

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN ENERJİ
DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNİN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Saim ÜNAL

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ

ŞUBAT 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN ENERJİ
DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNİN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan Saim ÜNAL
(526211014)**

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ

ŞUBAT 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 526211014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan Saim ÜNAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNİN ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tankut ACARMAN
Galatasaray Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sıddık Murat YEŞİLOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 10 Ocak 2025
Savunma Tarihi : Şubat 2025





Çok değerli aileme,



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, demiryolu taşımacılığının sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik araştırma çabalarımın sonucunu temsil etmektedir. Bu çalışmanın ilham kaynağı, enerji verimliliği ve çevresel zorlukları ele alan mühendislik çözümlerine olan derin ilgimden ortaya çıkmıştır.

Bu araştırma boyunca paha biçilmez rehberliği ve desteği için danışmanım Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Onun uzmanlığı ve teşviki bu çalışmanın şekillenmesinde etkili olmuştur. Ayrıca İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Fakültesi öğretim üyelerine ve personeline kaynak ve yardımlarından dolayı minnettarım. Bu yolculuk sırasında yapıcı geri bildirimleri ve işbirlikleri için meslektaşlarıma ve akranlarıma, sarsılmaz destekleri ve anlayışları için aileme ve arkadaşlarıma özellikle teşekkür ederim.

Bu tez, sürdürülebilir ve verimli ulaşım sistemlerinin arayışına adanmıştır ve bu kritik alanda devam eden çabalara katkıda bulunacağını umuyorum.

Ocak 2025

Hasan Saim ÜNAL
Elektronik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxii
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Demiryolu Taşımacılığına Genel Bakış	2
1.2 Demiryolu Taşımacılığında Elektrifikasyon	3
1.2.1 Demiryolu elektrifikasyon sisteminin temel bileşenleri	5
1.2.1.1 Güç kaynağı	5
1.2.1.2 Havai hatlar (OHL)	5
1.2.1.3 Kontak kabloları	6
1.2.1.4 Besleyiciler ve trafo merkezleri	6
1.2.1.5 Anahtarlama ekipmanı	6
1.2.1.6 Pantograf	6
1.2.1.7 İzolatörler	6
1.2.1.8 Topraklama sistemleri	6
1.2.2 Elektrikli demiryolu sisteminde enerji iletim yöntemleri	7
1.2.2.1 Havai hatlar (katener sistemleri)	7
1.2.2.2 Üçüncü ray sistemleri	7
1.3 Demiryolu Taşımacılığında Enerji Verimliliği Stratejileri	8
1.3.1 Regeneratif frenleme	8
1.3.2 Hafif malzemeler ve tasarım	10
1.3.3 Geliştirilmiş aerodinamik	10
1.3.4 Enerji açısından verimli tahrik sistemleri	10
1.3.5 Değişken hız kontrolü	10
1.3.6 Optimize edilmiş planlama ve güzergah belirleme	11
1.3.7 Enerji yönetim sistemleri	11
1.3.8 Yenilenebilir enerji entegrasyonu	11
2. DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİ	13
2.1 Elektrikli Demiryollarında Enerji Depolama Sistemi Teknolojileri	13
2.1.1 Lityum-iyon bataryalar	13
2.1.1.1 Lityum-iyon bataryaların kimyasal yapısı	13
2.1.1.2 Lityum-iyon bataryaların avantajları	14
2.1.1.3 Lityum-iyon bataryaların uygulamaları	14
2.1.1.4 Lityum-iyon bataryaların zorlukları ve sınırlamaları	14

2.1.1.5 Lityum-iyon bataryaların bakımı	15
2.1.2 Nikel-kadmiyum bataryalar.....	15
2.1.2.1 Nikel-kadmiyum bataryaların kimyasal yapısı	15
2.1.2.2 Nikel-kadmiyum bataryaların avantajları.....	16
2.1.2.3 Nikel-kadmiyum bataryaların uygulamaları	16
2.1.2.4 Nikel-kadmiyum bataryaların zorlukları ve sınırlamaları	16
2.1.2.5 Nikel-kadmiyum bataryaların bakımı	17
2.1.3 Kurşun-asit bataryalar	17
2.1.3.1 Kurşun-asit bataryaların kimyasal yapısı	17
2.1.3.2 Kurşun-asit bataryaların avantajları	17
2.1.3.3 Kurşun-asit bataryaların uygulamaları	18
2.1.3.4 Kurşun-asit bataryaların zorlukları ve sınırlamaları.....	18
2.1.3.5 Kurşun-asit bataryaların çevresel hususları.....	19
2.1.4 Nikel-metal hidrit bataryalar	19
2.1.4.1 Nikel-metal hidrit bataryaların kimyasal yapısı	19
2.1.4.2 Nikel-metal hidrit bataryaların avantajları	19
2.1.4.3 Nikel-metal hidrit bataryaların uygulamaları	20
2.1.4.4 Nikel-metal hidrit bataryaların zorlukları ve sınırlamaları	20
2.1.4.5 Nikel-metal hidrit bataryaların bakımı	20
2.1.5 Süper kapasitörler.....	21
2.1.5.1 Süper kapasitörlerin çalışma prensibi	21
2.1.5.2 Süper kapasitörlerin avantajları.....	21
2.1.5.3 Süper kapasitörlerin uygulamaları	22
2.1.5.4 Süper kapasitörlerin zorlukları ve sınırlamaları	23
2.1.6 Volan enerji depolama sistemleri.....	23
2.1.6.1 Volan enerji depolama sistemlerinin çalışma prensibi.....	24
2.1.6.2 Volan enerji depolama sistemlerinin avantajları.....	24
2.1.6.3 Volan enerji depolama sistemlerinin uygulamaları.....	25
2.1.6.4 Volan enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları	25
2.1.7 Hidrojen yakıt hücreleri	26
2.1.7.1 Hidrojen yakıt hücrelerinin yapısı ve çalışma prensibi	26
2.1.7.2 Hidrojen yakıt hücrelerinin avantajları	27
2.1.7.3 Hidrojen yakıt hücrelerinin uygulamaları	28
2.1.7.4 Hidrojen yakıt hücrelerinin zorlukları ve sınırlamaları.....	28
2.2 Enerji Depolama Sistemi Teknolojilerinin Karakteristik Özellikleri	29
2.2.1 Enerji yoğunluğu	29
2.2.2 Güç yoğunluğu	30
2.2.3 Döngü verimliliği	30
2.2.4 Kendiliğinden deşarj	30
2.2.5 Depolama süresi	30
2.2.6 Servis ömrü	31
2.2.7 Yatırım maliyeti	31
2.2.8 Çevresel etkiler.....	31
2.3 Enerji Depolama Sistemlerinin Demiryolu Altyapısına Entegrasyonu.....	35
2.3.1 Araç üstü enerji depolama sistemleri	35
2.3.1.1 Araç üstü enerji depolama sistemlerinin avantajları	36
2.3.1.2 Araç üstü enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları..	37
2.3.1.3 Araç üstü enerji depolama sistemlerinin dünyadaki uygulamaları	37
2.3.2 Yol boyu enerji depolama sistemleri.....	40
2.3.2.1 Yol boyu enerji depolama sistemlerinin avantajları.....	41

2.3.2.2 Yol boyu enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları..	42
2.3.2.3 Yol boyu enerji depolama sistemlerinin dünyadaki uygulamaları.....	42
2.3.3 Hibrit enerji depolama sistemleri	43
2.3.3.1 Hibrit enerji depolama sistemlerinin avantajları	44
2.3.3.2 Hibrit enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları	44
2.3.3.3 Hibrit enerji depolama sistemlerinin dünyadaki uygulamaları	45
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİ KONUSUNDA	
TARTIŞMALAR	47
3.1 Enerji Depolama Sisteminin Seçimi	47
3.2 Enerji Depolama Sisteminin Boyutlandırılması.....	47
3.3 Enerji Depolama Sisteminin Konumlandırılması	48
4. YOL BOYU BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ	
ENTEGRASYONUNUN SİMÜLASYON YOLU İLE	
İNCELENMESİ	51
4.1 Hi-SimTrain Raylı Sistem Simülasyon Programı	52
4.2 Metro Aracına Ait Verilerin Girilmesi	53
4.3 Tren Hattına Ait Verilerin Girilmesi	56
4.4 Tren İstasyonlarına Ait Verilerin Girilmesi	57
4.5 Raylı Sistem Simülasyon Sonuçları	58
5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNİN EKONOMİK VE	
ÇEVRESEL HUSUSLARI.....	67
5.1 Ekonomik Hususlar	67
5.2 Çevresel Hususlar.....	68
6. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNDE GELECEĞE DAİR	
BEKLENTİLER	71
6.1 Teknolojik Gelişmeler.....	71
6.2 Endüstri Trendleri	72
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ.....	83



KISALTMALAR

ESS	: Energy Storage System
OHL	: Over Head Lines
AC	: Alternative Current
DC	: Direct Current
NMC	: Nickel Manganese Cobalt
LTO	: Lithium Titanate Oxide
HVAC	: Heating, Ventilating and Air Conditioning
EDLC	: Electric Double Layer Capacitor
EN	: European Norm
EC	: European Committee
ISO	: International Organization for Standardization
IEC	: International Electrotechnical Commission
BESS	: Battery Energy Storage System
BDEMU	: Battery Diesel Electric Multiple Unit
BEMU	: Battery Electric Multiple Unit
EMU	: Electric Multiple Unit
HMU	: Hydrogen Multiple Unit
HEMU	: Hydrogen Electric Multiple Unit
DMU	: Diesel Multiple Unit
DEMU	: Diesel Electric Multiple Unit
EDMU	: Electro-Diesel Multiple Unit
OESS	: Onboard Energy Storage System
WESS	: Wayside Energy Storage System
HESS	: Hybrid Energy Storage System
FESS	: Flywheel Energy Storage System
Li-ion	: Lithium-ion
Ni-Cd	: Nickel-Cadmium
Ni-MH	: Nickel-Metal Hydride
HFC	: Hydrogen Fuel Cell
r.m.s.	: root mean square



SEMBOLLER

Wh	: Enerji birimi
W	: Güç birimi
kg	: Kütle birimi
L	: Hacim birimi
V	: Gerilim birimi
kV	: Kilo cinsinden gerilim birimi
kVac	: Alternatif akım türünden gerilim birimi
kVdc	: Doğru akım türünden gerilim birimi
Hz	: Frekans birimi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : EN 50163'e göre elektrikli demiryolu çekiş sistemlerinin besleme gerilim seviyeleri ve frekans değerleri.	4
Çizelge 2.1 : Demiryolundaki hidrojen yakıt hücresi sisteminin referans standartları.	27
Çizelge 2.2 : Enerji depolama sistemi teknolojilerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması.	33
Çizelge 2.3 : Demiryolu araçlarında araç üstü ESS entegrasyonunun avantajları ve dezavantajları.	37
Çizelge 2.4 : Araç üstü enerji depolama sistemine sahip bataryalı trenlerin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması.	38
Çizelge 2.5 : Enerji depolama sistemlerinin demiryolu altyapısına entegrasyonuna yönelik farklı yaklaşımların karşılaştırılması.	42
Çizelge 2.6 : Hibritleşme türüne göre sınıflandırılmış tren türleri.	45
Çizelge 4.1 : Metro aracının temel özellikleri.	53
Çizelge 4.2 : İstasyon parametreleri.	57
Çizelge 4.3 : Tam güç modunda çalışan trenin simülasyon sonuçları.	60
Çizelge 4.4 : Tam güç modunda simüle edilen trenin seyahat süreleri.	60
Çizelge 4.5 : Batarya takımının temel özellikleri.	62
Çizelge 4.6 : Tren işletme programı.	62
Çizelge 4.7 : Her bir segmentte konumlandırılan BESS'ler.	65



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Avrupa'da kullanılan elektrifikasyon sistemleri.....	4
Şekil 1.2 : Bir demiryolu katener sisteminin ana yapısal bileşenleri.....	5
Şekil 1.3 : Üçüncü ray olarak bilinen daha koyu renkli yükseltilmiş raylar 750 volt DC elektrik taşır.	7
Şekil 2.1 : Bir EDLC'nin şematik diyagramı.....	21
Şekil 2.2 : Bir FESS'in şematik diyagramı.	24
Şekil 2.3 : Demiryolu araçlarında araç üstü ESS kurulum türleri.	34
Şekil 2.4 : Raylı sistemdeki yol boyu ESS'nin çalışma şeması (a) Frenleme aşamasında enerji geri kazanımı; (b) Çekiş aşamasında enerji dağıtımı.....	40
Şekil 4.1 : Yol boyu BESS olan bir metro hattında DC gerilim şebekesi.	51
Şekil 4.2 : Hi-SimTrain arayüzüne bir örnek.	53
Şekil 4.3 : Simülasyon parametrelerinin programa girilmesi.	54
Şekil 4.4 : Metro aracının mekanik parametrelerinin programa girilmesi.....	54
Şekil 4.5 : Metro aracının hareket parametrelerinin programa girilmesi.....	55
Şekil 4.6 : Araç cer kuvveti (kN) – hız diyagramı (km/sa).	55
Şekil 4.7 : Araç dinamik fren kuvveti (kN) – hız diyagramı (km/sa).....	56
Şekil 4.8 : Tren hattının eğim (%) – konum (m) grafiği.....	56
Şekil 4.9 : Trenin hız (km/sa) – konum (m) sınırlamaları.	57
Şekil 4.10 : İstasyon parametrelerinin programa girilmesi.....	58
Şekil 4.11 : İstasyon 1 ile İstasyon 2 arası tren hattının tam güç modunda çalışması (Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).	58
Şekil 4.12 : İstasyon 2 ile İstasyon 3 arası tren hattının tam güç modunda çalışması (Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).	59
Şekil 4.13 : İstasyon 3 ile İstasyon 4 arası tren hattının tam güç modunda çalışması (Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).	59
Şekil 4.14 : İstasyon 4 ile İstasyon 5 arası tren hattının tam güç modunda çalışması (Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).	59
Şekil 4.15 : İstasyon 5 ile İstasyon 6 arası tren hattının tam güç modunda çalışması (Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).	60



DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNİN ANALİZİ

ÖZET

Bu tez, demiryolu taşımacılığında enerji verimliliğinin artırılmasına odaklanarak enerji depolama sistemi (ESS) teknolojilerinin derinlemesine bir analizini sunmaktadır. Küresel ulaşım altyapısının kritik bir bileşeni olan demiryolu taşımacılığı, enerji tüketimi, işletme maliyetleri ve çevresel etkilerle ilgili zorluklarla karşı karşıyadır. Gelişmiş enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, enerji verimliliğini artırarak ve emisyonları azaltarak bu zorluklara umut verici bir çözüm sunmaktadır.

Çalışma, geleneksel raylı sistemlerin doğasında bulunan enerji talepleri ve verimlilik konularını vurgulayarak, demiryolu taşımacılığının mevcut durumunun kapsamlı bir incelemesiyle başlamaktadır. Daha sonra bataryalar, süper kapasitörler ve volanlar dahil olmak üzere çeşitli ESS teknolojilerini araştırarak ve enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, kullanım ömrü, maliyet ve çevresel etki gibi faktörlere dayalı olarak demiryolu uygulamalarına uygunluklarını değerlendirmektedir.

ESS teknolojilerindeki önemli gelişmeler vurgulanarak enerji kullanımını optimize etmek için bunların raylı sistemlere nasıl entegre edilebileceği gösterilmektedir. Tez, demiryolu taşımacılığındaki başarılı ESS uygulamalarına ilişkin örnek olay incelemeleri sunarak, enerji tasarrufu ve operasyonel iyileştirmelere ilişkin gerçek dünyadan örnekler ortaya koymaktadır. Bu vaka çalışmaları, ESS teknolojilerini benimsemenin pratik yararları ve zorlukları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.

Ayrıca analiz, farklı ESS teknolojilerinin teknik ve ekonomik fizibiliteleri dikkate alınarak karşılaştırmalı bir değerlendirmesini de içermektedir. Bulgular, hiçbir ESS teknolojisinin evrensel olarak üstün olmadığını ancak bazı teknolojilerin belirli demiryolu uygulamaları için daha uygun olduğunu göstermektedir. Örneğin, bataryalar sık sık duraklanan kentsel raylı sistemlerde enerji depolamak için idealdir; volanlar ve süper kapasitörler ise hızlı enerji deşarjı ve yenilenmesi gerektiren yüksek hızlı demiryolu uygulamaları için daha uygundur.

Tez aynı zamanda ESS teknolojilerinde gelecekteki gelişmelerin potansiyelini ve bunların demiryolu taşımacılığına etkilerini de ele almaktadır. Kendi güçlü yönlerini geliştirmek için birden fazla teknolojiyi birleştiren hibrit enerji depolama sistemleri gibi yeni ortaya çıkan trendleri ve ESS performansını artırmayı ve maliyetleri azaltmayı vaat eden malzeme bilimindeki ilerlemeleri tartışmaktadır.

Sonuç olarak bu analiz, enerji depolama sistemlerinin demiryolu taşımacılığının verimliliğini ve sürdürülebilirliğini geliştirmedeki kritik rolünün altını çizmektedir. Demiryolu operatörleri, uygun ESS teknolojilerini dikkatli bir şekilde seçip entegre ederek önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir, işletme maliyetlerini düşürebilir ve çevrenin korunmasına katkıda bulunabilir. Bu tezde sunulan bulgular ve öneriler,

ulaşım teknolojisinin bu hayati alanında gelecekteki araştırma ve geliştirmeler için bir yol haritası sunmaktadır.



ANALYSIS OF ENERGY STORAGE SYSTEM TECHNOLOGIES FOR ENERGY EFFICIENCY IN RAIL TRANSPORTATION

SUMMARY

Rail transportation is an essential component of modern infrastructure, facilitating the movement of goods and passengers efficiently. However, despite its advantages over road and air transport in terms of lower emissions and energy consumption per unit of transport, the rail sector still faces significant challenges related to energy efficiency, operational costs, and environmental impact. Addressing these issues has become increasingly critical in the context of rising energy prices, stricter environmental regulations, and the global push toward sustainability. One promising approach to improving the efficiency of rail transportation is the integration of advanced energy storage systems (ESS). These technologies have the potential to optimize energy use, reduce reliance on external power sources, and minimize carbon emissions. This thesis provides an in-depth analysis of various ESS technologies, their integration into rail systems, and the resulting benefits in terms of energy efficiency and sustainability.

Rail systems, particularly electrified railways, rely on substantial amounts of energy to operate. A significant portion of this energy is lost due to inefficiencies in braking, acceleration, and idle periods. Traditional rail systems primarily rely on direct power supply through overhead lines or third rails, leading to fluctuations in energy demand and wastage. Furthermore, diesel-powered locomotives continue to contribute to greenhouse gas emissions and air pollution. Improving energy efficiency in rail transportation requires innovative solutions that address these issues. Energy storage technologies offer a way to capture and reuse energy that would otherwise be wasted, particularly through regenerative braking. This technique enables trains to recover kinetic energy during deceleration and store it for later use, reducing overall power consumption.

Several ESS technologies have been developed and optimized for rail applications. This thesis explores three primary types: batteries, supercapacitors, and flywheels. Batteries, including lithium-ion and other chemistries, provide high energy density and relatively long storage durations, making them well-suited for urban rail systems with frequent stops where energy can be stored and reused for acceleration. Supercapacitors are known for their high power density and rapid charge-discharge cycles, making them effective in capturing regenerative braking energy in systems with short dwell times. Their longevity and efficiency make them particularly useful in metro and light rail applications. Flywheels store kinetic energy by spinning a rotor at high speeds and can deliver instantaneous power, making them ideal for high-speed rail and heavy freight applications where quick energy discharge is required. Each of these technologies has specific advantages and trade-offs concerning cost, efficiency, lifespan, and environmental impact. A comparative assessment of these factors is critical in determining the most suitable ESS for different rail applications.

The effectiveness of ESS technologies has been demonstrated in various real-world rail projects. Several metro systems worldwide, including those in London, Tokyo, and Berlin, have successfully integrated energy storage solutions to improve efficiency and reduce operational costs. For example, the London Underground has implemented a regenerative braking system that stores excess energy and redistributes it across the network, leading to substantial energy savings. Similarly, the Tokyo Metro has employed supercapacitors to enhance braking energy recovery, improving overall efficiency while reducing wear and tear on braking systems. These case studies illustrate the tangible benefits of ESS technologies, including lower electricity consumption, reduced peak power demand, and extended infrastructure lifespan. However, challenges remain in terms of high initial investment costs, system integration complexities, and ongoing maintenance requirements.

A critical component of this research is a comparative assessment of different ESS technologies based on key parameters such as energy and power density, lifespan and durability, cost-effectiveness, and environmental impact. Findings suggest that while no single ESS technology is universally superior, their suitability varies depending on application type. Batteries are ideal for urban rail networks due to their ability to store energy for extended periods and discharge it efficiently during acceleration. Supercapacitors excel in systems requiring frequent energy capture and rapid discharge, such as metro networks. Flywheels are better suited for high-speed rail and heavy freight operations where sudden bursts of power are needed. Hybrid energy storage systems, which combine two or more ESS technologies, are emerging as a promising solution to maximize performance by leveraging the strengths of different technologies.

As energy storage technologies continue to evolve, several emerging trends are expected to shape the future of rail transportation. Hybrid energy storage systems (HESS) are gaining attention for their ability to optimize energy use by combining batteries, supercapacitors, and flywheels. Advancements in battery materials, such as solid-state batteries and other innovative chemistries, promise improved energy density, lifespan, and safety. Smart energy management systems incorporating artificial intelligence and IoT are being developed for real-time energy optimization and predictive maintenance. Additionally, grid integration and synergy with renewable energy sources, such as solar and wind, offer new possibilities for improving the sustainability of rail transportation.

Despite the promising benefits of energy storage systems, their widespread adoption in rail transportation requires strategic planning, financial investment, and policy support. Governments and industry stakeholders must work together to establish regulatory frameworks, provide incentives for technology adoption, and encourage research and development in ESS innovations. Public-private partnerships can play a crucial role in overcoming the financial barriers associated with large-scale ESS implementation, ensuring that these technologies become a standard component of modern rail infrastructure.

This thesis underscores the crucial role of ESS technologies in advancing energy efficiency and sustainability in rail transportation. Through a thorough analysis of various storage systems, comparative assessments, and real-world case studies, it has been demonstrated that the integration of ESS can lead to significant energy savings, reduced operational costs, and environmental benefits. While challenges such as cost and system integration remain, the continuous advancement of ESS technologies and

their hybrid applications provide promising opportunities for future enhancements. Rail operators, policymakers, and researchers must work together to develop and implement strategies that maximize the benefits of ESS in transportation systems, paving the way for a more sustainable and efficient rail industry.



