçevesinde yürütülmesi bakımından önemli kuruluşlardır (Çini ve Demir, 2023). Bu kurumların amaçlarına ulaşabilmesinde insan faktörü belirleyici bir role sahip olup, insan kaynağının etkin ve verimli kullanılması kurumsal başarının temel unsurlarından birini oluşturmaktadır. Bu bağlamda kariyer gelişimi, bireyin çalışma yaşamı boyunca üstlendiği görevleri, örgüt içerisindeki konumunu, tutum ve davranışlarını kapsayan; bilgi, beceri ve yeteneklerini geliştirerek mesleki hedeflerine ulaşmasını sağlayan sürekli bir süreç olarak değerlendirilmektedir (Demir ve Çini, 2014). Kurumsal başarının bir diğer önemli bileşeni olan kalite ise ürün veya hizmetlerin belirlenen gerekliliklere uygunluğunu ifade etmekte ve bu uygunluğun sağlanmasında tasarım ile üretim süreçlerinin etkin biçimde yönetilmesi önem taşımaktadır (Demir, 2024). Bununla birlikte, bireylerin bilgi ve becerilerinin geliştirilmesinde eğitim ve öğrenme faaliyetleri önemli bir yere sahip olup, bu faaliyetler insanlık tarihi boyunca toplumsal ve kurumsal gelişimin temel unsurları arasında yer almıştır (Demir, 2025). Özellikle küreselleşmenin etkisiyle yoğunlaşan rekabet ortamında kuruluşların sürdürülebilir başarı elde edebilmesi ve rakiplerine karşı rekabet üstünlüğü sağlayabilmesi, sahip oldukları insan kaynağının niteliğine ve bu kaynağın etkin yönetimine bağlıdır. Dolayısıyla çalışanların iş tatmini, örgütsel bağlılığı, kariyer gelişimi ve eğitim olanaklarının desteklenmesi, örgütsel performansın ve rekabet gücünün artırılmasında önemli bir etken olarak değerlendirilmektedir (Demir ve Çini, 2012). Bu doğrultuda, hazırlanan bu kitabın yükseköğretim kurumlarında eğitim gören öğrencilerin mesleki bilgi ve becerilerinin geliştirilmesine katkı sağlamasının yanı sıra akademik ve mesleki çalışmalarına rehberlik ederek kariyer hedeflerini şekillendirmelerine de yardımcı olması amaçlanmaktadır.

Rejeneratif frenleme sistemleri, elektrikli ve hibrit taşıtlarda yavaşlama sırasında taşıtın kinetik enerjisinin bir bölümünü yeniden kullanılabilir enerjiye dönüştürmektedir. Bu çalışmada sistemlerin tarihsel gelişimi, türleri, çalışma ilkeleri ve kontrol algoritmaları incelenmiş; özellikle batarya performansı ve ömrü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. İncelenen literatür, rejeneratif frenlemenin enerji geri kazanımına katkı sağladığını, ancak bu katkının büyüklüğünün taşıtın özelliklerine, sürüş koşullarına, enerji depolama birimine ve uygulanan kontrol stratejisine bağlı olduğunu göstermektedir (Hamada ve Orhan, 2022; Szumska, 2025).

Geleneksel sürtünmeli frenleme sırasında taşıtın hareket enerjisi büyük ölçüde ısıya dönüşerek çevreye yayılır. Rejeneratif frenleme ise bu enerjinin bir bölümünü ısıya dönüşmeden önce elektrik enerjisi olarak geri kazanır. Geri kazanılan enerji, bataryada veya uygun başka bir depolama biriminde tutulup sonraki sürüş aşamalarında kullanılabilir. Böylece taşıtın dışarıdan karşılaması gereken enerji miktarı azaltılabilir ve sürüş menzili desteklenebilir. Sürtünmeli frenlerin daha az kullanılması, fren bileşenlerinin aşınmasını azaltma potansiyeli de taşır. Bununla birlikte her frenleme olayında enerjinin tamamının geri kazanılması mümkün değildir. Dönüşüm kayıpları, depolama biriminin enerji kabul sınırları ve güvenli yavaşlama gereksinimi, rejeneratif frenlemenin sağlayabileceği kazanımı sınırlar (Hamada ve Orhan, 2022; Chidambaram ve ark., 2023).