1. GİRİŞ

Demiryolu taşımacılığı, küresel ekonomide kritik bir rol oynayarak malların ve yolcuların verimli ve sürdürülebilir bir şekilde taşınmasını sağlar. Demiryolu taşımacılığı, yüksek kapasite, güvenilirlik ve diğer taşıma modlarına göre azaltılmış karbon emisyonları gibi birçok avantaj sunarak küresel taşımacılık ağlarının önemli bir bileşenidir. Ancak, demiryolu sistemleri hala enerji tüketimi ve verimlilikle ilgili zorluklarla karşı karşıyadır. Demiryolu ağlarının elektrifikasyonu, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma yolunda önemli bir adım olmuştur, ancak enerji kullanımını optimize etmek hala bir önceliktir. Enerji tüketimi, çevresel etki ve sürdürülebilir taşıma çözümlerine yönelik artan endişelerle birlikte, demiryolu sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik artan bir ilgi bulunmaktadır. Enerji depolama sistemleri (ESS), enerji kullanımını optimize ederek, güç kalitesini iyileştirerek ve demiryolu işletmelerinde daha büyük esneklik sağlayarak bu zorlukları ele almak için umut verici bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu tez çalışması, demiryolu taşımacılığı bağlamında enerji depolama sistemleri teknolojilerinin enerji verimliliği yönünden kapsamlı bir analizini sunar. En son gelişmeleri, ortaya çıkan trendleri ve gerçek dünya uygulamalarını inceleyerek, bu çalışma, ESS'nin demiryolu ağlarına entegrasyonunun potansiyel faydaları ve zorlukları hakkında değerli içgörüler sunmayı amaçlamaktadır. Araç üstü (OESS) bataryalar, süperkapasitörler, volanlar ve yol boyu enerji depolama sistemleri (WESS) dahil olmak üzere çeşitli ESS türlerinin sistemli bir analizi aracılığıyla, bu inceleme, mevcut çözüm yelpazesini ve bunların ilgili avantajlarını ve sınırlamalarını açıklamayı amaçlamaktadır. ESS'nin demiryolu taşımacılığına entegrasyonu, iyileştirilmiş enerji verimliliği, azaltılmış sera gazı emisyonları, arttırılmış işletme güvenilirliği ve ağdaki bozulmalara karşı artan dayanıklılık da dahil olmak üzere birçok potansiyel fayda sunmaktadır. Ancak, demiryolu ağlarında ESS'nin geniş çapta benimsenmesi zorluklarla doludur. Sistem uyumluluğu, enerji yoğunluğu ve ömür maliyetleri gibi teknik hususların yanı sıra düzenleyici, finansal ve kurumsal engeller dikkatlice değerlendirilmelidir. Ana hususlar sistem tasarımı, boyutlandırma, mevcut altyapıyla entegrasyon ve maliyet

etkinliğini içerir. Bu çalışmada sunulan analiz, literatür taraması, örnek olay incelemeleri ve simülasyon sonuçlarının bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Demiryolu ulaşımındaki ESS'lerle ilgili mevcut literatür gözden geçirilmiş ve ilgili teknolojiler ve metodolojiler belirlenmiştir. Ayrıca, demiryolu ağlarında ESS'nin kullanıldığı gerçek dünya uygulamalarında karşılaşılan zorlukların anlaşılması için örnek olay incelemeleri yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, farklı demiryolu taşımacılığı senaryolarında ESS'nin performansının ve potansiyel faydalarının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca, bu çalışma, demiryolu taşımacılığı için ESS entegrasyonunun daha geniş etkilerini, altyapı geliştirme, enerji yönetimi stratejileri ve sürdürülebilirlik hedefleri üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Mevcut araştırmaları sentezleyerek ve bilgi boşluklarını belirleyerek, bu çalışma, sürdürülebilir taşıma çözümleri üzerine devam eden tartışmalara katkıda bulunmayı ve demiryolu taşımacılığı ve enerji depolama sistemleri alanında çalışan politika yapımcılarına, endüstri paydaşlarına ve araştırmacılara bilgi vermeyi amaçlamaktadır.

1.1 Demiryolu Taşımacılığına Genel Bakış

Demiryolu taşımacılığı, hem yük hem de yolcu hizmetlerini içeren, küresel taşımacılık ağlarının önemli bir bileşeni olmaya devam etmektedir. Diğer taşıma yöntemlerine göre yüksek kapasite, enerji verimliliği ve azaltılmış sera gazı emisyonları gibi birkaç avantaj sunmaktadır. Demiryolu ağları, kentsel metro sistemlerinden yüksek hızlı şehirlerarası trenlere ve geniş mesafeleri kapsayan yük treni hatlarına kadar çeşitli ölçek ve teknolojide değişmektedir. Demiryolu taşımacılığı, özellikle elektrik veya dizel yakıt şeklinde, enerji tüketimi açısından önemli bir tüketici konumundadır. Demiryolu işletmelerinde enerji tüketimi, tren hızı, yük, tren işletme sıklığı ve altyapı özellikleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Özellikle yüksek hızlı trenler ve ağır yük trenleri, işletmelerini sürdürmek için önemli miktarda enerji girdisi gerektirir. Demiryolu sistemlerini elektrik şebekesiyle entegre etmek, enerji arzı, dağıtımı ve talep yönetimi ile ilgili zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Demiryolu işletmecileri, çeşik amaçları için güvenilir enerji sağlamak amacıyla elektrik sağlayıcılarıyla koordinasyon içinde olması gerekmektedir. Ayrıca, demiryolu ağlarının artan elektrifikasyonu, büyüyen enerji talebini karşılamak için şebeke altyapısına ve akıllı şebeke teknolojilerine yatırım yapmayı gerektirir. Kamu talebi tarafından yönlendirilen sürdürülebilirlik, çevresel düzenlemeler, iklim değişikliği ile mücadele

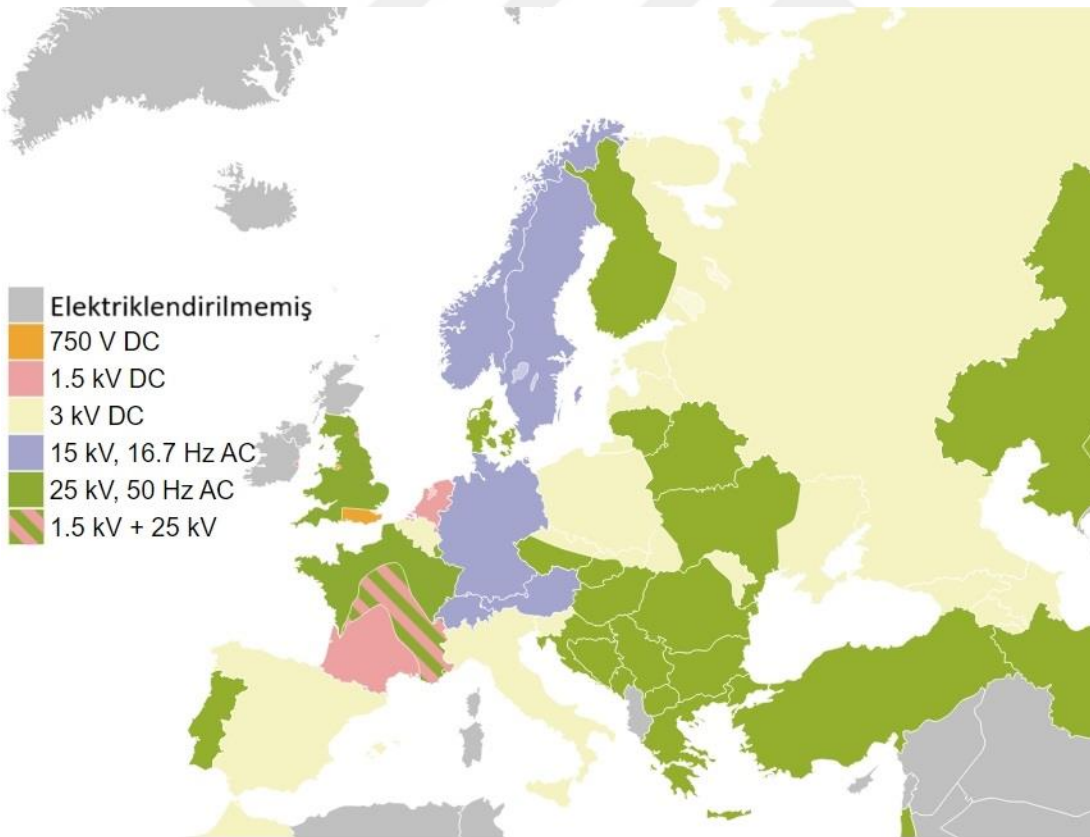
abaları ve daha temiz taşıma seçenekleri demiryolu endüstrisi için önemli bir endişedir. Demiryolu taşımacılığı, enerji verimliliği ve emisyonlar açısından karayolu veya hava taşımacılığına göre doğal olarak daha sürdürülebilir olmasına rağmen, hala iyileştirme fırsatları bulunmaktadır. Temel sürdürülebilirlik zorlukları arasında karbon emisyonlarını azaltma, çevresel etkiyi en aza indirme (örneğin, gürültü kirliliği, habitat parçalanması) ve demiryolu ömrü boyunca kaynak verimliliğini artırma bulunmaktadır. Demiryolu altyapısının sürdürülmesi ve genişletilmesi, raylar, sinyalizasyon sistemleri, istasyonlar ve araçlar için önemli yatırımları gerektirir. Zamanla eskiyen altyapı, kapasite kısıtlamaları ve finansman açıkları, büyüyen talebi karşılamak için demiryolu ağlarını modernize etmeyi ve genişletmeyi amaçlayan demiryolu işletmecileri ve hükümetler için zorluklar oluşturur. Teknolojik inovasyon, demiryolu taşımacılığında değişikliklere yol açmaktadır; elektrifikasyon, otomasyon, dijitalleşme ve enerji depolama sistemleri gibi alanlarda ilerlemeler sağlanmaktadır. Bu inovasyonlar, verimliliği, güvenliği ve sürdürülebilirliği artırma fırsatları sunarken, aynı zamanda uyumluluk, siber güvenlik ve işgücü adaptasyonu ile ilgili zorluklar da ortaya çıkarır. Bu zorlukları ele almak, daha sürdürülebilir ve dirençli bir demiryolu taşımacılığı sistemi teşvik eden yenilikçi çözümler, politikalar ve yatırım stratejileri geliştirmek için demiryolu işletmecileri, hükümet kurumları, endüstri paydaşları ve araştırma kurumları arasında işbirliği gerektirir.

1.2 Demiryolu Taşımacılığında Elektrifikasyon

İklim değişikliği ve çevresel sürdürülebilirlik, son yıllarda önemli ölçüde küresel dikkat çekmiştir. Temiz enerjinin yaygın kullanımının önemi giderek daha belirgin hale gelmektedir. En büyük enerji tüketicilerinden biri olarak, ulaşım, özellikle yenilenebilir enerjilerin elektrik sistemlerine önemli ölçüde entegrasyonu ile elektrifikasyon yönünde hareket etmektedir. Elektrikli demiryolu sistemleri, sadece karbondioksit emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda araç performansını da artırır. Demiryolu taşımacılığında elektrifikasyon sistemi olarak başlangıçta 600 VDC gerilim seviyesi kullanılmıştır. Ancak belirli bir süre sonra enerji kayıplarını ve maliyetleri azaltmak amacıyla farklı elektrifikasyon sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elektrikli demiryolu çekiş sistemlerinde kullanılan besleme gerilim seviyeleri ve frekans değerlerinin sınırları Avrupa Standartlarında [1] Çizelge 1.1'de ve Şekil 1.1'de olduğu gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 1.1 : EN 50163'e göre elektrikli demiryolu çekiş sistemlerinin besleme gerilim seviyeleri ve frekans değerleri [1].

Elektrifikasyon sistemi	En düşük süreksiz gerilim U_{min2} V	En düşük sürekli gerilim U_{min1} V	Nominal gerilim U_n V	En yüksek sürekli gerilim U_{max1} V	En yüksek süreksiz gerilim U_{max2} V
DC (ortalama değerler)	400 500 1000 2000	400 500 1000 2000	600 750 1500 3000	720 900 1800 3600	800 1000 1950 3900
AC 16,7 Hz (r.m.s değerler)	11000	12000	15000	17250	18000
AC 50 Hz (r.m.s değerler)	17500	19000	25000	27500	29000

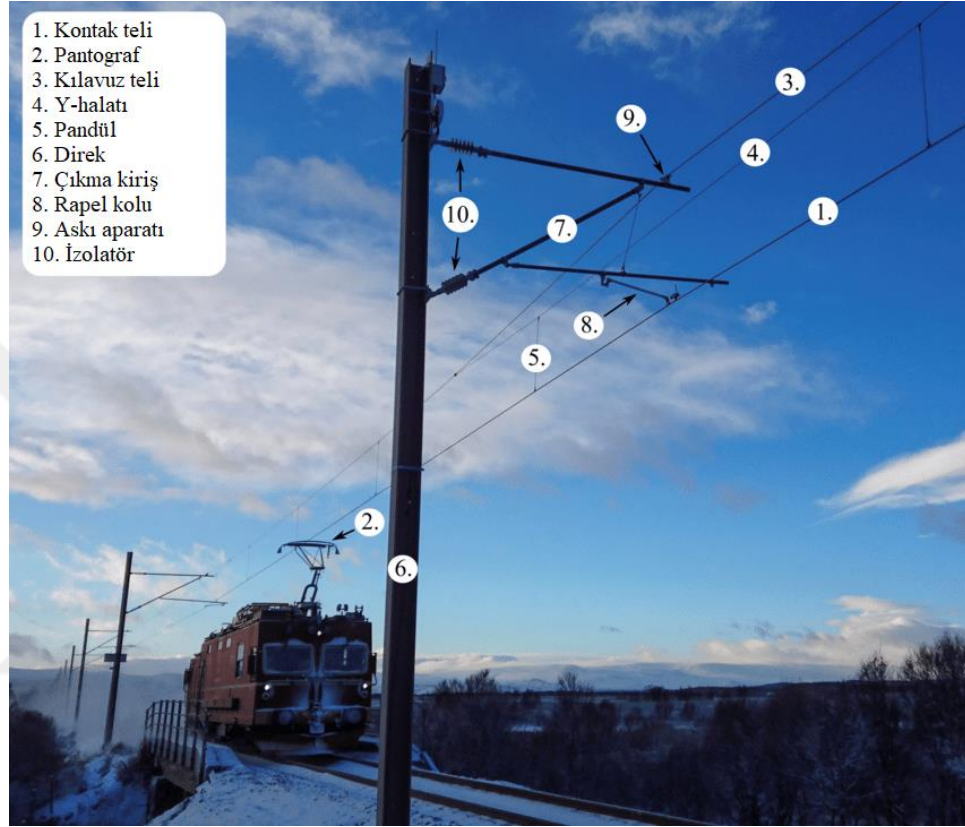


Şekil 1.1 : Avrupa'da kullanılan elektrifikasyon sistemleri [1].

Fransa, İspanya, İtalya, Birleşik Krallık, Hollanda, Belçika ve Türkiye'deki yüksek hızlı hatlar, eski Sovyetler Birliği'ndeki yüksek enerji hatları gibi 25 kV altında çalışmaktadır [1].

1.2.1 Demiryolu elektrifikasyon sisteminin temel bileşenleri

Demiryolu elektrifikasyon sistemleri, trenlere güç sağlamak için çeşitli temel bileşenlerden oluşur. Spesifik bileşenler, kullanılan elektrifikasyon sisteminin türüne bağlı olarak değişebilir, ancak demiryolu elektrifikasyon sisteminin temel bileşenleri aşağıda Şekil 1.2’de verildiği gibi tipik olarak şunları içerir:



Şekil 1.2 : Bir demiryolu katener sisteminin ana yapısal bileşenleri [2].

1.2.1.1 Güç kaynağı

Bu, enerji santralleri veya trafo merkezleri gibi enerji üretim kaynaklarını içerir. Güç kaynağı trenlere güç sağlamak için gereken elektriği üretir.

1.2.1.2 Havai hatlar (OHL)

Rayların üzerinde asılı duran ve genellikle direkler veya köprüler tarafından desteklenen tellerden oluşur. Bu teller elektrik akımını trenlere taşır. OHL, havai katener sistemleri veya basit kablolar gibi çeşitli konfigürasyonlarda gelebilir.

1.2.1.3 Kontak kabloları

Trenlere elektriğin iletilmesini sağlayan kablolardır. Genellikle bakır veya alüminyumdan yapılırlar ve trenin çatısına monte edilen ve havai hatlardan elektrik toplayan bir cihaz olan pantograf ile doğrudan temas halindedirler.

1.2.1.4 Besleyiciler ve trafo merkezleri

Besleyiciler, trafo merkezlerinden havai hatlara elektrik taşıyan kablolardır. Trafo merkezleri, demiryolu güzergahı üzerinde yer alan, yüksek gerilimli elektriği elektrik şebekesinden alan, bunu havai hatlar için uygun gerilime indiren ve dağıtan tesislerdir.

1.2.1.5 Anahtarlama ekipmanı

Anahtarlama ekipmanı, elektrik akışını kontrol eden, arızalı bölümleri izole eden ve elektrifikasyon sisteminde güvenliği sağlayan anahtarları, devre kesicileri ve diğer cihazları içerir.

1.2.1.6 Pantograf

Elektrikli trenlerin çatısına monte edilen ve havai hatlarla temas ederek elektriği toplayan mekanizmalardır. Pantograflar genellikle metalden yapılırlar ve yüksek hızlarda bile havai kablolarla tutarlı teması koruyacak şekilde tasarlanmıştır.

1.2.1.7 İzolatörler

İzolatörler havai kabloları desteklemek ve elektriğin toprağa sızmasını önlemek için kullanılır. Tipik olarak porselen veya polimer gibi malzemelerden yapılırlar ve havai hat sistemi boyunca aralıklarla monte edilirler.

1.2.1.8 Topraklama sistemleri

Topraklama sistemleri, fazla elektriğin güvenli bir şekilde zemine deşarj edilmesini sağlayarak hem ekipmanı hem de personeli elektrik çarpmalarından ve diğer tehlikelerden korur.

Bu bileşenler, elektrikli demiryolu sistemlerindeki trenlere güvenilir ve verimli bir güç kaynağı sağlamak için birlikte çalışarak, geleneksel dizel motorlu trenlere kıyasla azaltılmış çevresel etki, daha düşük işletme maliyetleri ve gelişmiş performans gibi avantajlar sunar.

1.2.2 Elektrikli demiryolu sisteminde enerji iletim yöntemleri

Trenler ve tramvaylar gibi elektrikli raylı ulaşım sistemleri, enerjiyi iletmek için öncelikle iki yöntem kullanır:

1.2.2.1 Havai hatlar (katener sistemleri)

Araçlara gücün katener telleri veya havai hatlar olarak da bilinen havai kablolar aracılığıyla sağlandığı en yaygın yöntemdir. Bu kablolar, ana hat trenleri için genellikle 15.000 volt AC (alternatif akım) aralığında yüksek voltajlı elektrik taşır. Araçların çatılarına monte edilmiş pantograflar, güç çekmek için havai kablolarla temas eder. Elektrik daha sonra treni hareket ettirmek için cer motorları da dahil olmak üzere trenin yerleşik sistemlerine aktarılır.

1.2.2.2 Üçüncü ray sistemleri

Bu yöntemde, aşağıda Şekil 1.3'te verildiği gibi rayların yanına veya arasına, genellikle zemine veya raylara kıyasla daha düşük bir seviyeye bir güç rayı kurulur. Güç rayı elektrik akımını taşır ve araçlarda güç çekmek için güç rayı ile temas eden kontak pabuçları veya toplayıcı pabuçları bulunur. Üçüncü raylı sistemler, metro sistemlerinde ve bazı banliyö raylı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle havai hatlardan daha düşük voltajlarda, çoğunlukla 600 ile 750 volt DC (doğru akım) aralığında çalışırlar.



Şekil 1.3 : Üçüncü ray olarak bilinen daha koyu renkli yükseltilmiş raylar 750 volt DC elektrik taşır [2].

Her iki yöntemin de avantajları ve dezavantajları vardır. Havai hatlar, daha yüksek güç kapasiteleri ve uzun mesafelerdeki verimlilikleri nedeniyle ana hat demiryollarında daha yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, yol boyunca görsel olarak müdahaleci olabilecek ve kentsel ortamlarda zorluklar yaratabilecek destek yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Üçüncü raylı sistemler, daha düşük profilli ve daha basit altyapıları nedeniyle kentsel toplu taşıma sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir ancak elektrik kapasitesi ve güvenlik kaygıları başta olmak üzere elektrik çarpması riski açısından sınırlamaları bulunmaktadır.

1.3 Demiryolu Taşımacılığında Enerji Verimliliği Stratejileri

Demiryolu taşımacılığında enerji verimliliği stratejileri, raylı sistemin performansını ve güvenilirliğini korurken veya geliştirirken enerji tüketimini azaltmayı amaçlamaktadır. Demiryolu taşımacılığında enerji verimliliğini artırmak için kullanılan birkaç temel strateji şunlardır:

1.3.1 Rejeneratif frenleme

Rejeneratif frenleme sistemleri, frenleme sırasında üretilen kinetik enerjiyi yakalar ve elektrik enerjisine dönüştürür; bu enerji, güç kaynağı sistemine geri beslenebilir veya gelecekte kullanılmak üzere depolanabilir. Bu, normalde ısı olarak dağıtılacak enerjiyi yeniden kullanarak enerji tüketimini ve israfı azaltmaya yardımcı olur.

Rejeneratif frenleme sistemleri tipik olarak iki ana modda çalışır. Frenleme veya yavaşlama sırasında elektrikli çekiş motorları jeneratör görevi görerek kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu enerji ya yerleşik dirençler aracılığıyla ısı olarak dağıtılır (dinamik frenleme) ya da havai hatlara ve yerleşik enerji depolama sistemlerine (rejeneratif frenleme) geri beslenir. Hızlanma veya itiş sırasında elektrikli cer motorları, aracı ileri doğru itmek için havai hatlardan veya yerleşik enerji depolama sistemlerinden elektrik gücü çeker. Rejeneratif frenleme sistemleri, normalde frenleme sırasında kaybolacak olan kinetik enerjiyi geri kazanıp yeniden kullanarak raylı ulaşım sistemlerinin genel enerji verimliliğini artırır. Rejeneratif frenleme sistemleri, enerji tüketimini azaltarak ve sürtünmeye dayalı fren sistemlerindeki aşınmayı en aza indirerek bakım ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olur. Rejeneratif frenleme sistemlerinin kullanımı, enerjinin verimli kullanımını teşvik ederek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak karbon emisyonlarını ve çevresel etkiyi azaltır.

Rejeneratif frenleme sistemleri çeşitli demiryolu taşımacılığı türlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tramvay ve hafif raylı sistemlerde de enerji geri kazanımı sağlayan ve güç tüketimini azaltan rejeneratif frenleme sistemleri yaygındır. Yüksek hızlı demiryolu sistemleri, özellikle yüksek hızlarda sık frenleme olayları sırasında enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkiyi azaltmak için rejeneratif frenlemeyi kullanır. Güç elektroniği, cer motorları ile yerleşik enerji depolama sistemleri veya havai hatlar arasındaki elektrik enerjisi akışını kontrol etmek için gereklidir. Rejeneratif frenleme sırasında üretilen elektrik enerjisinin voltajını, akımını ve frekansını düzenlerler. Bataryalar veya süper kapasitörler gibi enerji depolama sistemleri, rejeneratif frenleme sırasında üretilen elektrik enerjisini daha sonra kullanmak üzere depolar. Bu sistemler verimli enerji yönetimi sağlar ve yardımcı sistemlere güç sağlamak veya hızlanma sırasında tahrik için bir tampon sağlar. Gelişmiş bir kontrol sistemi, enerji geri kazanımını, çekiş performansını ve genel sistem verimliliğini optimize etmek için çekiş motorlarının, güç elektroniğinin ve enerji depolama sistemlerinin eylemlerini koordine ederek rejeneratif fren sistemlerinin çalışmasını yönetir.

Rejeneratif frenleme sistemleri çok sayıda fayda sunarken aynı zamanda bazı zorlukları da beraberinde getirir. Rejeneratif frenleme sistemleri karmaşıktır ve optimum performans için karmaşık kontrol algoritmaları ve çeşitli bileşenler arasında koordinasyon gerektirir. Yerleşik enerji depolama sistemlerinin kapasitesi ve verimliliği, frenleme sırasında geri kazanılabilen ve yeniden kullanılabilen enerji miktarını sınırlayabilir. Mevcut demiryolu araçlarının rejeneratif fren sistemleriyle güçlendirilmesi veya bunların yeni araç tasarımlarına entegre edilmesi, lojistik ve uyumluluk açısından zorluklar doğurabilir. Devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, rejeneratif fren sistemlerinin verimliliğini, güvenilirliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmaya odaklanmaktadır. Bu, enerji geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak ve sistem karmaşıklığını en aza indirmek için enerji depolama teknolojileri, güç elektroniği ve kontrol algoritmalarındaki gelişmeleri içerir. Rejeneratif frenleme sistemlerindeki ilerlemeler, enerji yakalama verimliliğini artırmayı, enerji depolama kapasitesini maksimuma çıkarmayı ve araç üstü ve yol boyu enerji depolama sistemleriyle entegrasyonu hedeflemektedir. Araştırma çabaları, frenleme performansını ve enerji geri kazanımını optimize etmek için yenilikçi frenleme algoritmalarını, tahmine dayalı analitikleri ve makine öğrenimi tekniklerini içermektedir. Rejeneratif frenleme sistemlerinde ortaya çıkan trendler arasında,

frenleme olayları sırasında kinetik enerjiyi yakalamak ve depolamak için dinamik frenleme dirençlerinin, süper kapasitörlerin ve volanların kullanımı yer almaktadır. Ayrıca güç elektroniği ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler, rejeneratif frenleme uygulamalarında verimli enerji dönüşümü ve yönetimine olanak sağlamaktadır. Rejeneratif frenleme sistemlerindeki yenilikçi yaklaşımlar, enerji kayıplarını en aza indirmek ve enerji geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için enerji depolama cihazlarının doğrudan fren sistemlerine entegrasyonunu içerir. Rejeneratif ve sürtünmeli frenleme mekanizmalarını birleştiren hibrit fren sistemleri, çeşitli çalışma koşullarında gelişmiş frenleme performansı ve enerji verimliliği sunmaktadır.

1.3.2 Hafif malzemeler ve tasarım

Trenlerin alüminyum alaşımları veya kompozit malzemeler gibi hafif malzemelerle tasarlanması, trenin toplam kütlesini azaltarak enerji tüketimini azaltır. Daha hafif trenler hızlanmak ve yavaşlamak için daha az enerjiye ihtiyaç duyar ve bu da enerji verimliliğinin artmasını sağlar.

1.3.3 Geliştirilmiş aerodinamik

Trenlerin şeklini düzene koymak ve aerodinamik sürtünmeyi en aza indirmek, yüksek hızlarda hava direncinin üstesinden gelmek için gereken enerjiyi azaltır. Pürüzsüz hatlar, konik uçlar ve aerodinamik burun konileri gibi aerodinamik tasarım özellikleri, özellikle yüksek hızlı trenler için sürtünmeyi en aza indirmeye ve enerji verimliliğini artırmaya yardımcı olur.

1.3.4 Enerji açısından verimli tahrik sistemleri

Elektrikli çekiş motorları gibi enerji açısından verimli tahrik sistemlerinin kullanılması, güç dağıtımının daha hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır ve geleneksel dizel motorlara kıyasla enerji kayıplarını azaltır. Elektrikli tahrik sistemleri ayrıca rejeneratif frenleme ve enerji geri kazanım sistemlerinden de yararlanabilir.

1.3.5 Değişken hız kontrolü

Tren yükü, hat eğimi ve trafik yoğunluğu gibi çalışma koşullarına göre hızlanma ve yavaşlama profillerini optimize eden akıllı hız kontrol sistemlerinin uygulanması, programa bağlılığı ve yolcu konforunu korurken enerji tüketimini en aza indirebilir.

1.3.6 Optimize edilmiş planlama ve güzergah belirleme

Boş çalışmayı (yolcu veya yük olmadan) en aza indirmek ve sıkışıklığı azaltmak için tren programlarını ve rotalarını optimize etmek, trenlerin optimum kapasitede çalışmasını ve en verimli rotalarda seyahat etmesini sağlayarak enerji verimliliğini artırabilir.

1.3.7 Enerji yönetim sistemleri

Enerji kullanımını gerçek zamanlı olarak izleyen ve optimize eden yerleşik enerji yönetim sistemlerinin kurulması, enerji tasarrufu fırsatlarının belirlenmesine, güç dağıtımının yönetilmesine ve aydınlatma, ısıtma ve havalandırma gibi yardımcı sistemlerin çalışmasının optimize edilmesine yardımcı olabilir.

1.3.8 Yenilenebilir enerji entegrasyonu

Güneş enerjisi veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının demiryolu altyapısına entegre edilmesi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir ve demiryolu operasyonlarından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltabilir.

Bu enerji verimliliği stratejileri uygulanarak raylı ulaşım sistemleri işletme maliyetleri azaltılabilir, çevresel etki en aza indirilebilir ve genel sürdürülebilirliği artırılabilir.



2. DEMİRYOLU TAŞIMACILIĞINDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİ

2.1 Elektrikli Demiryollarında Enerji Depolama Sistemi Teknolojileri

Elektrikli demiryolları, özellikle güç kaynağı dalgalanmalarının veya kesintilerinin meydana geldiği senaryolarda güvenilir çalışmayı sağlamak için verimli enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyar. Elektrikli demiryollarında her birinin kendine özgü avantajları ve uygulamaları olan çeşitli enerji depolama teknolojileri kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemleri (ESS), elektrikli demiryollarında sorunsuz operasyonların sağlanmasına, enerji kullanımının optimize edilmesine ve acil durumlarda yedek güç sağlanmasına yardımcı olur. Enerji depolama sistemleri (ESS), yedek güç olarak kullanılmasının yanında rejeneratif frenleme enerjisi depolama ve en yüksek düzeyde güç gereksinimini azaltma yetenekleri sağlayarak elektrikli demiryollarında çok önemli bir rol oynamaktadır. Elektrikli demiryollarında yaygın olarak kullanılan enerji depolama sistemlerinden bazılarını ayrıntılı bir genel bakış yapıldığında karşılaşılan teknolojiler şunları içerir:

2.1.1 Lityum-iyon bataryalar

Elektrikli trenler genellikle birincil enerji depolama sistemi olarak yerleşik batarya paketlerini kullanır. Bu bataryalar, frenleme sırasında veya trenin havai kablolardan (katener) güç çekmediği durumlarda fazla enerjiyi depolar. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, hızlı şarj yetenekleri ve nispeten düşük bakım gereksinimleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrikli çekiş sistemlerine olan katkısı, rejeneratif frenleme gibi sık şarj ve deşarj döngüleri gerektiren uygulamalarda ve yardımcı güç dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için lokomotiflere, birden fazla elektrikli çoklu üniteye veya tramvaylara entegre edilebilirler. Elektrikli demiryolları bağlamında Lityum-iyon bataryalar hakkında ayrıntılı bilgiler şunları içerir:

2.1.1.1 Lityum-iyon bataryaların kimyasal yapısı

Lityum iyon bataryalar genellikle katot malzemesi olarak lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum demir fosfat (LiFePO_4), lityum mangan oksit (LiMn_2O_4) veya

lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) kullanır. Anot genellikle grafitir ve elektrolit, organik çözücülerin bir karışımı içinde çözünmüş bir lityum tuzudur.

2.1.1.2 Lityum-iyon bataryaların avantajları

- Li-iyon bataryalar, diğer şarj edilebilir batarya kimyalarına kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunarak birim ağırlık veya hacim başına daha fazla enerji depolama sağlar.
- Li-iyon bataryalar nispeten hafiftir; bu da onları, ağırlığın en aza indirilmesinin verimliliği ve performansı artırabileceği elektrikli demiryolları gibi ağırlığın önemli olduğu uygulamalar için uygun kılar.
- Uygun koruma ve bakım ile Li-iyon bataryalar, yüzlerce ila binlerce şarj-deşarj döngüsüne dayanabilir ve uzun bir çalışma ömrü sunar.
- Bazı Li-iyon batarya kimyaları hızlı şarja olanak tanır, aksama süresini azaltır ve elektrikli demiryolu uygulamalarında operasyonel verimliliği artırır.

2.1.1.3 Lityum-iyon bataryaların uygulamaları

- Li-iyon bataryalar, elektrikli demiryollarında, cer motorlarına güç sağlamak, acil durum sistemleri için yedek güç sağlamak ve aydınlatma, HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) ve iletişim ekipmanı gibi yerleşik yardımcı sistemlere enerji sağlamak dahil olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır.
- Elektrikli trenlerde, Li-iyon bataryalar, frenleme sırasında enerjiyi depolamak (rejeneratif frenleme) ve hızlanma sırasında serbest bırakmak için havai katener sistemleri veya üçüncü raylı sistemlerle birlikte kullanılabilir, bu da enerji tüketimini azaltır ve genel verimliliği artırır.
- Li-iyon bataryalar aynı zamanda hibrit ve bataryalı elektrikli lokomotiflerin ayrılmaz bileşenleridir; burada birincil enerji depolama sistemi olarak hizmet ederler ve elektrikli cer motorlarıyla birlikte tahrik gücü sağlarlar.

2.1.1.4 Lityum-iyon bataryaların zorlukları ve sınırlamaları

- Li-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu sunarken, özellikle hasar görmesi veya uygun olmayan şarj veyadeşarj koşullarına maruz kalması durumunda

aşırı ısınma, yangın ve patlama gibi termal kaçaklara ve potansiyel güvenlik tehlikelerine karşı hassastır. Bu riskleri azaltmak için sağlam güvenlik yönetimi sistemleri ve protokolleri çok önemlidir.

- Li-iyon bataryalar, diğer bazı batarya teknolojileriyle karşılaştırıldığında daha pahalı olabilir, ancak üretim süreçlerindeki ilerlemeler ve ölçek ekonomileri nedeniyle fiyatlar istikrarlı bir şekilde düşmektedir.
- Lityum ve Li-iyon bataryalarda kullanılan diğer malzemelerin çıkarılması ve işlenmesi, yaşam alanlarının bozulması, su kirliliği ve karbon emisyonları gibi çevresel sonuçlara yol açabilir. Ancak lityum madenciliği ve batarya geri dönüşüm süreçlerinin sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik çalışmalar sürmektedir.

2.1.1.5 Lityum-iyon bataryaların bakımı

Li-iyon bataryalar, kurşun-asit veya nikel-kadmiyum gibi diğer bazı batarya kimyalarına kıyasla genellikle çok az bakım gerektirir. Ancak güvenli ve güvenilir çalışmayı sağlamak için batarya sağlığının, sıcaklığının ve şarj durumunun düzenli olarak izlenmesi gerekir.

2.1.2 Nikel-kadmiyum bataryalar

Nikel-kadmiyum bataryalar (NiCd) çevresel kaygılar ve lityum iyon bataryalara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğu nedeniyle daha az yaygın olmasına rağmen, NiCd bataryalar, özellikle sağlamlık, aşırı koşullara dayanabilme yeteneği ve güvenilirliğin enerji yoğunluğundan daha öncelikli olduğu bazı demiryolu uygulamalarında hala kullanılmaktadır. Elektrikli demiryolları bağlamında NiCd bataryalar hakkında ayrıntılı bilgiler şunları içerir:

2.1.2.1 Nikel-kadmiyum bataryaların kimyasal yapısı

NiCd bataryalar, nikel oksit hidroksit katot (NiOOH), metalik kadmiyum anot (Cd) ve tipik olarak potasyum hidroksitten (KOH) oluşan bir alkalın elektrolit kullanır. Deşarj sırasında, anottaki kadmiyum, kadmiyum hidroksite (Cd(OH)_2) oksitlenirken, katottaki nikel oksit, nikel hidroksite (Ni(OH)_2) indirgenir. Şarj sırasında bu süreç tersine döner.

2.1.2.2 Nikel-kadmiyum bataryaların avantajları

- NiCd bataryalar, aşırı şarj ve aşırı deşarj karşı dayanıklılıkları ve esneklikleriyle bilinir; bu da onları elektrikli demiryolları gibi ağır iş uygulamaları için uygun kılar.
- Geniş bir sıcaklık aralığında etkili bir şekilde çalışabilirler ve diğer bazı batarya kimyalarına kıyasla sıcaklık dalgalanmalarından daha az etkilenirler.
- NiCd bataryalar çok sayıda şarj-deşarj döngüsüne dayanabilir ve nispeten uzun bir hizmet ömrü sağlar.
- NiCd bataryalar hızlı bir şekilde şarj edilebilir; bu, sık ve hızlı şarj döngülerine sahip uygulamalar için avantajlıdır.

2.1.2.3 Nikel-kadmiyum bataryaların uygulamaları

- NiCd bataryalar elektrikli demiryollarında öncelikle aydınlatma, sinyalizasyon sistemleri, iletişim ekipmanları ve acil durum sistemlerine güç sağlamak gibi yardımcı güç uygulamaları için kullanılmıştır.
- Elektrikli trenlerde, NiCd bataryalar yedek güç kaynağı olarak görev yapar ve havai kablo arızalarında veya ana güç kaynağının geçici olarak kesilebileceği başlatma/kapatma prosedürleri sırasında gerekli enerjiyi sağlar.
- Ayrıca dizel-elektrikli hibrit lokomotiflerde, rejeneratif frenleme sırasında yakalanan enerjiyi depolamak için kullanılırlar; bu daha sonra hızlanmaya yardımcı olmak veya yardımcı sistemlere güç sağlamak için kullanılabilir.

2.1.2.4 Nikel-kadmiyum bataryaların zorlukları ve sınırlamaları

- NiCd bataryalar, hafıza etkisi olarak bilinen bir olgudan olumsuz etkilenebilir; bu durumda bataryanın tekrar tekrar kısmen boşaltılıp yeniden şarj edilmesi durumunda kapasitesi azalır. Ancak modern NiCd bataryalarda bu etki büyük ölçüde azaltılmıştır.
- NiCd bataryaların temel bileşenlerinden biri olan kadmiyum, zehirli bir ağır metaldir ve uygun şekilde kullanılıp atılmadığı takdirde çevre ve sağlık açısından riskler oluşturur. Geri dönüşüm programları ve düzenlemeleri aracılığıyla çevresel etkinin en aza indirilmesi için çaba gösterilmiştir.

- NiCd bataryalar, lityum iyon gibi diğer bazı batarya kimyalarıyla karşılaştırıldığında genellikle daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir; bu da, daha yüksek enerji depolama kapasitesi gerektiren uygulamalarda kullanımlarını sınırlayabilir.

2.1.2.5 Nikel-kadmiyum bataryaların bakımı

NiCd bataryalar, elektrolit seviyelerinin düzenli kontrolleri, gaz oluşumunu önlemek için uygun havalandırmanın sağlanması ve hücre voltajlarını ve kapasitelerini dengelemek için ara sıra dengeleme şarjı dahil olmak üzere periyodik bakım gerektirir.

2.1.3 Kurşun-asit bataryalar

Kurşun-asit bataryalar, güvenilirlikleri, sağlamlıkları ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle uzun yıllardan beri elektrikli demiryolları da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrikli demiryolları bağlamında Kurşun-asit bataryalar hakkında ayrıntılı bilgiler şunları içerir:

2.1.3.1 Kurşun-asit bataryaların kimyasal yapısı

Kurşun-asit bataryalarda kurşun dioksit (PbO_2) katot, süngerimsi kurşun (Pb) anot ve sülfürik asit (H_2SO_4) elektrolit kullanılır. Deşarj sırasında, katottaki kurşun dioksit, kurşun sülfata ($PbSO_4$) indirgenirken, anottaki kurşun, kurşun sülfata oksitlenir. Şarj sırasında bu süreç tersine döner ve kurşun sülfat tekrar kurşun dioksit ve kurşuna dönüştürülür.

2.1.3.2 Kurşun-asit bataryaların avantajları

- Kurşun-asit bataryaları, zorlu çalışma koşullarına ve çok sayıda şarj-deşarj döngüsüne dayanma yeteneği ile güvenilirlikleri ve sağlamlıkları ile bilinir; bu da onları elektrikli demiryolları gibi ağır iş uygulamaları için uygun kılar.
- Kurşun-asit bataryaları, diğer birçok batarya kimyasıyla karşılaştırıldığında nispeten ucuzdur; bu da onları, maliyetin öncelikli olarak dikkate alındığı uygulamalar için ekonomik açıdan cazip kılar.
- Kurşun-asit batarya teknolojisi köklü bir yapıya sahiptir ve geniş çapta anlaşılmaktadır; üretim, geri dönüşüm ve imha için kapsamlı altyapı ve destek mevcuttur.

- Kurşun-asit bataryaların ana bileşenleri olan kurşun ve sülfürik asit, bol miktarda bulunur ve yaygın olarak bulunur; bu da batarya üretimi için istikrarlı bir tedarik zinciri sağlar.

2.1.3.3 Kurşun-asit bataryaların uygulamaları

- Kurşun-asit bataryalar, elektrikli demiryollarında, acil durum sistemleri için yedek güç sağlamak, aydınlatma, HVAC ve iletişim ekipmanı gibi yerleşik yardımcı sistemlere güç sağlamak ve rejeneratif frenleme sırasında yakalanan enerjinin depolanması dahil olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır.
- Elektrikli trenlerde Kurşun-asit bataryaları, frenleme sırasında enerjiyi depolamak ve hızlanma sırasında serbest bırakmak, enerji tüketimini azaltmak ve genel verimliliği artırmak için havai katener sistemleri veya üçüncü raylı sistemlerle birlikte kullanılabilir.
- Ayrıca dizel motorlar veya elektrikli cer motorları ile birlikte tahrik gücü sağlayan, enerji depolama sisteminin bir parçası olarak görev yaptıkları dizel-elektrikli hibrit lokomotiflerde de kullanılırlar.

2.1.3.4 Kurşun-asit bataryaların zorlukları ve sınırlamaları

- Kurşun-asit bataryaları diğer birçok batarya kimyasına kıyasla genellikle daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir, bu da aynı enerji depolama kapasitesine ulaşmak için daha büyük ve daha ağır batarya paketlerinin gerekli olmasına neden olur.
- Kurşun-asit bataryaları, elektrolit seviyelerinin artırılması, hücre voltajlarının eşitlenmesi ve gaz oluşumunu önlemek için uygun havalandırmanın sağlanması da dahil olmak üzere düzenli bakım gerektirir; bu da işletme maliyetlerine ve karmaşıklığa katkıda bulunur.
- Kurşun-asit bataryaları, diğer bazı batarya kimyasallarıyla karşılaştırıldığında sınırlı sayıda şarj-deşarj döngüsüne sahiptir, bu da çalışma ömrünün kısalmasına ve zaman içinde potansiyel olarak toplamda daha yüksek sahip olma maliyetine yol açar.

2.1.3.5 Kurşun-asit bataryaların çevresel hususları

Kurşun-asit bataryaları kurşun, zehirli bir ağır metal ve sülfürik asit içerir; bunlar, uygun şekilde kullanılıp atılmadığı takdirde çevre ve sağlık açısından risk oluşturabilir. Geri dönüşüm programları ve bataryaların imhasına ilişkin düzenlemeler aracılığıyla çevresel etkinin en aza indirilmesi için çaba gösterilmektedir.

2.1.4 Nikel-metal hidrit bataryalar

Nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar, öncelikle geleneksel kurşun-asit bataryalara kıyasla daha yüksek enerji yoğunlukları ve nikel-kadmiyum bataryalara kıyasla daha düşük çevresel etkileri nedeniyle elektrikli demiryolları da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Elektrikli demiryolları bağlamında NiMH bataryalar hakkında ayrıntılı bilgiler şunları içerir:

2.1.4.1 Nikel-metal hidrit bataryaların kimyasal yapısı

NiMH bataryalar, nikel oksihidroksit (NiOOH) katot, tipik olarak nadir toprak metal alaşımından oluşan bir metal hidrit (MH) anot ve genellikle potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit olmak üzere bir alkalın elektrolit kullanır. (NaOH). Deşarj sırasında, hidrojen iyonları metal hidrit anot tarafından emilerek metal hidrit oluşturulur, katottaki nikel oksit ise nikel hidroksite indirgenir. Şarj sırasında bu süreç tersine döner.

2.1.4.2 Nikel-metal hidrit bataryaların avantajları

- NiMH bataryalar, geleneksel kurşun-asit bataryalara kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunarak birim ağırlık veya hacim başına daha fazla enerji depolama sağlar; bu, elektrikli demiryolları gibi alan ve ağırlığın kısıtlı olduğu uygulamalar için avantajlıdır.
- NiMH bataryalar, zehirli kadmiyum içermediklerinden nikel-kadmiyum bataryalara göre daha çevre dostu olarak kabul edilir. Ayrıca kurşun içermedikleri için çevreye kurşun-asit bataryalardan daha az zararlıdırlar.
- NiMH bataryalar, çok sayıda şarj-deşarj döngüsüne dayanma yeteneği ile güvenilirlikleri ve sağlamlıkları ile bilinir; bu da onları elektrikli demiryolları gibi ağır iş uygulamaları için uygun kılar.

- NiMH bataryalar, diğer bazı batarya kimyalarıyla karşılaştırıldığında genellikle daha düşük bir kendi kendine deşarj oranına sahiptir; bu da, kullanılmadıklarında daha uzun süre şarjlarını korumalarına olanak tanır.

2.1.4.3 Nikel-metal hidrit bataryaların uygulamaları

- NiMH bataryalar, elektrikli demiryollarında, acil durum sistemleri için yedek güç sağlamak, aydınlatma, HVAC ve iletişim ekipmanı gibi yerleşik yardımcı sistemlere güç sağlamak ve rejeneratif frenleme sırasında yakalanan enerjiyi depolamak da dahil olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır.
- Elektrikli trenlerde NiMH bataryalar, frenleme sırasında enerjiyi depolamak ve hızlanma sırasında serbest bırakmak, enerji tüketimini azaltmak ve genel verimliliği artırmak için havai katener sistemleri veya üçüncü raylı sistemlerle birlikte kullanılabilir.
- Ayrıca, dizel motorlar veya elektrikli cer motorları ile birlikte tahrik gücü sağlayan, enerji depolama sisteminin bir parçası olarak görev yaptıkları hibrit lokomotiflerde de kullanılırlar.

2.1.4.4 Nikel-metal hidrit bataryaların zorlukları ve sınırlamaları

- NiMH bataryalar, kurşun asitli bataryalara kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunarken, genellikle lityum iyon bataryalara kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler; bu da, daha yüksek enerji depolama kapasitesi gerektiren uygulamalarda kullanımlarını sınırlayabilir.
- NiMH bataryalar düzenli olarak tamamen boşaltılıp yeniden şarj edilmediği takdirde hafıza etkisi gösterebilir ve bu da zamanla kapasitenin azalmasına neden olur. Ancak modern NiMH bataryalarda bu etki azaltılmıştır.
- NiMH bataryalar, kurşun-asit bataryalarla karşılaştırıldığında daha pahalı olabilir, ancak üretim süreçlerindeki ilerlemeler ve ölçek ekonomileri nedeniyle maliyetleri zaman içinde azalmıştır.

2.1.4.5 Nikel-metal hidrit bataryaların bakımı

NiMH bataryalar, kurşun-asit veya nikel-kadmiyum gibi diğer bazı batarya kimyalarına kıyasla genellikle çok az bakım gerektirir. Güvenli ve güvenilir çalışmayı

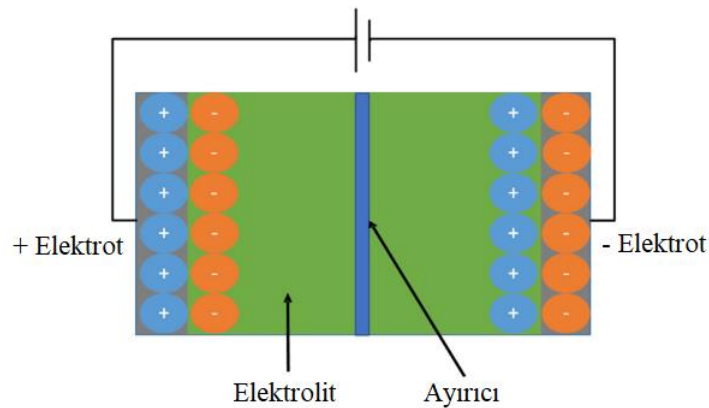
sağlamak için batarya sağlığının, sıcaklığının ve şarj durumunun düzenli olarak izlenmesi gerekir.

2.1.5 Süper kapasitörler

Ultra kapasitörler veya elektrikli çift katmanlı kapasitörler (EDLC'ler) olarak da bilinen süper kapasitörler, geleneksel kapasitörler ve bataryalar arasındaki boşluğu dolduran enerji depolama cihazlarıdır. Yüksek güç yoğunlukları, hızlı şarj ve deşarj yetenekleri ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle elektrikli demiryollarında çeşitli uygulamalar için giderek daha fazla kullanılmaktadırlar. Elektrikli demiryolları bağlamında süper kapasitörler hakkında ayrıntılı bilgiler şunları içerir:

2.1.5.1 Süper kapasitörlerin çalışma prensibi

Süper kapasitörler, elektriksel çift katmanlı kapasitans ve yapay kapasitans ilkelerini kullanarak enerjiyi kimyasal olarak değil elektrostatik olarak depolar. Aşağıda Şekil 2.1'de verildiği gibi bir elektrolit çözeltisine batırılmış iki elektrottan (genellikle aktif karbon veya karbon nanotüplerden yapılır) oluşurlar. Bir voltaj uygulandığında, elektrolitten gelen iyonlar, elektrot-elektrolit arayüzünde katmanlar oluşturarak çift yük katmanı oluşturur. Enerjiyi kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolayan bataryaların aksine süper kapasitörler, şarjın fiziksel olarak ayrılması yoluyla enerji depolar ve minimum bozulmayla hızlı şarj ve deşarj döngülerine olanak tanır.



Şekil 2.1 : Bir EDLC'nin şematik diyagramı [3]

2.1.5.2 Süper kapasitörlerin avantajları

- Süper kapasitörler yüksek güç yoğunluğu sunarak büyük miktarlardaki elektrik gücünü hızlı bir şekilde iletmelerine ve absorbe etmelerine olanak tanır; bu,

elektrikli demiryollarında ani hızlanma veya rejeneratif frenleme gerektiren uygulamalar için avantajlıdır.