Bu nedenle rejeneratif frenlemenin başarısı yalnızca geri kazanılan enerji miktarıyla ölçülmemelidir. Frenleme sırasında sürücünün talep ettiği yavaşlamanın tutarlı biçimde sağlanması, taşıtın kararlılığının korunması ve sistemin farklı yol koşullarında güvenilir çalışması da temel ölçütlerdir. Rejeneratif frenler, sürtünmeli frenlerin bütün koşullardaki yerini alamaz; iki sistemin birlikte ve uyum içinde çalışması gerekir. Kontrol ünitesi, mevcut koşullarda uygulanabilecek rejeneratif frenleme miktarını belirlerken karşılanamayan frenleme talebini mekanik frenlere aktarabilmelidir. Böyle bir yaklaşım, enerji kazanımını fren güvenliğinden ayrı bir hedef olarak değil, onunla birlikte

yönetilmesi gereken bir tasarım problemi olarak ele alır (Saiteja ve ark., 2022; Chidambaram ve ark., 2023).

Yüksek güçlü ve kısa süreli enerji akışlarını yönetmek için batarya ile süper kapasitörün birlikte kullanıldığı hibrit depolama sistemleri de değerlendirilmiştir. Süper kapasitör, frenleme sırasında ortaya çıkan anlık güç talebinin bir bölümünü karşılayarak batarya üzerindeki yükün paylaşılmasına yardımcı olabilir; hızlanma sırasında da anlık güç gereksinimine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte süper kapasitörün temel yararı uzun süreli enerji depolama değil, kısa süreli yüksek güçlü enerji alışverişidir. Ayrıca ek depolama bileşenleri maliyet, ağırlık ve kontrol karmaşıklığı getirir. Bu nedenle hibrit depolama sistemlerinin batarya ömrüne ve enerji verimliliğine katkısı, tüm taşıt sistemi düzeyinde değerlendirilmelidir (Szumska, 2025).

Kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, enerji geri kazanımı ile batarya sağlığı ve fren güvenliği arasındaki dengenin kurulmasına katkıda bulunabilir. Literatürde bulanık mantık, uyarlamalı kontrol ve model öngörülü kontrol gibi farklı yaklaşımlar ele alınmaktadır. Geçmiş sürüş verilerinden yararlanan veya yaklaşan sürüş koşullarını öngören yöntemler de araştırma konusu olabilir. Ancak bir algoritmanın üstünlüğü yalnızca daha fazla enerji geri kazanmasına göre belirlenmemelidir. Frenleme talebini güvenilir biçimde karşılaması, bataryaya yöneltilen tepe akımları yönetmesi, farklı koşullarda kararlı çalışması ve uygulanabilir hesaplama gereksinimlerine sahip olması da değerlendirilmelidir (Saiteja ve ark., 2022; Szumska, 2025).

Bu çerçevede, batarya teknolojileri ile rejeneratif frenleme sistemlerinin daha iyi bütünleştirilmesi için aşağıdaki çalışmalar öncelikli görünmektedir:

1. Frenleme sırasında oluşan akım ve enerji akışlarının gerçek zamanlı izlenmesi; geri kazanılan enerjinin bataryanın o andaki kabul sınırlarına göre yönlendirilmesi.
2. Bataryanın SoC, SoH ve sıcaklık bilgilerinin frenleme kontrolünde birlikte kullanılması; termal yönetim ve rejeneratif frenleme kararlarının eşgüdümlü verilmesi.

3. Tepe şarj akımlarını sınırlayan kontrol stratejilerinin ve batarya–süper kapasitör gibi hibrit depolama düzenlerinin karşılaştırılması.
4. Geri kazanılan enerjiyi bataryanın uygun gerilim ve akım düzeylerinde kabul edebilmesini sağlayan güç elektroniği çözümlerinin geliştirilmesi.
5. Farklı hücre kimyalarının, sıcaklıkların ve sürüş profillerinin uzun dönemli batarya yaşlanması üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilir yöntemlerle incelenmesi.
6. Sürücü davranışına ve yol koşullarına uyum sağlayan algoritmaların enerji kazanımı kadar fren güvenliği, maliyet ve sistem karmaşıklığı açısından da sınanması.

Bu maddeler, mevcut çalışmanın bütün taşıtlar için doğruladığı uygulama sonuçları olarak değil, literatürden hareketle belirlenen tasarım ve araştırma öncelikleri olarak değerlendirilmelidir. Özellikle batarya yaşlanması hakkında farklı sıcaklık, şarj durumu ve kullanım profillerinde elde edilen bulguların birlikte yorumlanması gerekir. Kısa süreli bir enerji kazanımı ölçümü, tek başına uzun dönemli batarya ömrünü açıklamaz. Aynı şekilde bir batarya hücresinde veya simülasyonda gözlenen sonuç, farklı hücre kimyasına ya da taşıt mimarisine doğrudan aktarılmamalıdır (Keil ve Jossen, 2017; Szumska, 2025).

Sonuç olarak rejeneratif frenleme, elektrikli ve hibrit taşıtlarda enerji verimliliğini destekleyen önemli bir teknolojidir. Batarya sürdürülebilirliğine katkısı ise yalnızca ne kadar enerji geri kazanıldığına değil, enerjinin hangi sıcaklıkta, hangi şarj durumunda ve hangi akım profiliyle depolandığına bağlıdır. Bu nedenle motor ve güç elektroniği, fren kontrolü, batarya yönetimi ve termal yönetim birbirinden bağımsız çözümler olarak değil, tek bir taşıt sistemi içinde ele alınmalıdır. Rejeneratif frenlemenin gerçek yararı, enerji kazanımı sağlanırken güvenli frenleme ve kabul edilebilir batarya yaşlanmasının birlikte korunmasıyla ortaya konabilir. Daha geniş anlamda taşıtların sürdürülebilirliği değerlendirilirken de kullanım sırasındaki enerji kazanımının yanı sıra üretim, enerji kaynağı, bakım ve kullanım ömrü sonundaki etkiler dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

Ajith, T. A. ve Dhas, G. J. S. (2018). A surveyon hybrid energy storage system for EV with regenerative braking, 2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCCT), 250-255.

Alam, M. N. (2024). Regenerative Braking and Rapid Acceleration System for Electric Vehicles Using Integrated Battery and Supercapacitor, 2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET), 1-6.

Ambe, N. A., Sharma, V., Sethi, K. ve Fallah, M. H. (2024). Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles (EVs): A Review, 2024 3rd Edition of IEEE Delhi Section Flagship Conference (DELCON), 1-5.

Anbumani, K., Pavithraa, J., Sivaramaguru, M. ve Dhanush, B. (2023). Integrating Regenerative Braking with Advanced Battery Management for Sustainable Transportation, 2023 Intelligent Computing and Control for Engineering and Business Systems (ICCEBS), 1-7.

Anonim-A, (2025). Regenerative braking, https://en.wikipedia.org/wiki/Regenerative_braking, Erişim tarihi: 12.06.2025.

Anonim-B, (2021). All-Electric Vehicles, https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy - US Department of Energy. Erişim tarihi: 20.06.2025.

Anonim-C, (2025). Flywheel energy storage, https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage, Erişim tarihi: 15.07.2025.

Anonim-D, (2022). Power Loss Calculation Using Joule's Heating Formula, https://resources.pcb.cadence.com/blog/2022-power-loss-calculation-using-joules-heating-formula, Author: Cadence PCB Solutions, Erişim tarihi: 10.06.2025.

Anonim-E, (2022). Does regenerative braking positively or negatively affect battery longevity?, https://www.reddit.com/r/electricvehicles/comments/uwm7lp/does_regenerative_braking_positively_or, Erişim tarihi: 15.04.2025.

Armenta-Déu, C.; Cortés, H. (2023). Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems in Electric Vehicles. Vehicles, 5, 387–403, https://doi.org/10.3390/vehicles5020022.

Augustynowicz, A. (2022). Tendencies in development of energy assistance systems in an electric car. Combustion Engines. 190(3), 95-103. https://doi.org/10.19206/CE-145714.

Balasubramanian, B. ve Huzefa, A. (2017). Development of regeneration braking model for electric vehicle range improvement, 2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), 1-5.