- Süper kapasitörler bataryalardan çok daha hızlı şarj ve deşarj edilebilir; bu da onları, elektrikli trenlerde frenleme sırasında enerjinin yakalanması gibi hızlı enerji depolama ve salınımının kritik olduğu uygulamalar için uygun hale getirir.
- Süper kapasitörler genellikle bataryalarla karşılaştırıldığında daha uzun bir çevrim ömrüne sahiptir; uygun çalışma koşulları altında yüzbinlerce ila milyonlarca şarj-deşarj döngüsü gerçekleştirilebilir ve zaman içinde bakım ve değiştirme maliyetleri azalır.
- Süper kapasitörler, -40°C ile 65°C arasındaki sıcaklıkta veya daha yüksek geniş bir sıcaklık aralığında etkili bir şekilde çalışabilir, bu da onları çeşitli iklim ve ortamlarda çalışan elektrikli demiryollarında kullanıma uygun hale getirir.
- Süper kapasitörler, performansta önemli bir düşüş olmaksızın yüksek akımlara, mekanik şoklara ve titreşime dayanabilme özellikleriyle güvenilirlikleri ve sağlamlıklarıyla bilinir.

2.1.5.3 Süper kapasitörlerin uygulamaları

- Süper kapasitörler, elektrikli demiryollarında, rejeneratif frenleme sırasında enerjinin yakalanması ve depolanması, hızlanma sırasında çekiş desteği için güç sağlanması ve aydınlatma, HVAC ve iletişim ekipmanı gibi yardımcı sistemler için kısa süreli güç patlamaları sağlanması dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılır.
- Elektrikli trenlerde, bataryaları desteklemek veya değiştirmek için güç aktarma organlarına süper kapasitörler entegre edilebilir, böylece hızlı ivmelenme için yüksek güçlü enerji depolama sağlanır ve ana çekiş sistemi üzerindeki yük azaltılır.
- Süper kapasitörler, demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde voltaj stabilizasyonuna ve güç kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunarak hızlı yük değişimleri sırasında voltaj dalgalanmalarını ve geçici voltaj düşüşlerini azaltır.

- Süper kapasitörler ayrıca, fren yapan trenlerden gelen enerjiyi yakalamak ve depolamak için demiryolu hatları boyunca yol kenarı enerji depolama sistemlerinde de kullanılmaktadır; bu enerji daha sonra diğer trenlere yardımcı olmak veya talebin yoğun olduğu dönemlerde şebeke gücünü desteklemek üzere serbest bırakılabilmektedir.

2.1.5.4 Süper kapasitörlerin zorlukları ve sınırlamaları

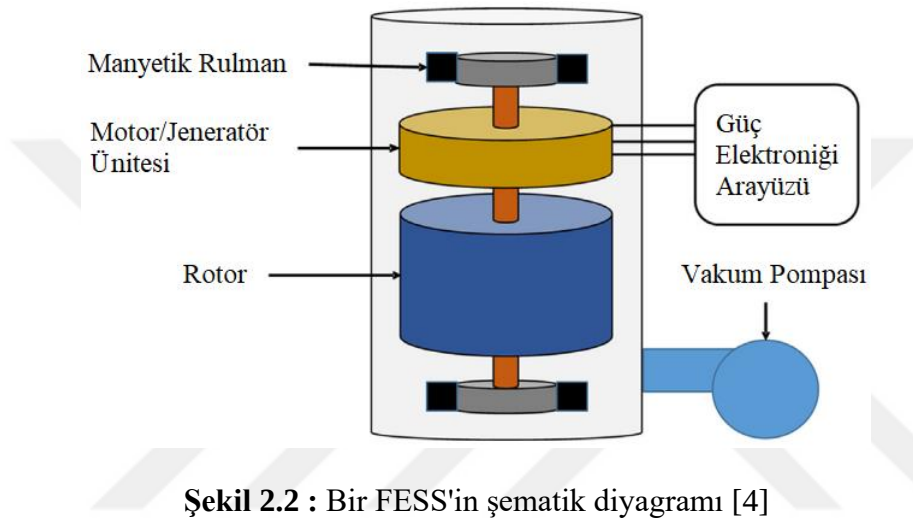
- Süper kapasitörler yüksek güç yoğunluğu sunarken, enerji yoğunlukları (birim kütle veya hacim başına enerji depolama) genellikle bataryalardan daha düşüktür, bu da uzun vadeli enerji depolama veya yüksek enerji kapasitesi gerektiren uygulamalara uygunluklarını sınırlar.
- Süper kapasitörler, bataryalarla karşılaştırıldığında daha yüksek kendi kendine deşarj oranları sergiler, bu da zamanla kademeli enerji kaybına yol açar ve optimum performansı korumak için periyodik yeniden şarj gerektirebilir.
- Süper kapasitörler, diğer bazı enerji depolama teknolojileriyle karşılaştırıldığında ilk yatırım maliyeti başlangıçta daha pahalı olabilir, ancak üretim süreçlerindeki ilerlemeler ve ölçek ekonomileri nedeniyle maliyetleri zaman içinde azalmıştır.
- Süper kapasitörler, bataryalarla karşılaştırıldığında daha düşük çalışma voltajlarına sahiptir; tipik olarak hücre başına 2,5V ila 3,8V aralığındadır ve bu, daha yüksek voltajlara ulaşmak için voltaj dengeleme veya istifleme tekniklerinin kullanılmasını gerektirebilir; bu da sistem tasarımına karmaşıklık ve maliyet ekler.

2.1.6 Volan enerji depolama sistemleri

Volan enerji depolama sistemleri (FESS), kinetik enerjiyi dönen bir kütlede (volan) depolayan ve gerektiğinde tekrar elektrik enerjisine dönüştüren mekanik cihazlardır. Elektrikli demiryollarında, rejeneratif frenleme için enerji depolama, çekiş desteği ve yardımcı sistemler için yedek güç sağlama dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır. Elektrikli demiryolları bağlamında volan enerji depolama sistemleri hakkında detaylı bilgiler şunları içerir:

2.1.6.1 Volan enerji depolama sistemlerinin çalışma prensibi

Volanlı enerji depolama sistemleri, aşağıda Şekil 2.2’de verildiği gibi bir motor-jeneratör ünitesine bağlanan yüksek hızda dönen bir volandan oluşur. Şarj sırasında, demiryolunun elektrik şebekesinden gelen veya rejeneratif frenleme yoluyla üretilen fazla elektrik enerjisi, volanı hızlandırmak ve kinetik enerjiyi depolamak için kullanılır. Deşarj sırasında volanın dönme enerjisi, motor-jeneratör ünitesi tarafından tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür ve bu daha sonra çekiş sistemlerine, yardımcı ekipmanlara güç sağlamak için kullanılabilir veya şebekeye yeniden enjekte edilebilir.



Şekil 2.2 : Bir FESS'in şematik diyagramı [4]

2.1.6.2 Volan enerji depolama sistemlerinin avantajları

- Volan enerji depolama sistemleri, yüksek güç yoğunluğu sunarak büyük miktarlarda enerjiyi hızlı bir şekilde dağıtmalarına ve absorbe etmelerine olanak tanır; bu da onları, elektrikli demiryollarında rejeneratif frenleme gibi hızlı enerji depolama ve salımı gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir.
- Volanlar, güç talebindeki değişikliklere neredeyse anında yanıt vererek hızlı enerji aktarımı ve elektrikli demiryolu sistemlerinde dinamik yüklere yanıt vererek genel sistem verimliliğini ve performansını artırabilir.
- Volan enerji depolama sistemleri genellikle uygun çalışma koşulları altında gerçekleştirilebilen yüzbinlerce ila milyonlarca şarj-deşarj döngüsüyle uzun bir çalışma ömrüne sahiptir ve zaman içinde bakım ve değiştirme maliyetlerini azaltır.

- Volanlar, şarj ve deşarj döngüleri sırasında nispeten düşük enerji kayıplarına sahiptir; bu da diğer bazı enerji depolama teknolojileriyle karşılaştırıldığında yüksek verimlilik sağlar ve bu da genel enerji tasarrufuna ve işletme maliyetinin azaltılmasına katkıda bulunabilir.
- Kimyasal reaksiyonlar nedeniyle zamanla bozunan bataryaların aksine, volan enerji depolama sistemleri kimyasal bozunmaya uğramaz ve bu da onların çalışma ömrü boyunca tutarlı bir performans sürdürmesine olanak tanır.

2.1.6.3 Volan enerji depolama sistemlerinin uygulamaları

- Volan enerji depolama sistemleri, elektrikli demiryollarında, rejeneratif frenleme sırasında enerjinin yakalanması ve depolanması, hızlanma sırasında çekiş desteği için güç sağlanması ve aydınlatma, HVAC ve iletişim ekipmanı gibi araç içi yardımcı sistemler için yedek güç sağlanması dahil olmak üzere çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır.
- Elektrikli trenlerde, bataryaları desteklemek veya değiştirmek için volan enerji depolama sistemleri aktarma organlarına entegre edilebilir, böylece hızlı ivmelenme için yüksek güçlü enerji depolama sağlanır ve ana cer sistemi üzerindeki yük azaltılır.
- Volanlar, demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde voltaj stabilizasyonuna ve güç kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunarak hızlı yük değişimleri sırasında voltaj dalgalanmalarını ve geçici voltaj düşüşlerini azaltır.
- Volan enerji depolama sistemleri ayrıca, fren yapan trenlerden gelen enerjiyi yakalamak ve depolamak için demiryolu rayları boyunca yol kenarındaki konumlara da yerleştirilebilir; bu enerji daha sonra diğer trenlere yardımcı olmak veya talebin yoğun olduğu dönemlerde şebeke gücünü desteklemek üzere serbest bırakılabilir.

2.1.6.4 Volan enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları

- Volan enerji depolama sistemleri yüksek güç yoğunluğu sunarken, enerji yoğunlukları (birim kütle veya hacim başına enerji depolama) genellikle bataryalardan veya diğer bazı enerji depolama teknolojilerinden daha düşüktür,

bu da uzun süreli enerji depolama veya yüksek enerji kapasitesi gerektiren uygulamalara uygunluklarını sınırlandırır.

- Volan enerji depolama sistemleri, yüksek hızlı dönüş nedeniyle mekanik strese ve aşınmaya maruz kalır; bu da, uygun şekilde tasarlanmadığı ve bakımı yapılmadığı takdirde bakım gereksinimlerine ve olası güvenlik sorunlarına yol açabilir.
- Volanlar, enerji depolama kapasitesi ve güç çıkışı üzerinde kısıtlamalar getirebilecek malzeme mukavemeti, rulman kabiliyetleri ve güvenlik hususları gibi faktörler tarafından belirlenen, izin verilen maksimum dönüş hızıyla sınırlıdır.
- Volanlar, çalışma sırasında sürtünme ve rulman kayıplarına maruz kalır; bu da genel verimliliği azaltabilir ve dönüş hızını korumak için ek enerji girişi gerektirebilir.

2.1.7 Hidrojen yakıt hücreleri

Hidrojen yakıt hücreleri (HFC), demiryolu taşımacılığında geleneksel tahrik sistemlerine sıfır emisyonlu çalışma, yüksek enerji verimliliği ve azaltılmış çevresel etki sunan umut verici alternatifler olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrojen yakıt hücresi trenlerinde hidrojen gazı, yakıt hücresi yığını içindeki elektrokimyasal bir işlem yoluyla elektriğe dönüştürülür ve tek yan ürün su buharıdır. Elektrikli demiryolları bağlamında hidrojen yakıt hücreleri hakkında ayrıntılı bilgiler şunları içerir:

2.1.7.1 Hidrojen yakıt hücrelerinin yapısı ve çalışma prensibi

Hidrojen yakıt hücreleri, yakıt hücresi yığını, hidrojen depolama tankları, güç elektroniği ve yardımcı sistemler dahil olmak üzere çeşitli bileşenlerden oluşur. Yakıt hücresi yığını, her biri bir anot, bir katot ve bir elektrolit membran içeren çok sayıda ayrı hücreden oluşur. Hidrojen gazı, hücrenin anot tarafına beslenir ve burada elektrokimyasal oksidasyona uğrayarak elektronları ve protonları serbest bırakır. Elektronlar harici bir devre üzerinden akarak elektrik gücü üretirken, protonlar elektrolit membrandan katot tarafına geçerek havadan gelen oksijenle ve dış devreden gelen elektronlarla birleşerek su buharı ve ısı üretir.

Şu ana kadar, cer motor çekiş için hidrojen yakıt hücreleri kullanan demiryolu araçlarının sertifikasyonu için gereksinimleri içeren yayınlanmış bir standart

bulunmamaktadır [7]. 2024/2025 yılında yayınlanması planlanan IEC 63341-1 [8] ve IEC 63341-2 [9] gibi standartların geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Ancak şimdilik demiryolu şirketleri diğer standartları referans olarak değerlendirmektedir. Bunlardan bazıları Çizelge 2.1'de açıklanmıştır [5], [6], [7].

Çizelge 2.1 : Demiryolundaki hidrojen yakıt hücresi sisteminin referans standartları [5], [6].

Standart	Sertifika açıklaması
EC 79/2009	Hidrojenle çalışan motorlu araçların tür onayı
ISO 4126-1	Aşırı basınca karşı koruma için güvenlik cihazları
EN 61373	Yapısal güvenlik takozu ve titreşim testinin validasyonu
EN 62282-3-100	Yakıt hücresi (sabit kullanım)
EN 45545-2	Yangın güvenliği - demiryolu koşulları
EN 50125/IEC 60077	Çevre - demiryolu koşulları
EN 50121-3-2	EMC - demiryolu koşulları

2.1.7.2 Hidrojen yakıt hücrelerinin avantajları

- Hidrojen yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijen arasındaki elektrokimyasal reaksiyon yoluyla elektrik üretir ve tek yan ürün su buharıdır, bu da onları demiryolu taşımacılığı için çevre dostu ve sürdürülebilir bir tahrik çözümü haline getirir.
- Hidrojen yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlar ve dizel-elektrik tahrik sistemleriyle karşılaştırıldığında yüksek enerji verimliliği sunar; bazı uygulamalarda %60'ı aşan verimlilikleri sayesinde enerji tüketimi ve işletme maliyetleri azalır.
- Hidrojen yakıt hücreli trenler, geleneksel dizel lokomotiflere kıyasla daha az gürültü ve titreşimle sessiz ve sorunsuz çalışarak daha konforlu bir yolcu deneyimi sağlar ve kentsel alanlarda gürültü kirliliğini en aza indirir.
- Hidrojen yakıt hücreli trenler, elektrikli altyapıdan bağımsız olarak çalışabilir ve havai katener tellerine veya üçüncü raylı sistemlere dayanan elektrikli trenlere kıyasla daha fazla esneklik ve özerklik sunar. Bu, onları, elektrifikasyonun pratik olmadığı veya maliyetin engelleyici olabileceği bölgesel ve uzak demiryolu güzergahları için uygun hale getirir.

- Hidrojen sıkıştırılmış gaz veya sıvı formda depolanabilir ve taşınabilir; bu da bataryalara veya havai kablolarla kıyasla enerji yoğunluğu, menzil ve yakıt ikmali esnekliği açısından avantajlar sunar.

2.1.7.3 Hidrojen yakıt hücrelerinin uygulamaları

Hidrojen yakıt hücreleri, dünya çapında devam eden birçok pilot proje ve ticari uygulamayla demiryolu taşımacılığında giderek daha fazla benimsenmektedir. Bazı yaygın uygulamalar şunları içerir:

- Hidrojen yakıt hücreli trenler bölgesel ve banliyö demiryolu hizmetleri için çok uygundur; sıfır emisyonlu çalışma, genişletilmiş menzil ve hızlı yakıt ikmali yetenekleri sunar. Elektrikli olmayan güzergahlarda dizel trenlere çevre dostu bir alternatif sunarak sera gazı emisyonlarını azaltır ve kentsel alanlarda hava kalitesini iyileştirir.
- Hidrojen yakıt hücreli manevra ve makaslama lokomotifler, demiryolu tersanelerinde ve yük terminallerinde vagonların manevrası ve tren montajı için kullanılır. Sessiz çalışma, düşük emisyon ve düşük hızlarda yüksek tork sunarak gürültü ve hava kirliliğinin önemli olduğu kentsel ve endüstriyel ortamlara uygun hale getirirler.
- Hidrojen yakıt hücreleri, bataryalar veya süper kapasitörlerin yanı sıra hibrit tahrik sistemlerine entegre edilebilir ve tamamlayıcı enerji depolama ve güç yönetimi yetenekleri sunar. Hibrit hidrojen-elektrikli trenler, verimliliği, performansı ve menzili optimize etmek için hidrojen yakıt hücrelerinin avantajlarını yerleşik enerji depolamayla birleştirir.

2.1.7.4 Hidrojen yakıt hücrelerinin zorlukları ve sınırlamaları

Avantajlarına rağmen, hidrojen yakıt hücreleri aynı zamanda aşağıdakiler de dahil olmak üzere bazı zorlukları ve hususları da beraberinde getirmektedir:

- Hidrojen yakıt hücresi trenleri, üretim, depolama ve dağıtım tesisleri de dahil olmak üzere özel hidrojen yakıt ikmali altyapısı gerektirir. Hidrojen tedarik zinciri ve altyapı ağının kurulması, özellikle hidrojen mevcudiyetinin sınırlı olduğu bölgelerde maliyetli ve karmaşık olabilir.

- Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi, öncelikle yakıt hücrelerinin, hidrojen depolamanın ve altyapının yüksek maliyeti nedeniyle şu anda geleneksel dizel tahrik sistemlerinden daha pahalıdır. Ancak teknolojiye devam eden ilerlemelerin, ölçek ekonomilerinin ve destekleyici politikaların zaman içinde maliyetleri düşürmesi beklenmektedir.
- Hidrojen son derece yanıcıdır ve güvenlik risklerini azaltmak için dikkatli kullanım, depolama ve taşıma gerektirir. Hidrojen yakıt hücresi trenlerinin ve altyapısının güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için sağlam güvenlik protokolleri, eğitim programları ve düzenleyici standartlar gereklidir.
- Hidrojen, dizel yakıt veya bataryalarla karşılaştırıldığında hacim olarak daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir; eşdeğer menzil ve operasyonel esneklik için daha büyük depolama tankları veya daha sık yakıt ikmali gerektirir. Gelişmiş kompozit malzemeler ve kriyojenik depolama gibi hidrojen depolama teknolojilerindeki yenilikler bu zorluğun üstesinden gelmeye yardımcı olabilir.

2.2 Enerji Depolama Sistemi Teknolojilerinin Karakteristik Özellikleri

Farklı enerji depolama sistemi (ESS) teknolojilerinin karakteristik özelliklerini anlamak, bunların çeşitli uygulamalara uygunluğunu değerlendirmek açısından çok önemlidir. Burada, demiryolu taşımacılığında yaygın olarak kullanılan enerji depolama sistemlerinin (ESS'ler) karakteristik özellikleri ayrıntılı olarak ele alınırsa:

2.2.1 Enerji yoğunluğu

Enerji yoğunluğu, enerji depolama sisteminin birim hacmi veya kütlesi başına depolanan enerji miktarını ifade eder. Tipik olarak kilogram başına watt-saat (Wh/kg) veya litre başına watt-saat (Wh/L) cinsinden ölçülür. Daha yüksek enerji yoğunluğu, belirli bir hacim veya ağırlıkta daha fazla enerji depolama kapasitesine olanak tanıyarak, daha uzun çalışma aralığına veya şarjlar arasında süreye olanak tanır. Enerji yoğunluğu farklı ESS teknolojileri arasında büyük farklılıklar gösterir; lityum iyon bataryalar genellikle Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH) bataryalar, süper kapasitörler ve hidrojen yakıt hücreleri gibi diğer seçeneklerle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji yoğunluğu sunar.

2.2.2 Güç yoğunluğu

Güç yoğunluğu, enerjinin enerji depolama sistemi tarafından iletilme veya emilme hızını ifade eder. Genellikle kilogram başına watt (W/kg) veya litre başına watt (W/L) cinsinden ölçülür. Daha yüksek güç yoğunluğu hızlı enerji aktarımına izin vererek ESS'yi demiryolu taşımacılığında rejeneratif frenleme gibi hızlı ivmelenme veya yavaşlama gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir. Süper kapasitörler ve volan enerji depolama sistemleri, bataryalar ve hidrojen yakıt hücrelerine kıyasla genellikle daha yüksek güç yoğunluğu sunar.

2.2.3 Döngü verimliliği

Döngü verimliliği, enerji depolama sisteminin şarj ve deşarj döngüleri sırasında enerji çıkışının enerji girişine oranını ifade eder. Genellikle yüzde (%) olarak ifade edilir. Daha yüksek döngü verimliliği, şarj ve deşarj döngüleri sırasında daha az enerji kaybı anlamına gelir ve bu da daha verimli enerji depolama ve geri kazanım sağlar. Bataryalar ve süper kapasitörler genellikle yüksek çevrim verimliliği sergilerken, hidrojen yakıt hücreleri, hidrojen üretimi, sıkıştırma ve dönüştürme işlemleriyle ilişkili kayıplar nedeniyle daha düşük çevrim verimliliğine sahip olabilir.

2.2.4 Kendiliğinden deşarj

Kendi kendine deşarj, enerji depolama sisteminin herhangi bir harici yük olmadan zaman içinde depolanan enerjiyi kaybetme oranını ifade eder. Tipik olarak birim zaman başına kapasite kaybının yüzdesi olarak ölçülür. Daha düşük kendi kendine deşarj oranları, depolanan enerjide önemli bir kayıp olmadan daha uzun depolama süreleri sağlar ve ESS'nin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini artırır. Süper kapasitörler genellikle bataryalarla karşılaştırıldığında daha yüksek kendi kendine deşarj oranlarına sahipken, hidrojen yakıt hücrelerinin uygun şekilde depolandığında kendi kendine deşarjı ihmal edilebilir düzeydedir.

2.2.5 Depolama süresi

Depolama süresi, enerji depolama sisteminin depolanan enerjiyi yeniden doldurulması veya şarj edilmesi gerekmeden önce tutabileceği süreyi ifade eder. Genellikle saat, gün veya ay olarak ifade edilir. Daha uzun saklama süreleri, ESS'nin sık sık yeniden şarj edilmesine veya değiştirilmesine gerek kalmadan daha uzun çalışma veya bekleme sürelerine olanak tanır. Bataryalar, özellikle lityum iyon bataryalar ve Ni-MH

bataryalar, süper kapasitörler ve hidrojen yakıt hücrelerine kıyasla genellikle daha uzun depolama süreleri sunar.

2.2.6 Servis ömrü

Servis ömrü, enerji depolama sisteminin normal çalışma koşulları altında etkin ve güvenilir bir şekilde çalışabildiği süreyi ifade eder. Genellikle yıl veya şarj-deşarj döngüsü sayısı ile ifade edilir. Daha uzun servis ömrü, ESS'nin daha fazla dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü gösterir ve zaman içinde bakım gereksinimlerini ve toplam sahip olma maliyetini azaltır. Bataryalar ve süper kapasitörler genellikle optimum koşullar altında binlerce ila milyonlarca şarj-deşarj döngüsüyle uzun servis ömrü sunarken, hidrojen yakıt hücreleri uygun bakımla orta ila uzun servis ömrüne sahip olabilir.

2.2.7 Yatırım maliyeti

Yatırım maliyeti, enerji depolama sisteminin satın alınması ve kurulumu için gereken ilk yatırımı ifade eder. Genellikle para birimi cinsinden ölçülür (ör. dolar, euro). Daha düşük yatırım maliyetleri, özellikle büyük ölçekli kurulumlar veya mevcut altyapının yenilenmesi için ESS'yi raylı ulaşım sistemlerinde benimsenmesi açısından daha uygun fiyatlı ve cazip hale getirir. Yatırım maliyetleri, farklı ESS teknolojileri arasında önemli ölçüde farklılık gösterir; bataryalar genellikle orta ila yüksek yatırım maliyetlerine sahipken, süper kapasitörler ve hidrojen yakıt hücreleri daha yüksek ön yatırımlara sahip olabilir.