Bhandari, P., Dubey, S., Kandu, S., ve Deshbhratar, R. (2017). Regenerative braking systems (RBS). International Journal of Scientific & Engineering Research, 8(2), 71-74.

Chen, L., Zhang, J., Li, Y. ve Yuan, Y. (2015). Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles. Energy Conversion and Management, 92, 469-482.

Chengqun, Q., Wan, X., Wang, N., Cao, S., Ji, X., Wu, K., Hu, Y. ve Meng, M. (2023). A novel regenerative braking energy recuperation system for electric vehicles based on driving style, Energy, 283, 129055.

Chidambaram, R. K., Chatterjee, D., Barman, B., Das, P. P., Taler, D., Taler, J., ve Sobota, T. (2023). Effect of Regenerative Braking on Battery Life. Energies, 16(14), 5303. https://doi.org/10.3390/en16145303.

Çini, M.A. ve Demir, M.E. (2023). International Research in Social, Human and Administrative Sciences XX, Bölüm-1: Cronyism in Higher Education Institutions, Eğitim Publishing, Editor: Assist Prof. Dr. Olcay Tire, 1st edition, pp. 1-19, ISBN:978-625-6613-86-7.

Demir, M.E. ve Çini, M.A. (2014). Konya Bankacılık Sektöründe Eğitim ve Kariyer Fırsatları Açısından İş Tatmininin Örgütsel Bağlılık Üzerine Etkisi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi, 14(1-2), 161-171. https://izlik.org/JA85CS99BJ

Demir, M. E. ve Çini, M. A. (2012). Relationship of Job Satisfaction with Organizational Commitment: Example Event Study in Konya Banking Sector, International Journal of Multidisciplinary Thought, Vol.02, N:3, ss.59-64.

Demir, M.E. (2024). Kalite Yönetim Sistemi ve İnsan Kaynakları, e-ISBN: 978-625-5971-77-7, p. 122, Eğitim Publishing, Konya.

Demir, M.E. (2025). Örgütlerde İşgücü Eğitimi, E-ISBN: 978-625-385-708-0, p. 95, Eğitim Publishing, Konya.

Ehsani, M., Gay, S.E. ve Emadi, A. (2018). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, CRC Press, s.572, ISBN: 9780429504884, https://doi.org/10.1201/9780429504884.

Erdem, Y. ve Taci, M. S. (2018). Effect of regenerative braking and power analysis in electric vehicles, Journal of Current Researches on Engineering, Science and Technology, 4 (2), 75-88.

Feng, J., 2022, Brake energy recovery system for electric vehicle, International Journal of Ambient Energy, 43 (1), 942-945.

Gao, Y., Chu, L. ve Ehsani, M. (2007). Design and control principles of hybrid braking system for EV, HEV and FCV. In 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 384-391), ISSN: 1938-8756, 10.1109/VPPC.2007.4544157, IEEE, TX, USA.

Gulhane, A. P., Khubalkar, S. ve Dudhe, S. (2024). Design of Electric Vehicle Regenerative Braking System, 2024 International Conference on Advancements in Power, Communication and Intelligent Systems (APCI), 1-6.

Gou, Y. (2016). Research on Electric Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery. Int. J. Hybrid Inf. Technol. 9, 81–90, http://dx.doi.org/10.14257/ijhit.2016.9.1.08.

Hamada, A. T. ve Orhan, M. F. (2022). An overview of regenerative braking systems, Journal of Energy Storage, 52, 105033. doi:10.1016/j.est.2022.105033

Hamdan, H., Arnaout, M. ve Koubayssi, A. (2023). Enhancement Simulation of Electric Vehicle Regenerative Brake System, 2023 IEEE 4th International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET), 91-95.

Heydari, S., Fajri, P., Sabzehgar, R. ve Asrari, A. (2020). Optimal brake allocation in electric vehicles for maximizing energy harvesting during braking, IEEE Transactions on Energy Conversion, 35 (4), 1806-1814.

Huang, J., Qin, D. ve Peng, Z. (2015). Effect of energy-regenerative braking on electric vehicle battery thermal management and control method based on simulation investigation, Energy Conversion and Management, 105, 1157-1165. doi:10.1016/j.enconman.2015.08.080

Hosseini, S. M., Soleymani, M., Kelouwani, S., ve Amamou, A. A. (2023). Energy recovery and energy harvesting in electric and fuel cell vehicles, a review of recent advances. IEEE Access, 11, 83107-83135, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3301329.