2.2.8 Çevresel etkiler

Çevresel etkiler, enerji depolama sisteminin üretim, işletme ve atık yok etme yöntemi dahil yaşam döngüsü boyunca çevre üzerindeki etkilerini ifade eder. Daha düşük çevresel etkiler, genel ekolojik dengeye ve kaynakların korunmasına katkıda bulunan, daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir ESS seçeneğine işaret etmektedir. Bataryalar ve hidrojen yakıt hücreleri, kaynak çıkarma, üretim süreçleri ve kullanım ömrünün sonunda elden çıkarmayla ilgili çevresel etkilere sahip olabilir; süper kapasitörler ise daha basit bileşimleri ve geri dönüşüm potansiyelleri nedeniyle genellikle daha düşük çevresel etkilere sahiptir.

Enerji depolama sistemi teknolojilerinin karakteristik özellikleri Çizelge 2.2'de karşılaştırılmıştır. Bu karakteristik özellikler, demiryolu taşımacılığı

uygulamalarındaki enerji depolama sistemlerinin uygunluğunun, etkinliğinin ve sürdürülebilirliğinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu özellikleri anlamak, demiryolu operasyonlarının özel gereksinimlerini ve hedeflerini karşılamak için ESS teknolojilerinin seçimi, dağıtımı ve yönetimi konusunda bilinçli karar alınmasını sağlar.



Çizelge 2.2 : Enerji depolama sistemi teknolojilerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması.

Teknoloji	Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Güç yoğunluğu (W/kg)	Döngü verimliliği (%)	Kendiliğinden deşarj	Depolama süresi	Servis ömrü	Yatırım maliyeti (\$/kWh ya da \$/kW)	Çevresel etki
Li-iyon batarya [10, 13, 18, 19, 20, 29]	150-250	250-340	85-95	%2-10/ay	Saat-gün	5-15 yıl ya da 1,000-10,000 çevrim	\$200-600/kWh	Orta, geri dönüşüm potansiyeli, maden sorunları
Nikel-Kadmiyum batarya [10, 11, 13, 16, 28]	40-60	150	70-90	%10/ay	Saat-gün	15-20 yıl ya da 1,500 çevrim	\$300-600/kWh	Zehirli kadmiyum, geri dönüştürülebilir
Kurşun-asit batarya [10, 13, 15, 26, 28]	30-50	180	70-85	%3-20/ay	Saat-gün	3-5 yıl ya da 500-1,000 çevrim	\$50-200/kWh	Yüksek geri dönüştürülebilirlik, kurşun zehirliliği
Nikel-Metal Hidrit batarya [11, 17, 18, 24]	60-120	250	65-80	%20/ay	Saat-gün	5-10 yıl ya da 500-2,000 çevrim	\$200-400/kWh	NiCd bataryadan daha az zehirli, ağır metaller içerir

Çizelge 2.2 (devam) : Enerji depolama sistemi teknolojilerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması.

Teknoloji	Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	Güç yoğunluğu (W/kg)	Döngü verimliliği (%)	Kendiliğinden deşarj	Depolama süresi	Servis ömrü	Yatırım maliyeti (\$/kWh ya da \$/kW)	Çevresel etki
Süper kapasitör [10, 14, 25]	5-10	10,000	85-98	%20-40/gün	Saniye-dakika	10-15 yıl ya da 1,000,000 çevrim	\$10,000-20,000/kWh	Düşük, kullanılan materyallere bağlı
Volan enerji depolama [10, 13, 24]	5-130	800-10,000	85-95	%0.1/saat	Dakika-saat	20+ yıl ya da 10,000-20,000 çevrim	\$1000-5000/kW	Düşük, materyallere bağlı etkiler
Hidrojen yakıt hücreleri [10, 12, 23, 30]	33,300 (kimyasal)	Değişken	30-60	Yok	Gün-ay	5-15 yıl (yakıt hücreleri)	\$1,000-5,000/kW (yakıt hücreleri)	Yenilenebilirse düşük, üretimle ilgili kaygılar

2.3 Enerji Depolama Sistemlerinin Demiryolu Altyapısına Entegrasyonu

Enerji Depolama Sistemlerinin (ESS) demiryolu taşımacılığı altyapısına entegrasyonu, enerji verimliliğinin artırılması, işletme maliyetlerinin azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesinde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Dünya çapında raylı sistemler daha sürdürülebilir ve verimli olmaya çalışırken, ESS'nin entegrasyonuna yönelik çeşitli metodolojiler ve teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bu entegrasyon stratejileri genel olarak üç ana yaklaşıma ayrılabilir: araç üstü enerji depolama sistemleri, yol boyu enerji depolama sistemleri ve hibrit sistemlerdir. Her bir yaklaşım, bataryalar, süper kapasitörler ve volanlar gibi farklı ESS teknolojilerinden yararlanarak benzersiz avantajlar ve zorluklar sunmaktadır.

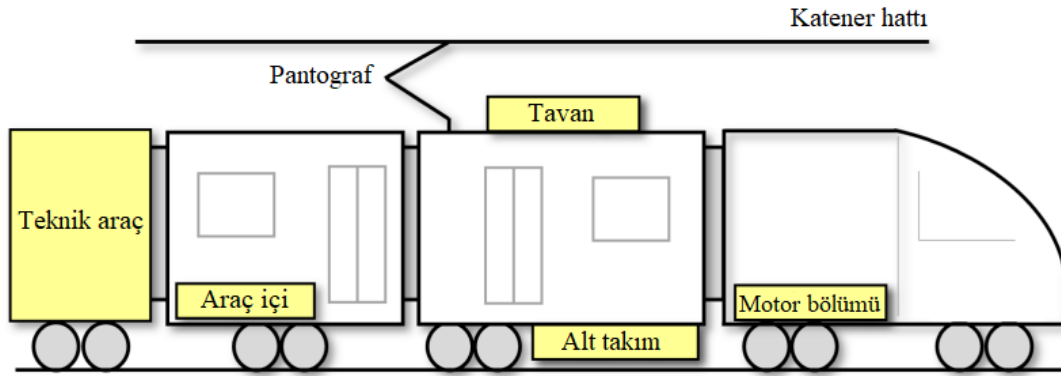
2.3.1 Araç üstü enerji depolama sistemleri

Demiryolu taşımacılığındaki Araç Üstü Enerji Depolama Sistemleri (OESS), enerji depolama teknolojilerinin doğrudan trene kurulmasını içerir. Şekil 2.3'te farklı kurulum türleri verilmiştir. Bu yaklaşım, trenlerin enerjiyi depolamasını ve yeniden kullanmasını sağlayarak enerji verimliliğini artırmayı, operasyonel performansı iyileştirmeyi ve çevresel etkiyi azaltmayı amaçlamaktadır. Bu bölümde araç üstü ESS türleri, bunların yararları, zorlukları ve raylı sistemlerdeki gerçek dünya uygulamaları incelenmektedir. Araç üstü entegrasyon için kullanılan başlıca ESS teknolojileri şunları içerir:

- **Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS):** Elektrik enerjisini depolamak için lityum iyon, kurşun asit veya diğer batarya türleri kullanılır. Yüksek enerji yoğunluğu ve verimliliğiyle bilinen lityum iyon bataryalar, demiryolu taşımacılığı da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kentsel raylı sistemler, tamamen elektrikli trenler ve hibrit trenler için ideal olan lityum iyon bataryalar, önemli miktarda enerji depolama sağlayarak trenlerin hızlanma ve seyir aşamalarında verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanır.
- **Süper kapasitörler:** Yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj döngüleri sunar; rejeneratif frenleme gibi uygulamalar için çok uygundur. Süper kapasitörler hızlı şarj vedeşarj özellikleri sunarak sık frenleme olaylarından kaynaklanan enerjiyi yakalamak ve yeniden kullanmak için idealdir. Özellikle sık durakların

olduğu hafif raylı sistem, tramvaylar, ve kentsel toplu taşıma sistemlerinde kullanışlı olan süper kapasitörler, enerji verimliliğinin artırılmasına ve genel enerji tüketiminin azaltılmasına yardımcı olur.

- Volanlar: Kinetik enerjiyi depolayan ve hızlı güç patlamaları sağlayan, güç kaynağı ve güç talebindeki dalgalanmaları yumuşatmaya uygundur. Yüksek hızlı raylı sistemler için uygun olan volanlar anında enerji kullanılabilirliği sağlar, maksimum elektriksel yük olduğu zamanlarda performansı artırır ve güç kaynağını dengeler.



Şekil 2.3 : Demiryolu araçlarında araç üstü ESS kurulum türleri.

2.3.1.1 Araç üstü enerji depolama sistemlerinin avantajları

Araç üstü enerji depolama sistemleri frenleme sırasında üretilen enerjiyi yakalayıp depolayabilir; bu enerji daha sonra hızlanma veya seyir sırasında yeniden kullanılabilir ve böylece genel enerji tüketimi azaltılır. Enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde depolanan enerjiyi kullanarak şebekeden çekilen en yüksek güç değerini azaltarak daha verimli enerji kullanımına yol açabilmektedir. Daha hızlı ivmelenme için ek güç sağlayarak hizmet verimliliğini artırır ve seyahat sürelerini azaltır. Yerleşik enerji rezervleri sayesinde trenler, geçici elektrik kesintileri veya voltaj düşüşleri sırasında operasyonlarını sürdürerek güvenilirliği artırır. Enerji kullanımını optimize ederek ve harici güç kaynaklarına bağımlılığı azaltarak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur ve daha sürdürülebilir demiryolu operasyonlarına katkıda bulunur. Araç üstü ESS'ye sahip elektrikli trenler genellikle dizel motorlu alternatiflerden daha sessizdir ve daha az gürültü kirliliğine yol açar.

2.3.1.2 Araç üstü enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları

Araç üstü ESS, ağırlığı artırır ve yer kaplar; bu da potansiyel olarak yolcu kapasitesini ve genel tren performansını etkiler. Bu alanda çalışan mühendisler enerji depolama kapasitesini bu kısıtlamalarla dikkatli bir şekilde dengelemelidir. Gelişmiş batarya teknolojileri ve mevcut tren tasarımlarına entegrasyon için yüksek başlangıç yatırımı gerektirir. Maliyet-fayda analizleri, giderlerin uzun vadeli tasarruflara ve verimlilik kazanımlarına dayalı olarak gerekçelendirilmesi açısından önemlidir. Yüksek enerji yoğunlukları termal kaçak ve yangın gibi güvenlik riskleri oluşturur. Bu riskleri azaltmak ve güvenli operasyonları sağlamak için sağlam güvenlik sistemleri ve protokolleri gereklidir. Araç üstü ESS'nin optimum performansını ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için düzenli bakım ve izleme gereklidir. Bu, operasyonel karmaşıklığı ve maliyetleri artırır. Araç üstü enerji depolama sistemlerinin avantajları ve dezavantajları aşağıda Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3 : Demiryolu araçlarında araç üstü ESS entegrasyonunun avantajları ve dezavantajları [31].

Avantajlar	Dezavantajlar
Altyapı maliyeti yok	Daha yüksek toplam maliyet
Daha yüksek verimlilik (frenleme enerjisinin geri kazanılması)	Daha fazla ağırlık ve daha az alan
Acil durumlarda yedekleme	Güvenlikten taviz
Katener stabilizasyonu	Karmaşık sistem testleri (daha az gelişmiş teknoloji)
Katenersiz çalışma (otonomi)	Araç yaşam döngüsünün azalması
Azaltılmış emisyonlar	Daha yüksek önleyici bakım sıklığı

2.3.1.3 Araç üstü enerji depolama sistemlerinin dünyadaki uygulamaları

Birleşik Krallık'ın "Bataryalı Dizel Elektrikli Çoklu Üniteleri" (BDEMU) ve Almanya'nın "Bataryalı Hibrit Treni" uygulamaları hibrit trenlerin gerçek dünyada faaliyete geçen örnekleridir. Hibrit trenler, geleneksel dizel motorları batarya sistemleriyle birleştirerek elektriksiz bölümlerde çalışmaya olanak tanır ve yakıt tüketimini ve emisyonları azaltır. Japonya'nın "Bataryalı Elektrikli Çoklu Üniteleri" (BEMU) ve Çin'in "Süper Kapasitör Tramvay"ı tamamen elektrikli trenlerin gerçek hayattaki uygulamalarına örnek olarak verilebilir. Yalnızca bataryalar veya süper kapasitörlerle çalışan, havai elektrik hatları olmadan çalışabilen, kentsel toplu taşıma sistemleri için ideal olan trenlerdir. Siemens'in rejeneratif fren sistemleriyle donatılmış

Desiro ML trenleri enerji geri kazanım sistemleriyle çalışan trenlerin gerçek hayatta uygulamaya konulmuş bir örneğidir. Frenleme enerjisini yakalayıp depolamak, genel enerji verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini azaltmak için araç st ESS ile donatılmış trenlerdir. Araç st enerji depolama sistemine sahip bataryalı trenlerin karakteristik özellikleri izelge 2.4'te karşılaştırılmıştır.



Çizelge 2.4 : Araç üstü enerji depolama sistemine sahip bataryalı trenlerin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması.

Tren	Batarya kimyası	Batarya üreticisi	Güç Enerji	Çıkış gerilimi	Batarya kurulumu	Cer gücü	DC bara gerilimi	Katener hattı
DENCHA [33]	Li-iyon	Hitachi	360 kWh	1598 V	Alt takım	380 kW	1.5 kV	20 kVac (60 Hz)
Stadler FLIRT Akku [38, 39]	Li-iyon	ABB	180 kWh	-	-	2x500 kW	-	15 kVac (16.7 Hz)
Bombardier Talent 3 [39, 40]	NMC	Bombardier Primove	300/440 kWh 220 A	532 V	Tavan	-	3 kV	15 kVac (16.7 Hz)
Alstom Coradia continental [41]	Li-iyon	Leclanché	840 kWh	-	-	1450 kW	-	15 kVac (16.7 Hz)
Siemens Mireo Plus B [42]	LTO	Toshiba ve Siemens	700 kWh	-	Alt takım	1700 kW	-	15 kVac (16.7 Hz) 20 kVac (50 Hz)
Siemens Desiro ML Cityjet eco [32]	LTO	-	528 kWh	-	-	En fazla 2600 kW	-	15 kVac ya da 20 kVac
CRRC cargo locomotive [37, 43]	Li-iyon	-	200 kWh 350 kW	-	-	5600 kW	-	15 kVac (16.7 Hz) 20 kVac (50 Hz) 1.5 kVdc, 3kVdc
CAF Civity [44]	LTO	-	-	-	-	En fazla 4400 kW	-	15 kVac ya da 20 kVac çift-modlu/üçlü-modlu
Vivarail battery train [45]	Li-iyon	Hoppecke	106 kWh	-	-	-	-	750 Vdc
Seibu 2000 commuter [35]	Li-iyon	-	7.6 kWh 240 A	692 V	Alt takım	-	-	1.5 kVdc
Kawasaki SWIMO LRV [36, 46]	Ni-MH	Kawasaki GIGACELL	7.6 kWh 240 A	532 V	Araç içi	-	600 V	600 Vdc

Araç Üstü Enerji Depolama Sistemleri (OESS), demiryolu taşımacılığında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir ve enerji verimliliği, operasyonel performans ve çevresel etki açısından önemli faydalar sunmaktadır. Maliyet, ağırlık ve güvenlikle ilgili zorluklara rağmen devam eden teknolojik gelişmeler ve başarılı gerçek dünya uygulamaları, araç üstü ESS'nin demiryolu taşımacılığının geleceğini dönüştürme potansiyelini vurgulamaktadır. Bu analiz, faydaları en üst düzeye çıkarmak ve araç üstü enerji depolamayla ilgili zorlukları ele almak için bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirme yapılmasının öneminin altını çizmektedir.

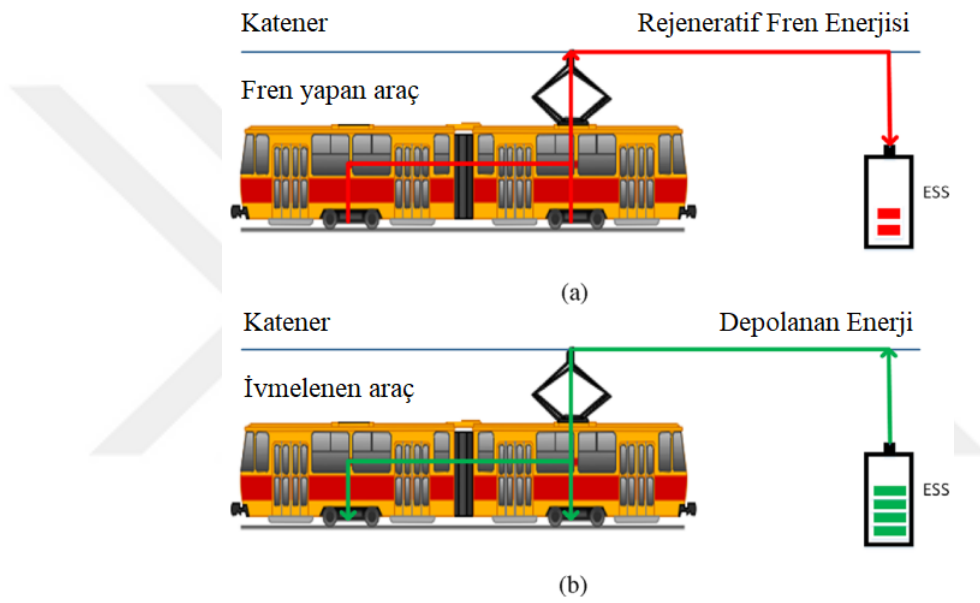
2.3.2 Yol boyu enerji depolama sistemleri

Yol Boyu Enerji Depolama Sistemleri (WESS), demiryolu taşımacılığının verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik stratejik bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu sistemler rayların yanına veya istasyonlara kurularak birden fazla trenin erişebileceği merkezi bir depolama çözümü sağlar. Şekil 2.4'te verildiği gibi yol kenarındaki ESS, enerjiyi yakalayıp yeniden kullanarak enerji tüketiminin azaltılmasına, operasyonel performansın iyileştirilmesine ve çevresel etkilerin en aza indirilmesine katkıda bulunur. Bu bölümde, ESS'de kullanılan çeşitli teknolojileri, bunların faydaları, zorlukları ve gerçek dünyadaki uygulamaları incelenmektedir. Yol boyu entegrasyon için kullanılan başlıca ESS teknolojileri şunları içerir:

- **Bataryalar:** Yüksek kapasiteli bataryalar, gerektiğinde trenlere yeniden dağıtılabilen önemli miktarda enerji depolamak için kullanılır. Lityum-iyon, Nikel-Metal Hidrit (NiMH) ve diğer gelişmiş batarya türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, verimli enerji depolama ve talebin en yüksek olduğu dönemlerde güç sağlama yeteneğine sahiptir. Regeneratif frenlemeden enerji depolayabilecekleri ve hızlanma veya yoğun dönemlerde bu enerjiyi sağlayabilecekleri istasyonlarda veya hattın kenarlarında kullanıma uygundur.
- **Süper kapasitörler:** Hızlı şarj ve deşarj yetenekleriyle bilinen enerji depolama cihazlarıdır. Çift katmanlı kapasitörler ve yapay kapasitörler yol kenarı uygulamalarında kullanılan tipik türleridir. Yüksek güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve büyük miktarlarda enerjiyi hızlı bir şekilde yakalayıp serbest bırakma yeteneğine sahiptir. Birden fazla trenden frenleme enerjisi alıp hızla

ivmelenme sağlayabildikleri için, sık duraklamaların olduğu kentsel toplu taşıma sistemleri için idealdir.

- Volanlar: Rotoru yüksek hızlarda döndürerek enerjiyi kinetik enerji biçiminde depolar. Modern volanlar, sürtünmeyi azaltmak ve verimliliği artırmak için gelişmiş malzemeler ve manyetik yataklar kullanır. Yüksek güç yoğunluğu, hızlı enerji aktarımı, uzun çevrim ömrü ve sağlam performans sunmaktadır. Özellikle hızlı enerji deşarjının gerekli olduğu yüksek hızlı raylı sistemlerde güç kaynağını dengelemek ve maksimum elektriksel yükleri yönetmek için kullanışlıdır.



Şekil 2.4 : Raylı sistemdeki yol boyu ESS'nin çalışma şeması (a) Frenleme aşamasında enerji geri kazanımı; (b) Çekiş aşamasında enerji dağıtımını.

2.3.2.1 Yol boyu enerji depolama sistemlerinin avantajları

Yol Boyu ESS, frenleme sırasında üretilen enerjiyi yakalayıp depolayabilir; bu enerji daha sonra hızlanma veya seyir sırasında trenler tarafından yeniden kullanılabilir ve bu da önemli miktarda enerji tasarrufu sağlar. Yol kenarındaki ESS, talebin en yüksek olduğu dönemlerde depolanan enerjiyi trenlere sağlayarak ana güç şebekesindeki yükü azaltır ve genel sistem verimliliğini artırır. Yol Boyu ESS, geçici elektrik kesintileri veya voltaj düşüşleri sırasında operasyonları sürdürmek için kullanılacak depolanmış enerjiden oluşan bir tampon sağlayarak demiryolu hizmetlerinin güvenilirliğini artırır. Depolanan enerjiye erişim sayesinde trenler daha iyi hızlanma ve daha sorunsuz çalışma elde ederek gecikmeleri azaltabilir ve hizmet kalitesini

artırabilir. Yol kenarındaki ESS, enerji kullanımını optimize ederek ve harici güç kaynaklarına bağımlılığı azaltarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olarak daha sürdürülebilir demiryolu operasyonlarına katkıda bulunur. Yol kenarındaki ESS'yi şarj etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, daha yeşil ulaşım çözümlerini teşvik ederek çevresel faydaları daha da artırabilmektedir.

2.3.2.2 Yol boyu enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları

Yol Boyu ESS'nin kurulumu için bataryaların, süper kapasitörlerin veya volanların maliyetinin yanı sıra bu sistemleri mevcut demiryolu ağlarına entegre edecek altyapı da dahil olmak üzere yüksek ilk yatırım gereklidir. Uzun vadeli tasarruflar ve verimlilik kazanımları, yatırımı haklı çıkarmak için ön maliyetlere göre dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Yol kenarındaki ESS'nin mevcut demiryolu ve şebeke altyapısıyla entegre edilmesi, enerji akışını optimize etmek ve kesintisiz çalışmayı sağlamak için gelişmiş yönetim ve kontrol sistemlerine duyulan ihtiyaç da dahil olmak üzere önemli teknik zorluklar içerir. Entegrasyon sürecinde çeşitli tren türleriyle ve genel demiryolu ağıyla uyumluluk dikkate alınmalıdır. Yol kenarındaki ESS'nin güvenilirliğini ve performansını sağlamak için düzenli bakım şarttır, bu da operasyonel karmaşıklığı ve maliyetleri artırır. Bataryaların ve diğer depolama teknolojilerinin yüksek enerji yoğunluklarıyla ilgili güvenlik endişeleri, sağlam güvenlik protokolleri ve izleme sistemleri aracılığıyla ele alınmalıdır.

2.3.2.3 Yol boyu enerji depolama sistemlerinin dünyadaki uygulamaları

Londra Metrosu, frenleme enerjisini yakalamak ve yeniden kullanmak, enerji verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini azaltmak için yol kenarı süper kapasitörlerini uygulamaya koymuştur. Süper kapasitörler ağ boyunca önemli noktalara kurulur ve sık sık dur-kalk operasyonlarını desteklemek için hızlı enerji depolama ve boşaltma yetenekleri sağlar. Japonya'nın Shinkansen trenleri, güç kaynağını dengelemek ve yoğun yükleri yönetmek için yol kenarı volan sistemlerini kullanarak yüksek hızlı demiryolu ağının güvenilirliğini ve performansını artırır. Volanlar istasyonlara ve hatlar boyunca kurularak hızlanma için anında enerji kullanılabilirliği sağlar ve yüksek talep dönemlerinde tutarlı güç seviyelerini korur. Philadelphia'daki SEPTA demiryolu ağı, trenlerden gelen fren enerjisini yakalamak ve depolamak için yol kenarındaki lityum iyon bataryaları kullanır ve bu enerji daha sonra

hızlanma sırasında trenlere güç sağlamak için yeniden kullanılır. Bataryalar, istasyonlara ve hatlar boyunca stratejik olarak yerleştirilerek, enerjinin verimli bir şekilde yakalanmasına ve ağ genelinde yeniden dağıtılmasına olanak tanır.

Yol Boyu Enerji Depolama Sistemleri, demiryolu taşımacılığının enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak için güçlü bir çözüm sunmaktadır. Bu sistemler, enerjiyi yakalayıp yeniden kullanarak önemli miktarda enerji tasarrufuna, gelişmiş operasyonel performansa ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Maliyet, teknik karmaşıklık ve bakımla ilgili zorluklara rağmen yol kenarındaki ESS'nin faydaları, onları modern demiryolu ağları için değerli bir yatırım haline getirmektedir. Depolama teknolojilerinde ve entegrasyon metodolojilerinde devam eden gelişmeler, demiryolu taşımacılığında daha verimli ve sürdürülebilir bir geleceğin önünü açarak, yol kenarındaki ESS'nin benimsenmesini teşvik etmeye devam edecektir. Çizelge 2.5'te iki farklı ESS entegrasyonu karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.5 : Enerji depolama sistemlerinin demiryolu altyapısına entegrasyonuna yönelik farklı yaklaşımların karşılaştırılması [47, 48].

Teknoloji	Artıları	Eksileri
Yol Boyu ESS	- Orta verimlilik	
	- Hat voltajı stabilizasyonu	
Yol Boyu ESS	- Ağırlık veya yer kısıtlaması yok	- Boyutlandırma ve konum için ince ayarlı trafik analizi
	- Uygulama ve bakım işlemi kesintiye uğratmaz	- Orta düzeyde altyapı maliyetleri
	- Yerleşik çözümlerle karşılaştırıldığında daha düşük güvenlik kısıtlamaları	- Pantograf seviyesinde yük azaltımı yok
	- Araç modifikasyon maliyeti yok	- Kablodan bağımsız çalışma imkanı yok
Araç Üstü ESS	- Yüksek verim	- Alan ve ağırlık kısıtlamaları
	- Katenersiz çalışma	- Araç maliyetlerinde artış
	- Hat voltajı stabilizasyonu ve yük dengeleme	- Aracın bakımı için sistemin durması
	- Altyapı maliyeti yok	- Artan güvenlik kısıtlamaları

2.3.3 Hibrit enerji depolama sistemleri

Demiryolu taşımacılığındaki Hibrit Enerji Depolama Sistemleri (HESS), birden fazla enerji depolama teknolojilerini birleştirerek, ilgili ESS türlerinin güçlü yönlerinden yararlanır ve enerji depolamaya yönelik esnek ve optimize edilmiş bir yaklaşım sağlar.

Bu entegrasyon, yüksek güç ve yüksek enerji taleplerini dengelemeyi, genel sistem verimliliğini, güvenilirliğini ve performansını artırmayı amaçlamaktadır. HESS, bataryalar, süper kapasitörler ve volanlar gibi teknolojileri birleştirerek modern raylı sistemlerin çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılayabilir. Bu bölümde HESS'in demiryolu taşımacılığındaki bileşenleri, faydaları, zorlukları ve gerçek dünyadaki uygulamaları incelenmektedir.

2.3.3.1 Hibrit enerji depolama sistemlerinin avantajları

Uzun süreli depolama için bataryaları ve hızlı enerji patlamaları için süper kapasitörleri veya volanları birleştirerek, HESS çeşitli demiryolu operasyonlarında enerji kullanımını optimize edebilir. Yeniden kullanılabilen frenleme enerjisini verimli bir şekilde yakalayıp depolayarak genel enerji tüketimini azaltır. HESS, talebin en yüksek olduğu dönemlerde güç sağlayabilir, ana güç şebekesindeki gerilimi azaltır ve raylı sistemin güvenilirliğini artırır. Süper kapasitörlerin ve volanların hızlı enerji salıverme kapasitesi, trenin hızlanmasını ve performansını artırır. Birden fazla enerji depolama bileşeni yedeklilik sağlayarak bir bileşen arızalansa bile güvenilir enerji beslemesi sağlar. HESS, gerektiğinde hem sabit güç hem de hızlı enerji patlamaları sağlayarak çeşitli operasyonel senaryolara uyum sağlayabilir. HESS, enerji kullanımını optimize ederek ve yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre ederek sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve sürdürülebilir demiryolu operasyonlarının desteklenmesine katkıda bulunur. HESS ile donatılmış elektrikli trenler genellikle dizel motorlu alternatiflerden daha sessizdir ve gürültü kirliliğini azaltır.

2.3.3.2 Hibrit enerji depolama sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları

Birden fazla enerji depolama teknolojisinin entegre edilmesi, uyumluluk ve optimum performansın sağlanması için gelişmiş tasarım ve mühendislik gerektirir. Farklı depolama bileşenleri arasındaki etkileşimi yönetmek ve enerji akışını optimize etmek için gelişmiş kontrol sistemleri gereklidir. HESS geliştirme ve uygulama maliyeti yüksek olabilir; bu maliyet, çeşitli depolama teknolojilerinin ve entegrasyon için gereken altyapının masraflarını da kapsar. HESS bileşenlerinin güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için düzenli bakım ve izleme gereklidir, bu da işletme maliyetlerini artırır. Bataryalar ve diğer bileşenlerdeki yüksek enerji yoğunlukları güvenlik riskleri oluşturur ve sağlam güvenlik protokolleri ve izleme sistemleri gerektirir. Birden fazla depolama teknolojisinin kullanılması ağırlık ekleyebilir ve yer

kaplayabilir; bu da potansiyel olarak tren performansını ve yolcu kapasitesini etkileyebilir.

2.3.3.3 Hibrit enerji depolama sistemlerinin dünyadaki uygulamaları

Bombardier'in "MITRAC" hibrit sistemi ve Japonya'nın "Bataryalı Elektrikli Çoklu Üniteleri" (BEMU) gerçek hayatta uygulamaya konulmuş hibrit enerji depolama sistemi örneklerinden bazılarıdır. Bu sistemler, verimli enerji depolama ve hızlı güç dağıtımını sağlamak, genel tren performansını artırmak ve emisyonları azaltmak için lityum iyon bataryaları süper kapasitörler veya volanlar ile birleştirir. Siemens'in hibrit enerji depolama çözümleriyle donatılmış Desiro ML trenleri de bir diğer HESS uygulamasına örnektir. Bu trenler, rejeneratif frenleme enerjisini yakalamak ve hızlanma sırasında güç sağlamak, enerji verimliliğini ve operasyonel güvenilirliği artırmak için bir batarya ve süper kapasitör kombinasyonu kullanır. Ayrıca, Almanya'daki Stuttgart S-Bahn, enerji akışını yönetmek ve yerel şebekeyi desteklemek için bataryalar ve süper kapasitörlerden oluşan hibrit bir sistem kullanmaktadır. Hibrit sistem, talebin düşük olduğu dönemlerde fazla enerjiyi depolar ve yoğun zamanlarda katener hattını besleyerek şebeke istikrarını artırır ve enerji maliyetlerini azaltır.

Hibrit Enerji Depolama Sistemleri, enerji yönetimine dengeli ve esnek bir yaklaşım sunarak demiryolu taşımacılığında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. HESS, çeşitli enerji depolama teknolojilerinin güçlü yönlerini birleştirerek enerji kullanımını optimize edebilir, operasyonel performansı iyileştirebilir ve raylı sistemlerin sürdürülebilirliğini geliştirebilir. Karmaşıklık, maliyet ve teknik entegrasyonla ilgili zorluklara rağmen HESS'in faydaları, onları demiryolu taşımacılığının geleceği için değerli bir yatırım haline getirmektedir. Bu alanda devam eden araştırma ve geliştirme, HESS'in benimsenmesini teşvik etmeye devam edecek ve daha verimli, güvenilir ve çevre dostu raylı sistemlerin yolunu açacaktır. Çizelge 2.6'da farklı hibritleşme türlerine sahip trenler verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Hibritleşme türüne göre sınıflandırılmış tren türleri.

Tren Tipi	Hibridizasyon	Örnek Trenler
EMU	Katener	Stadler CITYLINK tram, Siemens Mireo
BEMU	Katener, Batarya	Stadler FLIRT Akku, Siemens Mireo plus B
HMU	H ₂ yakıt hücresi, Batarya	Alstom Coradia iLint, Siemens Mireo plus H
HEMU	H ₂ yakıt hücresi, Batarya, Katener	Alstom Coradia polyvalent
DMU	Dizel motor	Stadler FLIRT DMU
EDMU	Dizel motor, Katener	Bombardier Diesel AGC, Stadler BTR 813 FLIRT
Hibrit DMU	Dizel motor, Katener	JR East NewEnergy train, RailPower Green Goat
Hibrit EDMU	Dizel motor, Katener, Batarya	UK için bataryalı tren Hitachi Eversholt intercity

3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİ KONUSUNDA TARTIŞMALAR

Enerji Depolama Sistemlerinin (ESS) demiryolu taşımacılığına entegrasyonu, optimum performans ve verimliliği sağlamak için çeşitli faktörlerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir. Kilit noktalar arasında uygun ESS teknolojilerinin seçimi, enerji taleplerini karşılayacak doğru boyutlandırma ve demiryolu altyapısına stratejik yerleştirme yer almaktadır. Bu bölüm, raylı ulaşım sistemlerinde ESS'nin seçilmesi, boyutlandırılması ve yerleştirilmesi için kapsamlı bir kılavuz sağlayarak bu kritik unsurları tartışmaktadır.

3.1 Enerji Depolama Sisteminin Seçimi

Doğru ESS teknolojisinin seçilmesi, raylı sistemin özel ihtiyaçlarının ve mevcut enerji depolama seçeneklerinin özelliklerinin değerlendirilmesini içerir. Seçim sürecinde enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, çevrim ömrü, şarj/deşarj oranları ve genel sistem maliyeti gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj özelliklerine sahiptir. Önemli miktarda enerji depolamanın ve verimli güç dağıtımının gerekli olduğu hem araç üstü hem de yol boyu uygulamaları için uygundur. Nikel-Metal Hidrit (NiMH) bataryalar sağlam performans, uzun çevrim ömrü ve iyi enerji-ağırlık oranına sahiptir. Hibrit trenler gibi tutarlı performans ve dayanıklılık gerektiren senaryolar için idealdir. Süper kapasitörler yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj/deşarj özellikleri ve uzun çevrim ömrü sunar. Hızlı enerji patlamalarının gerekli olduğu, sık duraklama ve kalkışların olduğu kentsel raylı ulaşım sistemleri için en uygundur. Volanlar yüksek güç yoğunluğu, hızlı enerji aktarımı ve sağlam performans özelliklerine sahiptir. Yüksek hızlı demiryolu sistemleri ve anında enerji kullanılabilirliği ve güç kaynağının stabilizasyonu gerektiren uygulamalar için uygundur.

3.2 Enerji Depolama Sisteminin Boyutlandırılması

Raylı sistemin enerji ve güç taleplerini verimli bir şekilde karşılamak için ESS'nin doğru boyutlandırılması çok önemlidir. Bu, belirli operasyonel ihtiyaçlara ve senaryolara göre gerekli enerji kapasitesinin (kWh) ve güç çıkışının (kW) belirlenmesini içerir. Enerji gereksinimleri bakımından rejeneratif frenleme olayları

sırasında geri kazanılabilecek enerji ve hızlanma için gereken enerjinin isabetli bir şekilde tahmin edilmesi gerekir. Operasyonel döngülerde farklı operasyon aşamalarındaki en yüksek ve ortalama güç talepleri de dahil olmak üzere trenlerin tipik görev döngüleri doğru analiz edilmelidir. Güç gereksinimleri konusunda hızlanma sırasında gereken en yüksek gücün ve frenleme sırasında geri kazanılabilecek maksimum gücün belirlenmesi gerekir. Yardımcı sistemleri (ör. aydınlatma, HVAC) desteklemek ve azami yükleri yönetmek için gereken güç miktarı değerlendirilmelidir. Kapasite tamponu olarak da adlandırılan enerji talebindeki beklenmeyen değişiklikleri hesaba katmak ve güvenilir çalışmayı sağlamak için enerji kapasitesine bir güvenlik marjı eklenmelidir. Kısmi sistem arızası durumunda çalışmaya devam edilmesini sağlamak için yedeklilik sağlamak üzere ek kapasite değerleri göz önünde bulundurulmalıdır.

3.3 Enerji Depolama Sisteminin Konumlandırılması

ESS'nin stratejik yerleştirilmesi, faydalarını en üst düzeye çıkarmak ve bunları demiryolu altyapısına etkili bir şekilde entegre etmek için önemlidir. Konumlandırma, enerji yakalama ve dağıtımını optimize etmeli, kayıpları azaltmalı ve operasyonel verimliliği desteklemelidir. Bu konuda araç üstü ve yol boyu enerji depolama sistemlerinin konumlandırılmasına yönelik bir karşılaştırma yapılabilir. Örneğin, araç üstü enerji depolama sistemlerinin en büyük avantajı tren sistemleriyle doğrudan entegrasyon, verimli enerji yakalama ve yeniden kullanma, hızlanma ve frenleme sırasında geliştirilmiş performans özellikleri sunmasıdır. Ancak bu durum bir takım zorlukları beraberinde getirmektedir. Trene ağırlık ve alan kısıtlamaları ekleyerek yolcu kapasitesini ve genel performansı potansiyel olarak olumsuz yönde etkileyebilir. Bir diğer konumlandırma seçeneği olan yol boyu enerji depolama sistemlerinin en büyük artıları; merkezi depolama, daha kolay bakım ve birden fazla treni destekleme yetenekleridir. Rejeneratif frenlemeden enerji elde etmek ve talebin en yüksek olduğu dönemlerde güç sağlamak için çok uygundur. Ancak eksileri arasında; trenler ve yol kenarındaki üniteler arasında enerji aktarımı için altyapı gerektirir ve aktarım sırasında potansiyel enerji kayıpları meydana gelir. Bu durumda stratejik yerleştirme büyük önem taşır. İstasyonlar ve terminallerin bulunduğu noktalar ön plandadır. ESS'nin, enerji talebinin yüksek olduğu ve rejeneratif frenlemenin etkili bir şekilde yakalanıp yeniden kullanılabildiği büyük istasyonlara ve terminallere kurulması gerekmektedir.

Katener hatları boyunca enerji akışını yönetmek, hızlanmayı desteklemek ve en yüksek elektriksel yükler sırasında güç kaynağını stabilize etmek için ESS, hattın önemli bölümlerine yerleştirilmelidir. Hat kesişim noktaları ve kavşaklar da konumlandırma seçenekleri arasında göz önünde bulundurulması gereken lokasyonlardır. ESS, trenlerin sıklıkla yavaşladığı ve hızlandığı kritik kavşaklara ve hat kesişim noktalarına konumlandırılarak enerji geri kazanımını ve dağıtım verimliliği en üst düzeye çıkarılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonunda güneş ve rüzgar enerjisi ilk sırada gelmektedir. Sürdürülebilirliği artırmak ve harici enerji şebekelerine bağımlılığı azaltmak için ESS'yi istasyon çatılarına kurulan güneş panelleri veya hat boyunca rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre etmek düşünülmeli gereken seçeneklerden bir tanesidir. Uzun vadeli depolamayı hızlı enerji patlamalarıyla dengelemek ve genel sistem performansını optimize etmek için farklı ESS teknolojileri (ör. bataryalar ve süper kapasitörler) hibrit konfigürasyonlarda birleştirilebilir.

Enerji depolama sistemlerinin demiryolu taşımacılığına başarılı entegrasyonu dikkatli seçime, doğru boyutlandırmaya ve stratejik konuma bağlıdır. Belirli operasyonel ihtiyaçlara göre uygun ESS teknolojilerini seçerek, bunları enerji ve güç taleplerini karşılayacak şekilde doğru şekilde boyutlandırarak ve bunları demiryolu altyapısına stratejik olarak yerleştirerek raylı sistemler, enerji verimliliği, operasyonel performans ve çevresel sürdürülebilirlik konularında önemli iyileştirmeler sağlayabilir. Bu alanda devam eden araştırma ve geliştirmeler, bu süreçleri iyileştirmeye devam edecek ve daha verimli ve güvenilir raylı ulaşım sistemlerinin önünü açacaktır.

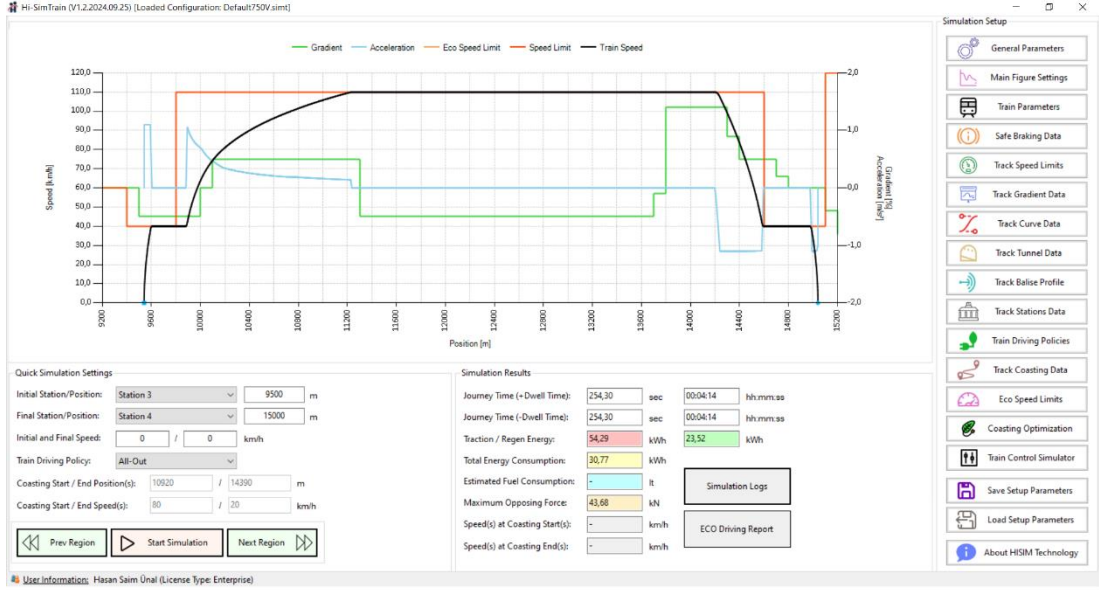


Şekil 4.1'deki diyagram, güç kaynağına entegre edilmiş yol boyu batarya enerji depolama sistemleri (BESS) ile bir metro hattının DC gerilim şebekesini göstermektedir. Ana Hat trenlere güç sağlarken, BESS üniteleri öncelikle rejeneratif frenlemeden gelen enerjiyi depolar. DC/DC dönüştürücü yol boyu enerji depolama sistemi (WESS) ile metro hattının DC güç şebekesi arasındaki enerji akışını düzenler. Depolama sistemleri metrodan farklı gerilimlerde çalışabileceğinden, BESS ile şebeke arasındaki uyumluluğu sağlamak için DC/DC dönüştürücü gerilim seviyelerini ayarlar. Topraklama sembolleri ve kesiciler, elektriksel izolasyon ve güvenlik mekanizmalarını gösterir. Genel olarak raylı ulaşım sistemlerinde yol boyu BESS entegrasyonu, pik enerji talebini azaltmakta, enerji verimliliğini ve ağ kararlılığını artırmaktadır.

4.1 Hi-SimTrain Raylı Sistem Simülasyon Programı

Hi-SimTrain bir raylı sistem simülasyon programıdır. Kullanıcıların tasarımı ve işletme koşullarını doğrulamak ve optimize etmek için sistemin yüksek ayrıntılı ve esneklikte modellenmesine ve simüle etmesine olanak tanır. Cer gücü sistemi, tren işletme sıklığı analizi, tren hareketi ve enerji verimliliği çalışmaları için tutarlı çıktılar sağlayabilen bir programdır.

HI-SIM Teknoloji Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti. tarafından geliştirilen Hi-SimTrain simülasyon programı, Türkiye'deki çeşitli demiryolu hatlarında yolcu konforu ve güvenliğini en yüksek seviyede sağlarken tren işletme maliyetlerini minimuma indirmek amacıyla kullanılmaktadır. Simülasyon çalışmaları, HI-SIM tarafından akademik amaçlı lisans kullanım hakkı verilerek gerçekleştirilmiştir [49, 50, 51, 52, 53]. Şekil 4.2'de Hi-SimTrain simülasyon programının arayüzüne bir örnek verilmiştir.



Şekil 4.2 : Hi-SimTrain arayüzüne bir örnek.

4.2 Metro Aracına Ait Verilerin Girilmesi

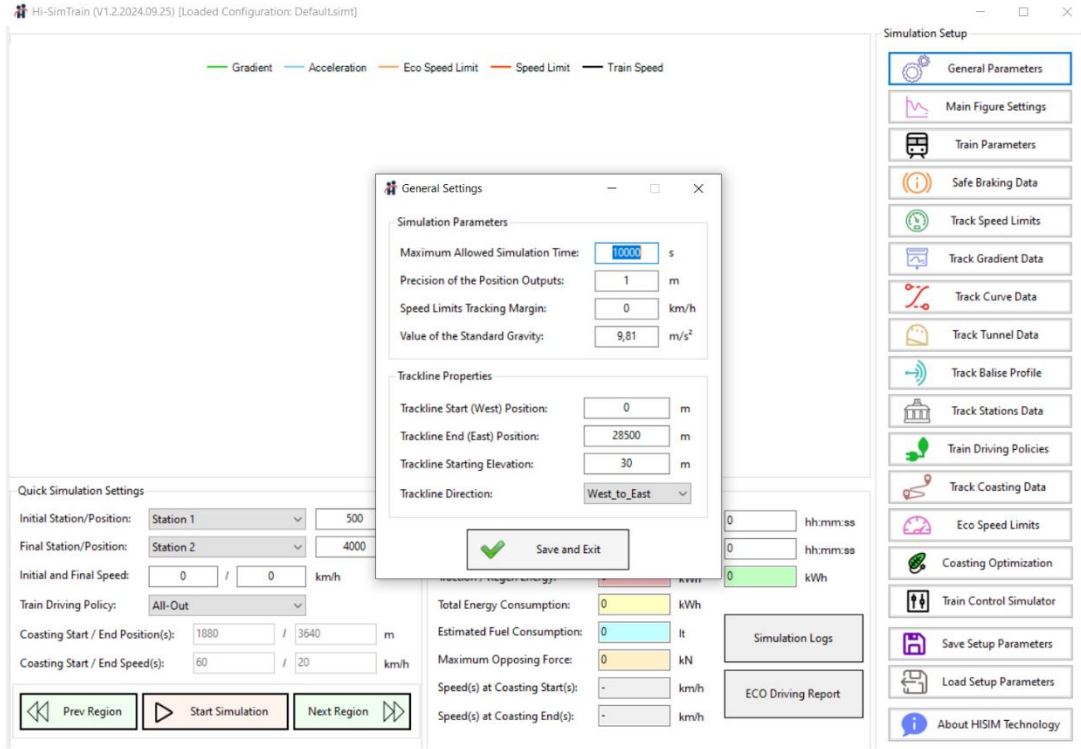
Yapılan simülasyon çalışmasında kullanılan metro aracına ilişkin temel parametreler aşağıda verilen Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 : Metro aracının temel özellikleri.