Keil, P. ve Jossen, A. (2015). Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles: Impact of regenerative braking, World Electric Vehicle Journal, 7 (1), 41-51. https://doi.org/10.3390/wevj701004, https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1355829

Keil, P. ve Jossen, A. (2017). Impact of dynamic driving loads and regenerative braking on the aging of lithium-ion batteries in electric vehicles, Journal of the electrochemical society, 164 (13), A3081–A3092. https://doi.org/10.1149/2.0801713jes

Krishnamoorthy, K., Pazhamalai, P., Mariappan, V. K., Manoharan, S., Kesavan, D. ve Kim, S. J. (2021). Two-dimensional siloxene–graphene heterostructure-based high-performance supercapacitor for capturing regenerative braking energy in electric vehicles, Advanced Functional Materials, 31 (10), 2008422.

Kropiwnicki, J.; Gawłas, T. (2023). Estimation of the Regenerative Braking Process Efficiency in Electric Vehicles. Acta Mech. Autom. 17, 303–310, https://doi.org/10.2478/ama-2023-0035.

Kumar, R. C., Chatterjee, D., Barman, B., Das, P. P., Taler, D., Taler, J. ve Sobota, T., (2023). Effect of Regenerative Braking on the Life of Battery. https://www.preprints.org/frontend/manuscript/2c7abac50eff78581953a75ea8f78604/download_pub, 10.20944/preprints202306.1382.v1

Küçükaydın, A. (2024). Rejeneratif frenleme sistemi, https://ceyrekmuhendis.com/rejeneratif-frenleme-sistemi/?hl=tr-TR, Erişim tarihi: 10.06.2025.

Lampton, C. (2024). How Regenerative Braking Works. https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/regenerative-braking.htm, Erişim tarihi: 15.12.2024

Lee, G., Song, J., Han, J., Lim, Y. ve Park, S. (2023). Study on Energy Consumption Characteristics of Passenger Electric Vehicle According to the Regenerative Braking Stages During Real-World Driving Conditions. Energy, 283, 128745, https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128745.

Lohse-Busch, H., Duoba, M., Rask, E., Stutenberg, K., Gowri, V., Slezak, L. ve Anderson, D. (2013). Ambient Temperature (20°F, 72°F and 95°F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle. SAE 2013-01-1462, https://doi.org/10.4271/2013-01-1462.

Lv, C., Zhang, J., Li, Y., ve Yuan, Y. (2015). Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to

energy efficiency improvement of electrified vehicles. Energy Conversion and Management, 92, 469-482, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.092

Munaaf, S. A., Vasudevan, B. ve Routray, S. (2024). Regenerative Braking Solutions for Electric Vehicles: Advancing Efficiency and Energy Recapture, 2024 9th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 331-337.

Naseri, F., Farjah, E. ve Ghanbari, T., (2016). An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66 (5), 3724-3738.

Nissan. (2023). 2023 Nissan Leaf Broşür. https://www.nissanusa.com/content/dam/Nissan/us/vehicle-brochures/2023/2023-nissan-nissan-leaf-brochure-en.pdf

Patle, T. ve Subha, D. (2023). Energy management of a hybrid energy storage system during regenerative braking in electric vehicle, 3rd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON), 1-7.

Pannone, G., B. Betz, M. Reale, ve J. Thomas. (2017). Decomposing Fuel Economy and Greenhouse Gas Regulatory Standards in the Energy Conversion Efficiency and Tractive Energy Domain. SAE Int. J. Fuels Lubr. 10(1):202-216, 2017, https://doi.org/10.4271/2017-01-0897.

Qiu, C., Wang, G., Meng, M., ve Shen, Y. (2018). A Novel Control Strategy of Regenerative Braking System for Electric Vehicles under Safety Critical Driving Situations. Energy, 149, 329–340, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.046.

Raghuwanshi, A. ve Ojha, A. (2023). An overview of the regenerative braking technique and energy storage systems in electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles, 2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 1-6.