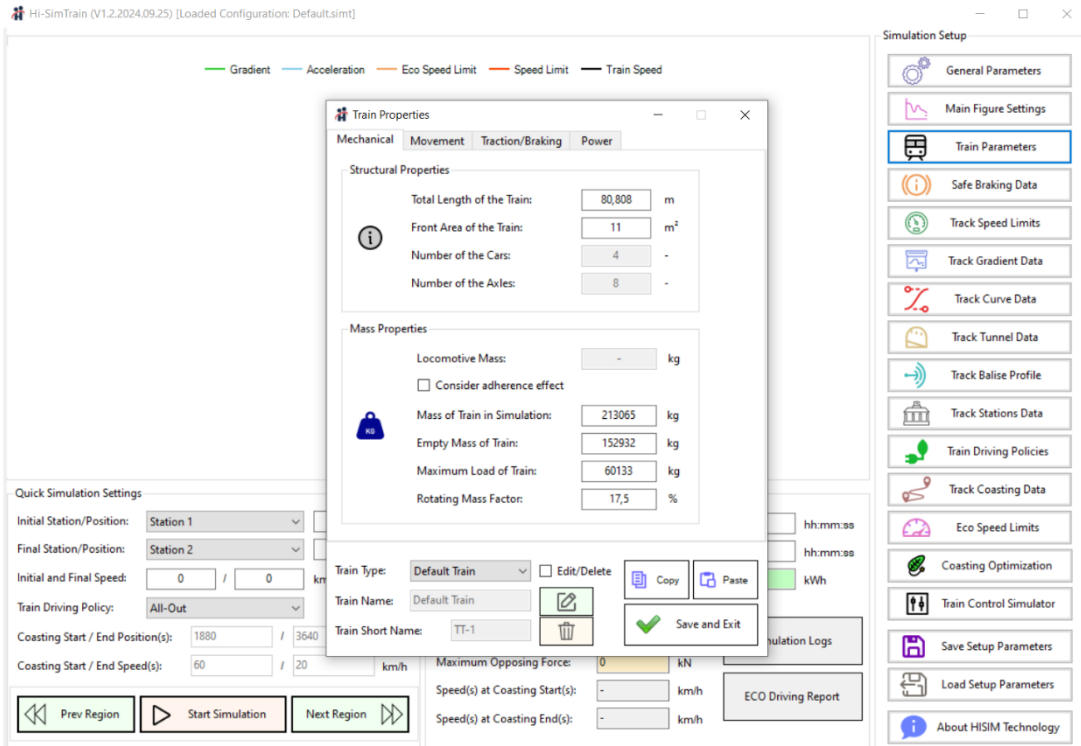
Metro Aracının Özellikleri	Değerler
Maksimum Hız (km/sa)	120
Maksimum İvmelenme (m/s^2)	1,1
Maksimum Frenleme İvmesi (m/s^2)	1,1
Jerk Limit (m/s^3)	1
Boş kütle (kg)	152932
Yük kütlesi (kg)	213065
Döner Kütle Oranı (%)	17,5
Uzunluk (m)	80,808
Ön Yüz Alanı (m^2)	11
Maksimum İşletme Gerilimi (V)	900
Minimum İşletme Gerilimi (V)	500
Frenlemede Maksimum Gerilim (V)	900

Raylı sistem simülasyon tabanlı çalışmalarda en önemli nokta, analizi yapılacak tren hattının ve aracının parametrelerinin doğru ve eksiksiz bir şekilde programa girilmesidir. Bu bağlamda genel simülasyon parametreleri ve simüle edilen metro

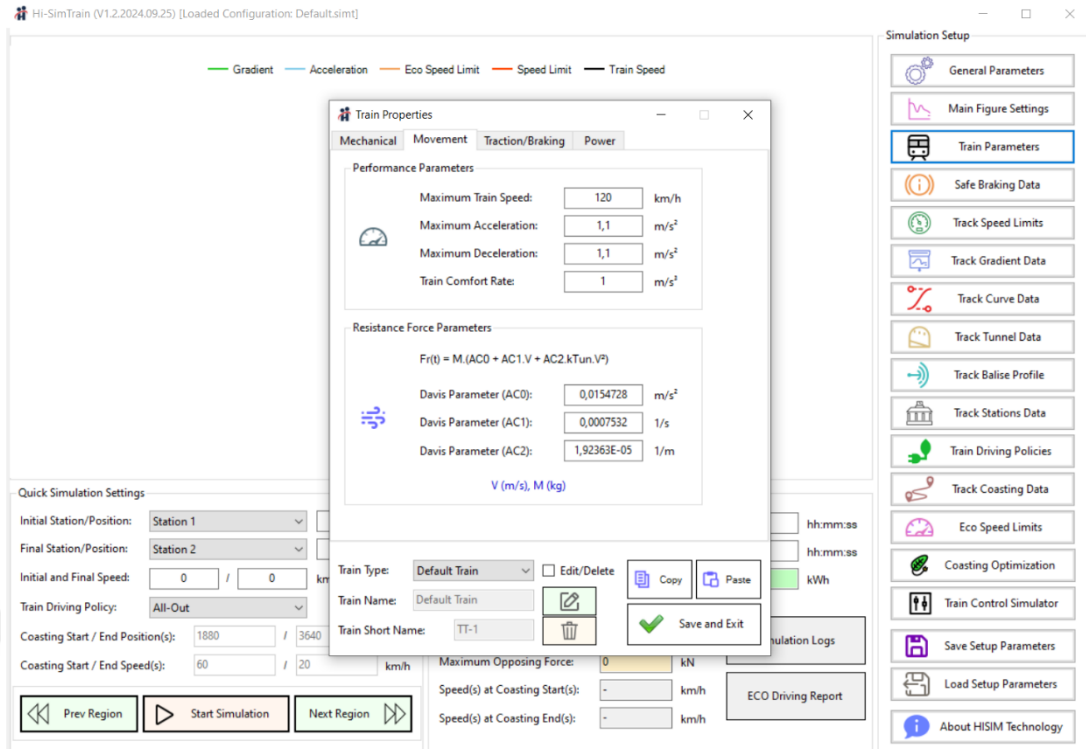
aracına ait temel parametreler aşağıda sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilen program arayüzünde olduğu gibi girilmiştir.



Şekil 4.3 : Simülasyon parametrelerinin programa girilmesi.

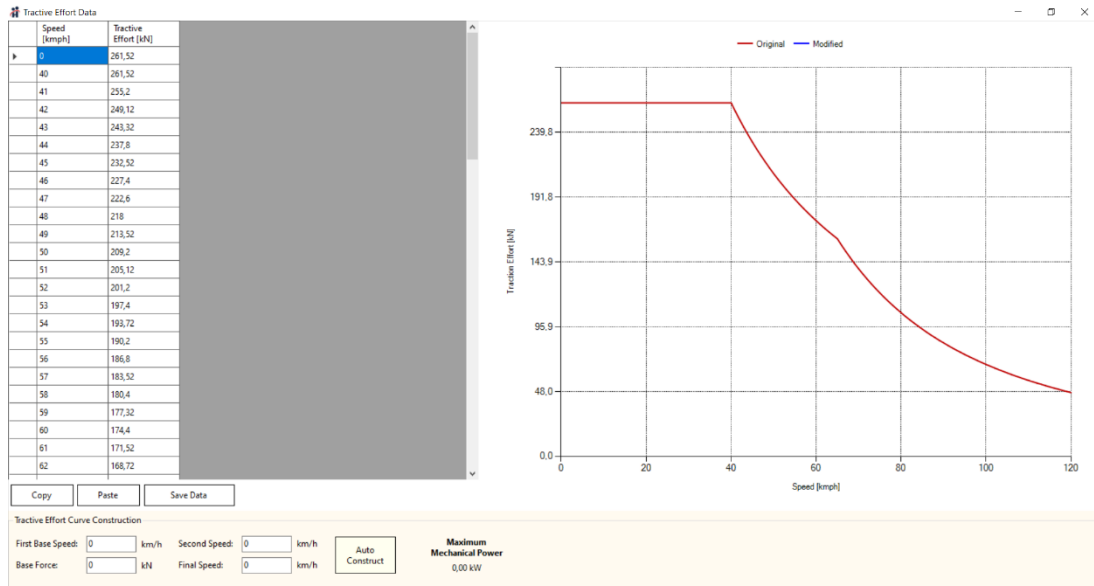


Şekil 4.4 : Metro aracının mekanik parametrelerinin programa girilmesi.

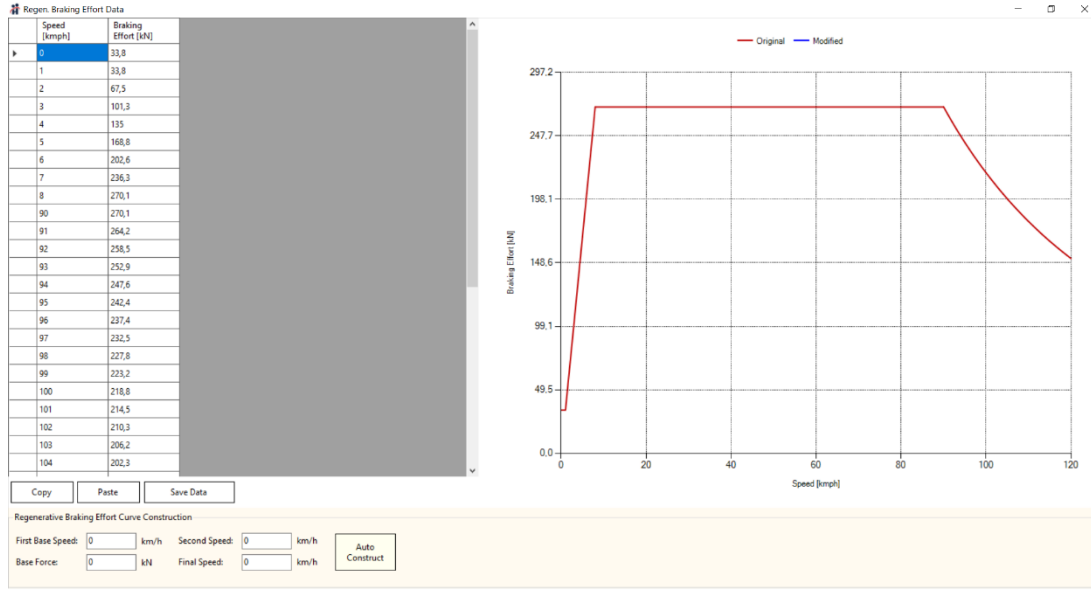


Şekil 4.5 : Metro aracının hareket parametrelerinin programa girilmesi.

Simülasyonlarda kullanılan metro aracının 700 VDC gerilim altındaki cer kuvveti ve dinamik frenleme kuvvetlerinin parametreleri aşağıda sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilen program arayüzünde olduğu gibi girilmiştir.



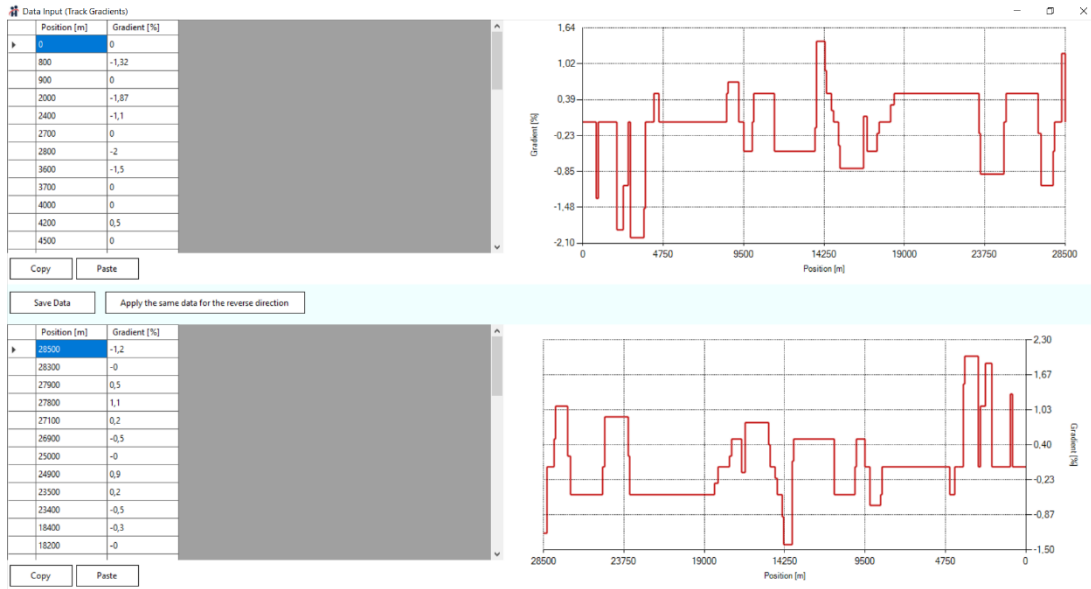
Şekil 4.6 : Araç cer kuvveti (kN) – hız diyagramı (km/sa).



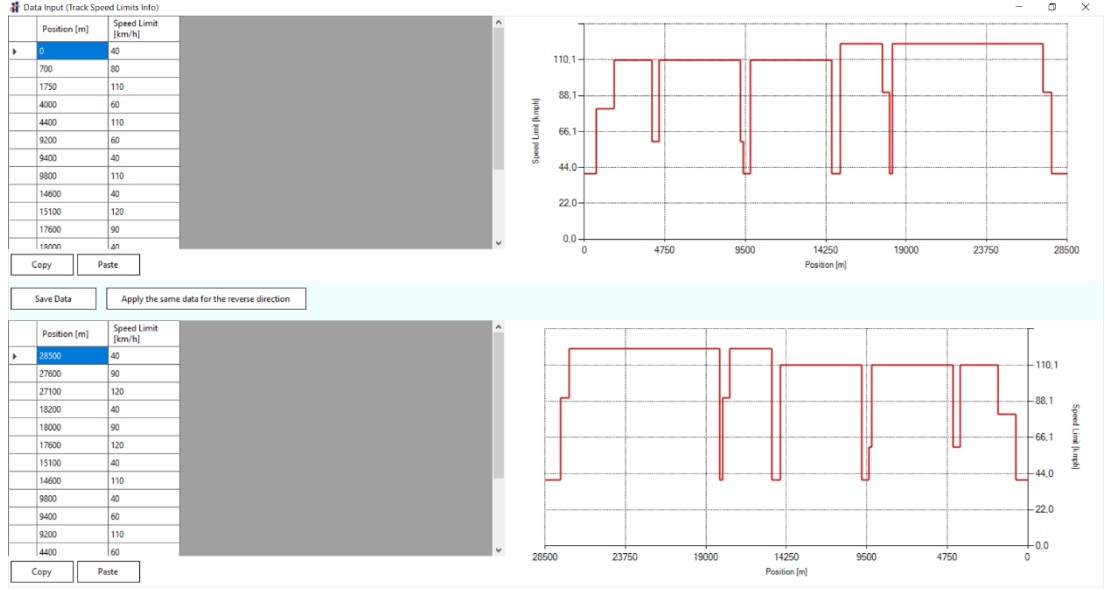
Şekil 4.7 : Araç dinamik fren kuvveti (kN) – hız diyagramı (km/sa).

4.3 Tren Hattına Ait Verilerin Girilmesi

Yapılan simülasyon çalışmasında kullanılan tren hattının eğim bilgileri ve hız sınırlamalarına ilişkin parametreler aşağıda sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilen program arayüzünde olduğu gibi girilmiştir.



Şekil 4.8 : Tren hattının eğim (%) – konum (m) grafiği.



Şekil 4.9 : Trenin hız (km/sa) – konum (m) sınırlamaları.

4.4 Tren İstasyonlarına Ait Verilerin Girilmesi

Tren hattındaki istasyonların konumları ve seyahat sürelerinin bilgileri aşağıda Çizelge 4.2’de verilmiştir. İstasyonlara yaklaşım ve uzaklaşma hız sınırlaması 40 km/sa olarak girilmiştir.

Çizelge 4.2 : İstasyon parametreleri.

İstasyonlar	Başlangıç (m)	Bitiş (m)	Seyahat Süreleri (dk)	
			Min.	Maks.
İstasyon 1	445	555	0	0
İstasyon 2	3945	4055	3	4
İstasyon 3	9445	9555	4	5
İstasyon 4	14945	15055	5	6
İstasyon 5	17945	18055	3	4
İstasyon 6	27945	28055	7	8

Yapılan simülasyon çalışmasında kullanılan tren hattındaki istasyonların bilgilerine ilişkin parametreler aşağıda Şekil 4.10’da verilen program arayüzünde olduğu gibi girilmiştir.

Data Input (Stations Info)

Name	Short Name	Direction	Start Position [m]	End Position [m]	Berthing Location [m]	Minimum Journey Time [min]	Natural Journey Time [min]	Dwell Time [s]
Station 1	st1	West_to_East	445	555	500	0	0	60
Station 2	st2	West_to_East	3945	4055	4000	3	4	60
Station 3	st3	West_to_East	9445	9555	9500	4	5	60
Station 4	st4	West_to_East	14945	15055	15000	5	6	60
Station 5	st5	West_to_East	17945	18055	18000	3	4	60
Station 6	st6	West_to_East	27945	28055	28000	7	8	60

Copy

Paste

Save Data

Apply the same data for the reverse direction

Name	Short Name	Direction	Start Position [m]	End Position [m]	Berthing Location [m]	Minimum Journey Time [min]	Natural Journey Time [min]	Dwell Time [s]
Station 6	st6	East_to_West	28055	27945	28000	0	0	0
Station 5	st5	East_to_West	18055	17945	18000	7	8	60
Station 4	st4	East_to_West	15055	14945	15000	3	4	60
Station 3	st3	East_to_West	9555	9445	9500	5	6	60
Station 2	st2	East_to_West	4055	3945	4000	4	5	60
Station 1	st1	East_to_West	555	445	500	3	4	60

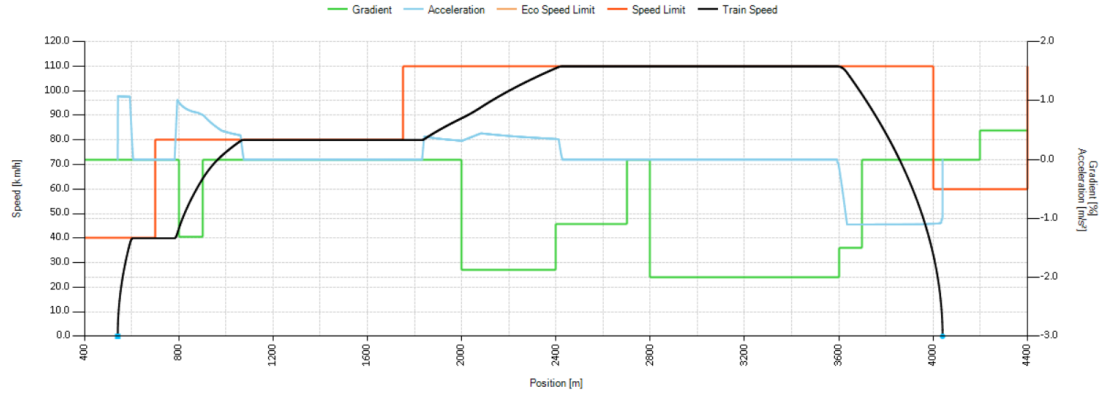
Copy

Paste

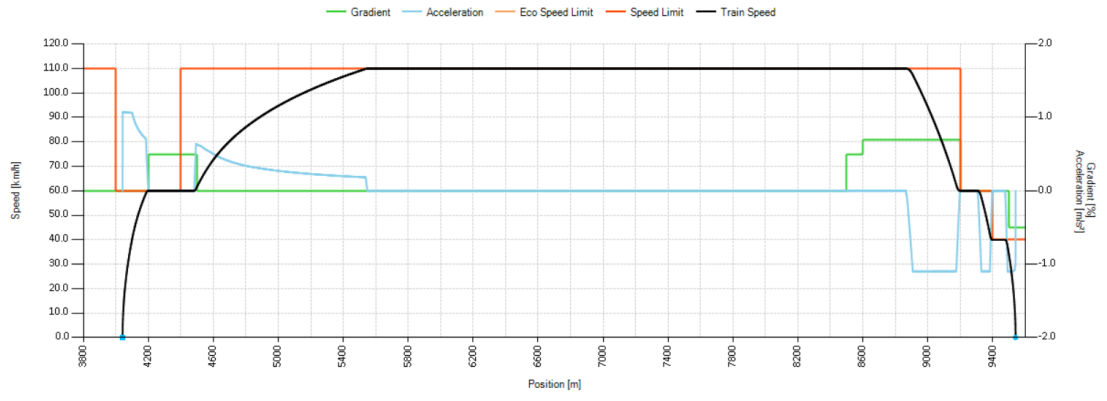
Şekil 4.10 : İstasyon parametrelerinin programa girilmesi.

4.5 Raylı Sistem Simülasyon Sonuçları

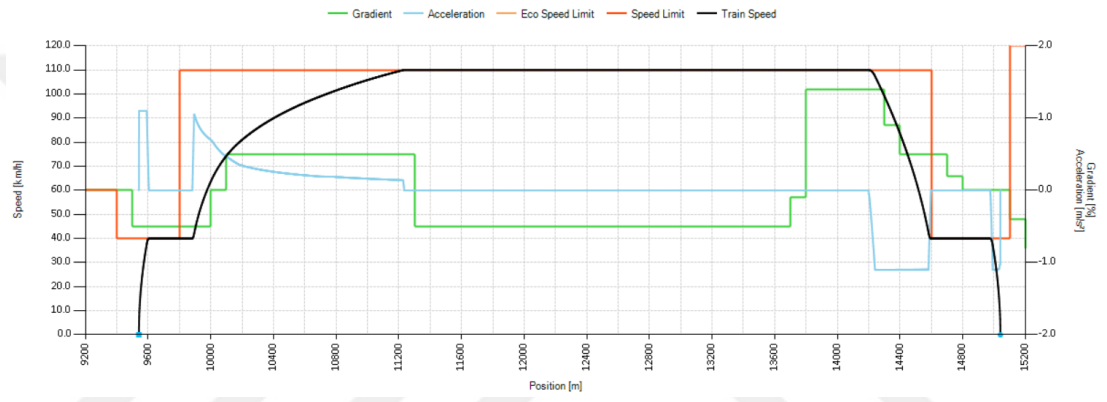
Aşağıda sırasıyla İstasyon 1’den başlayarak İstasyon 6’ya kadar tam güç modunda çalışan trenin simülasyon sonuçlarının grafikleri verilmiştir.



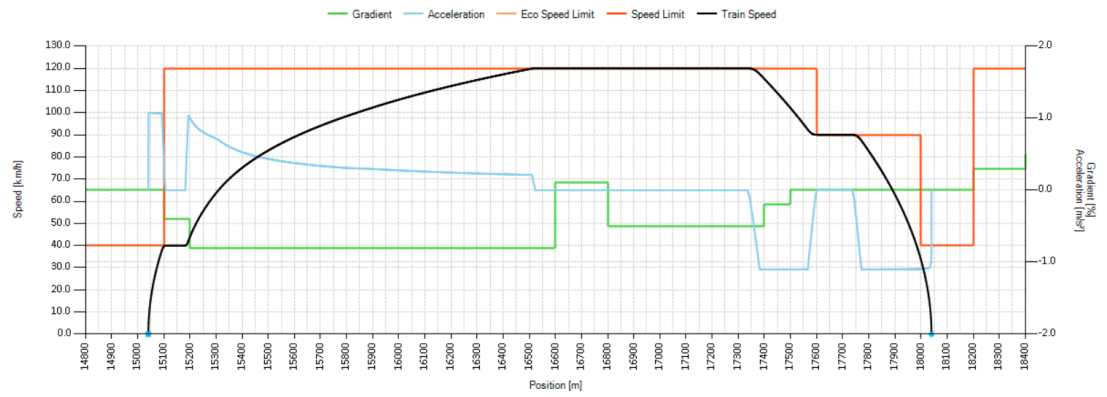
Şekil 4.11 : İstasyon 1 ile İstasyon 2 arası tren hattının tam güç modunda çalışması (Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).



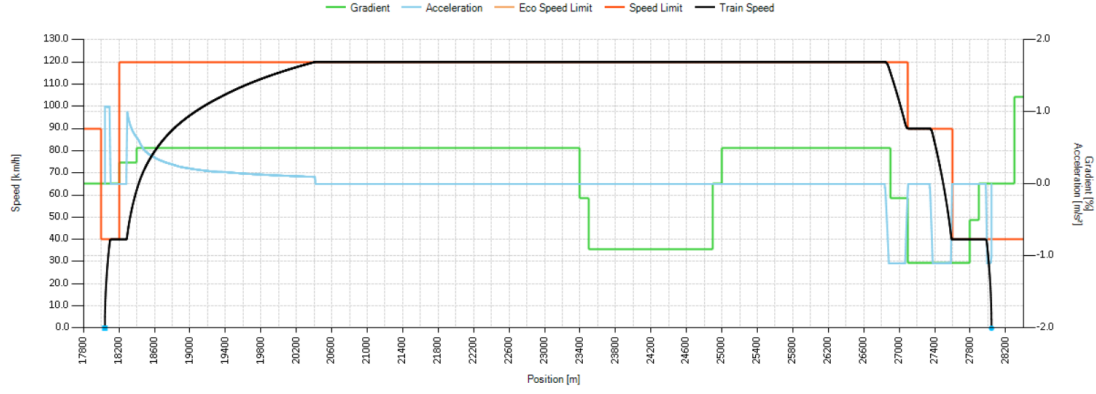
Şekil 4.12 : İstasyon 2 ile İstasyon 3 arası tren hattının tam güç modunda çalışması
(Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).



Şekil 4.13 : İstasyon 3 ile İstasyon 4 arası tren hattının tam güç modunda çalışması
(Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).



Şekil 4.14 : İstasyon 4 ile İstasyon 5 arası tren hattının tam güç modunda çalışması
(Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).



Şekil 4.15 : İstasyon 5 ile İstasyon 6 arası tren hattının tam güç modunda çalışması
(Siyah: Tren hızı, Kırmızı: Hız sınırı, Yeşil: Eğim).