Rakov, V. (2020). Determination of optimal characteristics of braking energy recovery system in vehicles operating in urban conditions, Transportation Research Procedia, 50, 566-573.

Rhodes, K., D. Kok, P. Sohoni, E. Perry, et al. (2017). Estimation of the Effects of Auxiliary Electrical Loads on Hybrid Electric Vehicle Fuel Economy. SAE Technical Paper 2017-01-1155, https://doi.org/10.4271/2017-01-1155.

Schwarzer, Von C. M. (2019). Bremsenergierückgewinnung und ihr Wirkungsgrad,

https://www.heise.de/news/Bremsenergierueckgewinnung-und-ihr-Wirkungsgrad-4340576.html (in German), Erişim tarihi: 20.06.2025.

Shepard, J. (2023). What control strategies can be used for regenerative braking in EVs? https://www.evengineeringonline.com/what-control-strategies-can-be-used-for-regenerative-braking-in-evs/, Erişim tarihi: 02.08.2025.

Saiteja, P., Ashok, B., Wagh, A. S. ve Farrag, M. E. (2022). Critical review on optimal regenerative braking control system architecture, calibration parameters and development challenges for EVs. International Journal of Energy Research, 46(14), 20146-20179, https://doi.org/10.1002/er.8306.

Szumska, E.M. ve Jurecki, R. (2022). The Analysis of Energy Recovered during the Braking of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions. Energies, 15 (24), 9369, https://doi.org/10.3390/en15249369.

Szumska, E.M. (2025). Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges, Energies, 18 (10), 2422, https://doi.org/10.3390/en18102422.

Toyota. (2021). 2021 Prius Broşürü. https://www.toyota.com/content/dam/toyota/brochures/pdf/2021/prius_ebrochure.pdf

U.S. Department of Energy. (2020). Where the energy goes: Gasoline vehicles. FuelEconomy.gov. https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml

Valladolid, J.; Calle, M.; Guiracocha, A. (2023). Analysis of Regenerative Braking Efficiency in an Electric Vehicle through Experimental Tests. Ingeius, 29, 24–30, https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.02.

Varocky, B. J., Nijmeijer, H., ve Besselink, I. J. M. (2011). Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car. https://web.archive.org/web/20191126174903/http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12673.pdf, Eindhoven University of Technology, Report No. D&C 2011.002, Hollanda.

Vasiljević, S., Aleksandrović, B., Glišović, J. ve Maslać, M. (2022). Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012025.

Vodovozov, V., Raud, Z. ve Petlenkov, E. (2021). Review on braking energy management in electric vehicles, Energies, 14 (15), 4477.

Wu, C. (2025). Battery internal resistance - comprehensive analysis and optimization solutions, https://batteryswapstation.com/tr/battery-internal-resistance-comprehensive-analysis-and-optimization-solutions, Erişim tarihi: 15.08.2025.

Wu, J., Wang, X., Li, L., Qin, C. a. ve Du, Y. (2018). Hierarchical control strategy with battery aging consideration for hybrid electric vehicle regenerative braking control, Energy, 145, 301-312.

Yu, Z., Feng, H., Meng, Y., Xu, E. ve Wu, Y. (2022) Braking energy management strategy for electric vehicles based on working condition prediction, AIP Advances, 12 (1).

Zhang, Y. ve Tong, L. (2022). Regenerative braking-based hierarchical model predictive cabin thermal management for battery life extension of autonomous electric vehicles, Journal of Energy Storage, 52, 104662. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104662

Zhang, H., Chen, D., Zhang, H., ve Liu, Y. (2022). Research on the influence factors of brake regenerative energy of pure electric vehicles based on the CLTC. Energy Reports, 8, 85-93, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.259.

Zhao, Z., Li, L., Ou, Y., Wang, Y., Wang, S., Yu, J., ve Feng, R. (2023). A comparative study on the energy flow of electric vehicle batteries among different environmental temperatures. Energies, 16(14), 5253, https://doi.org/10.3390/en16145253.

Zhu, Y., Wu, H. ve Zhang, J. (2020). Regenerative braking control strategy for electric vehicles based on optimization of switched reluctance generator drive system, IEEE Access, 8, 76671-76682. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990349