Tren simülasyon sonuçlarının grafiklerinde ortaya çıkan cer enerjisi, trenin frenlediği bölgelerde elde edilen rejeneratif enerji ve toplam tüketilen enerji değerleri tüm istasyon bölgeleri için aşağıda Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3 : Tam güç modunda çalışan trenin simülasyon sonuçları.

İstasyon Bölgeleri	Cer Enerjisi (kWh)	Rejeneratif Enerji (kWh)	Tüketilen Enerji (kWh)
İstasyon 1-2	36,81	30,83	5,99
İstasyon 2-3	57,63	23,70	33,94
İstasyon 3-4	54,29	23,52	30,77
İstasyon 4-5	43,79	27,83	15,96
İstasyon 5-6	98,22	31,95	66,28

İstasyon 1 ile İstasyon 6 arasındaki tren hattı için tam güç modunda simüle edilen trenin seyahat süreleri aşağıda Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Tam güç modunda simüle edilen trenin seyahat süreleri.

İstasyon Bölgeleri	Minimum Seyahat Süreleri (dk:s)	Simülasyon Seyahat Süreleri (dk:s)	İstasyon Bekleme Süreleri (dk:s)
İstasyon 1-2	03:00	02:48	01:00
İstasyon 2-3	04:00	03:52	01:00
İstasyon 3-4	05:00	04:14	01:00
İstasyon 4-5	03:00	02:15	01:00
İstasyon 5-6	07:00	06:19	01:00
Toplam	22:00	19:30	05:00

Raylı ulaşım sistemlerinde alıcılık (receptivity), elektrik altyapısının trenler tarafından üretilen rejeneratif frenleme enerjisini absorbe etme ve kullanma yeteneğini ifade eder. Bir tren yavaşladığında ve rejeneratif frenleme uyguladığında, motor jeneratör görevi görerek elektrik üretir. "Alıcılık" terimi, elektrik şebekesi veya herhangi bir enerji depolama sistemi (bataryalar gibi) dahil olmak üzere raylı ulaşım sisteminin bu enerjiyi ne kadar iyi barındırabildiğini gösterir.

İstasyon bölgeleri için elde edilen simülasyon sonuçlarına göre raylı ulaşım sistemlerinde batarya enerji depolama sistemlerinin (BESS) optimum konumlandırılmasına yönelik modelin amacı, olası rejeneratif frenleme enerjisini maksimum seviyede yakalamak ve depolamak için bir tren hattı boyunca BESS'lerin optimum konumunu ve sayısını belirlemektir. Bu modelde, metro hattının eğim değerleri, elde edilen rejeneratif enerji miktarları, tren sefer sıklığı ve raylı ulaşım sisteminin alıcılık (receptivity) değeri gibi çeşitli faktörler dikkate alınacaktır.

Modelin geliştirilme adımlarından ilki tren hattı segmenti kategorizasyonudur. Tren hattı, eğim yerleri kategorize edilerek segmentlere ayrılır. Önemli eğim yerlerine sahip tren hattı bölümleri farklı frenleme karakteristiklerine ve enerji potansiyeline sahip olacaktır. Frenleme genellikle istasyonlardan önce gerçekleşir. Bu nedenle, Şekil 4.11'den 4.15'e kadar olan grafiklerden frenlemenin başladığı konumlara bataryaları yerleştirmek üretilen enerjinin yakalanabilmesi için avantajlı olacaktır.

Bir diğer adım ise simülasyon verilerini kullanarak her segmentte üretilen rejeneratif enerjinin (E_{regen}) ölçülmesidir. Bu, trenin hız değişimine (Δv), tren hattının düşey yükseklik değişimine (Δh), trenin kütlesine, tren hattının direnimine ve eğimine bağlıdır. İstasyonlardan önce ve negatif eğim yerlerinde yani hattın yokuş aşağı bölümlerinde daha fazla frenleme meydana gelir, bu durum rejeneratif enerji yakalama için ideal hale getirir. Aşağıda denklem 4.1'deki gibi tanımlanır:

$$E_{regen} = f(\Delta v, \Delta h, \text{kütle}, \text{direnim}, \text{eğim}) \quad (4.1)$$

Sonraki adımda simülasyon verilerine ve tren işletme programına dayanarak, farklı tren sefer sıklığı süreleri boyunca zaman periyodu başına (örneğin, saat başına) ne kadar enerji üretildiği belirlenir. Her BESS'nin ne kadar rejeneratif enerji depolayabileceğini ($E_{depolanan}$) hesaplamak için bataryanın kapasitesi ve verimi göz

önünde bulundurulur. Depolanan enerji denklem 4.2’de verilmiştir. Segment başına toplam rejeneratif enerjiye dayanarak, gereken batarya takımının sayısı belirlenir.

$$E_{\text{depolanan}} = \text{Batarya Kapasitesi} \times \text{Verim} \quad (4.2)$$

Aşağıda bu modelde dikkate alınan batarya takımının özellikleri ve tren işletme programı sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Batarya takımının temel özellikleri.

Batarya (LFP hücre bazlı)	Değerler
Hücre sayısı	190
Nominal hücre voltajı (V)	3,2
Nominal voltaj (V)	608
Nominal kapasite (Ah)	160
Nominal kapasitesine (Cn) göre birim başına (p.u.) tepe akımı (A/Ah)	6
Nominal enerji (kWh)	97,3
Hücre kütlesi (kg)	5,6
Batarya takımı kütlesi (kg)	1277

Çizelge 4.6 : Tren işletme programı.

İşletme Programı	Başlangıç Saati	Sonlanma Saati	Trenler Arası Süre (s)
İş Günü	06.00	07.00	480
	07.00	09.00	220
	09.00	16.10	450
	16.10	20.00	300
	20.00	00.20	520
Cumartesi	06.00	07.10	540
	07.10	20.10	360
	20.10	00.20	520
Pazar	06.00	07.20	560
	07.20	18.45	480
	18.45	00.20	560

Metro hattında çalışan tren filolarının sayısı, üretilen rejeneratif enerji miktarı ve raylı ulaşım sisteminin alıcılığının belirlenebilmesi için Çizelge 4.6’da verilen tren işletme programı göz önünde bulundurulmalıdır. Tren filosu operasyonu ve aktif tren sayısı günün farklı zaman dilimleri için tren sefer sıklığına göre tanımlanır. Örneğin, 07:00 ile 09:00 arasındaki yoğun saatlerde 220 saniyedir. Diğer zaman dilimlerinde tren sefer sıklığı 220 ile 560 saniye arasında değişmektedir. Aynı anda çalışan tren filosu

sayısının bulunabilmesi için Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.6’da verilen hattın toplam seyahat süreleri ve sefer sıklığı süreleri kullanılabilir. Buradan hareketle:

- Toplam Yolculuk Süresi (İstasyon 1'den İstasyon 6'ya): 19 dakika 30 saniye (1170 saniyedir).

- Yoğun saatler (220 sn sefer sıklığı) için tren sayısı (N_{tren}) denklem 4.3’te verilmiştir:

$$N_{tren} = \frac{\text{Toplam Seyahat Süresi}}{\text{Tren Sefer Sıklığı}} = \frac{1170}{220} \approx 5,3 \quad (4.3)$$

Buna göre, yoğun saatlerde yaklaşık 5 tren aynı anda rayda olacaktır. Herhangi bir t anında kaç tane trenin aynı anda frenleme ve ivmelenme yaptığını hesaplamak için Çizelge 4.3 ve 4.4 yani enerji tablosu ve istasyonlar arasındaki yolculuk süreleri incelendiğinde her segment için trenler ivmelenme, seyir ve frenleme aşamalarından geçtiği görülmektedir. Frenleme ve ivmelenme evrelerinin her segment için toplam seyahat süresini kabaca eşit olarak böldüğü ve 5 trenin yoğun saatlerde sürekli çalıştığı varsayılırsa, en az 2 ya da 3 tren ivmelenirken aynı anda diğer 2 ya da 3 tren frenleme yapıyor denilebilir.

Bununla birlikte, raylı ulaşım sisteminin alıcılığı (R_{sistem}) ise rejeneratif frenleme enerjisinin sistemdeki diğer trenler tarafından ne kadar etkili bir şekilde kullanılabileceğini ifade ettiğinden denklem 4.4’te olduğu gibi tanımlanır:

$$R_{sistem} = \frac{\text{Diğer Trenlerden Gelen Enerji Talebi}}{\text{Rejeneratif Frenlemeyle Üretilen Enerji}} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.3’te verilen simülasyon sonuçlarından, istasyon 1 ile istasyon 6 arası toplam cer enerji tüketimi tüm hat için yaklaşık 290,74 kWh’dir. Bu değerin bazı kısımları rejeneratif enerji olmalıdır. Çizelge 4.3’te her istasyon bölgesi için verilen rejeneratif enerji değerlerinden bunların toplamı da yaklaşık 137,8 kWh’dir. Bu durumda, rejenerasyon enerjisi cer enerjisinin yaklaşık %47,4’ünü oluşturmaktadır. Çizelge 4.3’te verildiği gibi tüketilen net enerji miktarlarının toplam 152,94 kWh olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre bu değerler göz önünde bulundurularak raylı ulaşım sistemin alıcılığı hesaplanırken fren yapan her trenin, o segmentte kullanılan toplam

enerjinin %47,4'ünü rejenere ettiği söylenebilir. Tren hattında 5 tren çalışırken, en az 2 trenin fren yapması muhtemeldir ve bu da potansiyel bir rejeneratif enerji birikimi sağlar. Sistem, tüm rejeneratif enerjiyi anında hızlanan trenlere aktarabilirse, ideal durumda alıcılık 1'e yakın olabilir. Ancak trenler arası zamanlamadaki uyumsuzluklar nedeniyle, alıcılık iyi optimize edilmiş sistemlerde yaklaşık 0,7 olma eğilimindedir. Bu da frenleme enerjisinin yaklaşık %70'inin diğer trenler tarafından kullanılabilceği anlamına gelir. Diğer trenler tarafından kullanılamayan fazla rejeneratif enerji de, sabit batarya takımlarında depolanır. Çizelge 4.5'de verilen bilgilerden batarya takımı fazla rejeneratif enerji depolayabilir. Örneğin sistemin alıcılığı 0,7 ise, frenleme enerjisinin %30'u bataryalarda depolanabilir. Bu bilgilerden yola çıkarak:

- İstasyon 1-2 segmenti için üretilen rejeneratif enerji Çizelge 4.3'te verildiği üzere 30,83 kWh'dir. Kentsel raylı sistemin alıcılığı 0,7 olduğundan fren enerjisi fazlası yani %30'u trenler tarafından kullanılmayan enerji $30,83 \times 0,30 = 9,25$ kWh'dir. Bu enerji batarya takımında depolanabilir enerjidir.

Çizelge 4.6'da verilen tren işletme programına göre iş günleri boyunca tren hattında çalışan günlük tren sayısı, günlük elde edilen rejeneratif enerji miktarı, bu enerjinin kullanılmayan kısmının depolanacağı batarya takımının sayısı ve optimum konumunun belirlenebilmesi için birincil olarak tren sefer sıklığı göz önünde bulundurulmalıdır. Yoğun saatlerde 07.00 ile 09.00 arasında 220 saniye sefer sıklığında trenler işletilmektedir. Diğer saatlerde bu değer 220 ile 560 saniye arasında değişmektedir. Günlük tren çalışma saati sabah 06.00'dan gece yarısı 00.20'ye kadar yaklaşık 18 saattir. Yoğun saatler 07.00 ile 09.00 arası olan 2 saatlik dilimdir. Hesabın sadeleştirilmesi açısından günün geri kalanında sefer sıklığı ortalama 300 saniye alınır:

- Yoğun saatlerde saat başına tren sayısı (07.00-09.00 arası 220 sn sefer sıklığı) = $3600 \div 220 = 16,36$ tren/saat.

- Günün geri kalanında saat başına tren sayısı = $3600 \div 300 = 12$ tren/saat.

- Yoğun saatlerde bir günde toplam tren sayısı = $16,36 \times 2 = 32,72 \approx 33$ tren/saat.

- Günün geri kalanında bir günde toplam tren sayısı (18 saat – 2 saat) = $12 \times 16 = 192$ tren/saat.

Dolayısıyla, tren hattı üzerinde günde işletilen toplam tren sayısı yaklaşık olarak şöyledir:

- Toplam tren/gün = 33 tren/gün + 192 tren/gün = 225 tren/gün bulunur.

Çizelge 4.3'teki simülasyon sonuçlarına göre her segment için rejeneratif enerji sağlanmaktadır. Tren başına toplam rejeneratif enerji, her segment için rejenerasyon enerjisi değerlerinin toplanmasıyla hesaplanabilir. Bu değer ise daha önce hesaplandığı gibi 137,8 kWh'dir. Böylece hat üzerinde çalışan tüm trenlerin günlük rejeneratif enerjisi $137,8 \text{ kWh} \times 225 \text{ tren} = 31,011.75 \text{ kWh}$ 'dir. Kentsel raylı sistemin 0,7'lik bir alıcılık değeri olduğu düşünülürse, diğer trenlere aktarılan günlük rejeneratif enerji miktarı $31,011.75 \times 0,7 = 21,708.23 \text{ kWh}$ 'dir. Dolayısıyla batarya takımlarında depolanan enerji 9,303.53 kWh'dir. Her bir segment için gereken batarya takımı sayısının belirlenebilmesi için örnek olarak İstasyon 1-2 ele alınırsa:

- Çizelge 4.3'ten bu segmentin rejeneratif enerjisi 30,83 kWh'dir. Bu değer günlük olarak hesaplanırsa, hatta işletilen tren sayısı 225 tren/gün'dür. Toplam üretilen günlük rejeneratif enerji bu iki değerın çarpımı olacaktır. Yani 6,936.75 kWh'dir. Sistemin alıcılığı 0,7 olduğundan diğer trenlere aktarılan enerji 4,855.73 kWh olacaktır. Geriye kalan enerji miktarı ise 2,081.03 kWh'dir. Bu değer bataryalara depolanan enerjidir. Bataryaların nominal kapasitesinin %90 verimle çalıştığı düşünülürse Çizelge 4.5'ten bu kapasite değeri 87,57 kWh olur. Yani gereken toplam batarya takımı sayısı yaklaşık 24 olacaktır. Her bir segment için bu hesaplamalar tekrar edilerek elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 4.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.7 : Her bir segmentte konumlandırılan BESS'ler.

Segment	Transfer Edilen Enerji (kWh)	Depolanan Enerji (kWh)	Gereken Batarya Sayısı	Batarya Konumu (m)
İstasyon 1-2	4,855.73	2,081.83	24	3600
İstasyon 2-3	3,732.75	1,599.75	18	8900
İstasyon 3-4	3,704.40	1,587.60	18	14200
İstasyon 4-5	4,383.23	1,878.53	21	17350
İstasyon 5-6	5,032.13	2,156.63	25	26650



5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNİN EKONOMİK VE ÇEVRESEL HUSUSLARI

Enerji Depolama Sistemlerinin (ESS) demiryolu taşımacılığına entegrasyonu, enerji verimliliğinin artırılması, işletme maliyetlerinin azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, ESS teknolojilerinin benimsenmesi, dikkatle değerlendirilmesi gereken çeşitli ekonomik ve çevresel hususları içermektedir. Bu bölüm, demiryolu taşımacılığında kullanılan farklı ESS teknolojileriyle ilgili maliyet etkilerine, yatırım getirisine, çevresel faydalara ve potansiyel zorluklara odaklanarak bu hususların kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır.

5.1 Ekonomik Hususlar

Farklı ESS teknolojilerinin başlangıç maliyetleri önemli ölçüde farklılık gösterir. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları ve verimlilikleri nedeniyle daha pahalı olma eğilimindeyken, süper kapasitörler ve volanlar daha düşük başlangıç maliyetlerine ancak farklı performans özelliklerine sahip olabilir. ESS'nin mevcut demiryolu altyapısına entegre edilmesi, güç dönüşüm sistemleri, kontrol sistemleri ve güvenlik önlemleri gibi destekleyici teknolojilere ek yatırımlar yapılmasını gerektirir. Yol boyu ESS ayrıca raylar boyunca veya istasyonlarda yeni kurulumlar gerektirebilir. Farklı ESS teknolojilerinin farklı bakım ihtiyaçları vardır. Örneğin, lityum iyon bataryalar periyodik izleme ve hücrelerin potansiyel olarak değiştirilmesini gerektirirken, süper kapasitörler ve volanlar daha az sıklıkta ancak özel bakıma ihtiyaç duyabilir. Bakım, değiştirme ve olası teknolojik yükseltmeler de dahil olmak üzere ESS'nin yaşam döngüsü boyunca toplam sahip olma maliyetinin dikkate alınması çok önemlidir. Daha uzun ömürlü teknolojilerin başlangıç maliyetleri daha yüksek olabilir ancak genel yaşam döngüsü maliyetleri daha düşük olabilir. ESS, frenleme sırasında enerjiyi yakalayarak önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabilir. Enerjinin yakalanması ve yeniden kullanılmasının verimliliği ekonomik faydaları doğrudan etkiler. ESS, talebin en yoğun olduğu dönemlerde güç sağlayarak, özellikle elektrik fiyatlarının veya talep ücretlerinin yüksek olduğu bölgelerde şebeke üzerindeki yükü azaltabilir ve enerji maliyetlerini düşürebilir. İlk yatırımın enerji tasarrufu ve verimlilik kazanımları yoluyla telafi edilmesi için gereken süre, kritik bir ekonomik

husustur. Daha kısa geri ödeme süreleri operatörler için daha caziptir. ESS teknolojilerinde zamanla enerji maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlanabilir, mekanik bileşenlerde aşınma ve yıpranma azaltılabilir ve raylı sistemler için bakım maliyetleri düşürülebilir. Dünya üzerindeki birçok bölge, ESS dahil yeşil teknolojilerin benimsenmesine yönelik mali teşvikler, hibeler veya sübvansiyonlar sunmaktadır. Bunlar başlangıç maliyetlerini önemli ölçüde dengeleyebilir. Kamu kurumları ile özel şirketler arasındaki işbirlikleri, ek finansman ve uzmanlık sağlayarak ESS teknolojilerinin uygulanmasını kolaylaştırabilmektedir.

5.2 Çevresel Hususlar

ESS, enerji verimliliğini artırarak ve fosil yakıt bazlı enerjiye olan ihtiyacı azaltarak demiryolu operasyonlarından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen ve ESS tarafından geliştirilen elektrikli raylı sistemler, daha temiz bir ulaşım sistemine katkıda bulunarak karbon ayak izini azaltır. ESS teknolojilerinin çevresel etkisi aynı zamanda kullanılan malzemelere de bağlıdır. Örneğin lityum-iyon bataryalar, çıkarılmaları ve işlenmeleri konusunda çevresel ve etik açıdan dikkate alınan lityum ve diğer metalleri gerektirir. ESS bileşenlerinin kullanım ömrünün sonunda atık yönetimi çok önemlidir. Daha iyi geri dönüştürülebilirlik ve imha etme sırasında daha düşük çevresel etki sunan teknolojiler uzun vadede daha sürdürülebilirdir. ESS'li elektrikli raylı sistemler, dizel motorlu trenlere kıyasla daha az gürültü üretme eğiliminde olup kentsel alanlarda daha düşük gürültü kirliliğine katkıda bulunur. Dizel motorlara olan bağımlılığın azalması, NO₂ ve partikül madde gibi kirletici maddelerin emisyonlarının azalmasına yol açarak demiryolu hattı çevresindeki hava kalitesini artırır. ESS, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjiyi depolayabilmekte, temiz enerji kullanımını artırabilir ve yenilenemeyen kaynaklara olan bağımlılığı azaltabilmektedir. ESS, enerji depolama sağlayarak ve kesintili yenilenebilir kaynaklardan gelen arzı düzenleyerek daha istikrarlı ve güvenilir bir enerji şebekesine katkıda bulunur. Demiryolu operatörleri, ESS kurulumlarının bölgeye göre değişebilen ve teknoloji seçimini ve uygulama stratejisini etkileyebilecek çevresel düzenlemelere ve standartlara uygun olmasını sağlamalıdır. Birçok demiryolu işletmecisi iddialı sürdürülebilirlik hedefleri belirlemektedir ve ESS'nin benimsenmesi bu hedeflere ulaşmada önemli bir bileşendir. Yüksek başlangıç maliyetlerini azaltmak

için demiryolu işletmecileri hükümet programlarından, sübvansiyonlardan ve kamu-özel sektör ortaklıklarından fon arayabilir. Ayrıntılı maliyet-fayda analizleri ve pilot projeler yürütmek, ESS'nin ekonomik uygulanabilirliğini ve uzun vadeli faydalarını göstermeye yardımcı olabilir. Sürdürülebilir ve etik madencilik uygulamalarına bağlı tedarikleri seçmek, hammadde çıkarmanın çevresel etkisini azaltabilir. ESS bileşenleri için sağlam geri dönüşüm ve imha programları geliştirmek, yaşam döngülerinin sonunda çevresel etkileri azaltabilir. ESS'nin mevcut raylı sistemler ve altyapıyla kusursuz entegrasyonunu sağlamak için araştırma ve geliştirmeye yatırım yapmak çok önemlidir. Gelişmiş izleme ve tahmine dayalı bakım teknolojilerinin uygulanması, ESS'nin güvenilirliğini ve ömrünü artırabilir.

Demiryolu taşımacılığında ESS teknolojilerinin ekonomik ve çevresel hususları çok yönlü olup, ilk yatırımlar, operasyonel tasarruflar ve uzun vadeli sürdürülebilirlik faydaları arasındaki dengeyi içermektedir. ESS'nin benimsenmesi maliyet, entegrasyon ve bakımla ilgili zorlukları beraberinde getirirken enerji verimliliği, emisyon azaltımları ve çevresel sürdürülebilirlik açısından potansiyel faydalar onu demiryolu taşımacılığının geleceği için zorlayıcı bir yatırım haline getirmektedir. Stratejik planlama, mali teşviklerden yararlanma ve ilerleyen teknoloji entegrasyonu, daha verimli ve sürdürülebilir bir demiryolu sistemi oluşturmada ESS'nin tam potansiyelinin farkına varılmasında kilit noktalar olacaktır.



6. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİNDE GELECEĞE DAİR BEKLENTİLER

Enerji Depolama Sistemleri (ESS), demiryolu taşımacılığının geleceğinde dönüştürücü bir rol oynamaya hazırlanmaktadır. Demiryolu sektörü daha fazla verimlilik, sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği için çabalarken, ESS teknolojilerindeki gelişmeler hayati önem taşıyacaktır. Bu bölüm, teknolojik gelişmelere, potansiyel endüstri eğilimlerine ve küresel olarak raylı sistemlere yönelik daha geniş sonuçlara odaklanarak demiryolu taşımacılığında ESS'ye ilişkin gelecekteki beklentileri sunmaktadır.

6.1 Teknolojik Gelişmeler

Katı hal bataryalar ve lityum kükürt bataryalar gibi batarya teknolojisindeki ilerlemeler, daha yüksek enerji yoğunlukları ve gelişmiş verimlilik vaat etmektedir. Bu bataryalar daha uzun seyahat mesafelerine ve daha kısa şarj sürelerine olanak tanıyacaktır. Devam eden araştırmalar, süper kapasitörlerin enerji depolama kapasitelerini artırırken hızlı şarj ve deşarj yeteneklerini de artırmayı, böylece onları sık sık dur-kalk yapan kentsel raylı sistemler için daha da etkili hale getirmeyi amaçlamaktadır. Gelecekteki ESS teknolojileri muhtemelen yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon için optimize edilecek ve raylı sistemlerin fazla güneş veya rüzgar enerjisini depolamasına ve talebin yüksek veya yenilenebilir üretimin düşük olduğu dönemlerde kullanmasına olanak tanıyacaktır. Bataryalar ve süper kapasitörler gibi çeşitli ESS teknolojilerinin birleştirilmesi daha yaygın hale gelecektir. Bu hibrit sistemler, demiryolu operasyonlarının genel verimliliğini ve güvenilirliğini artırarak, yüksek enerji kapasitesi ve hızlı enerji dağıtımının ikili faydalarını sunacaktır. Yapay zeka (AI) ve makine öğrenimindeki gelişmeler, enerji ihtiyaçlarını tahmin edebilen, enerji kullanımını optimize edebilen ve ESS'nin şarj ve deşarjını gerçek zamanlı olarak yönetebilen daha gelişmiş EMS'ye yol açacaktır. ESS, akıllı şebekelere giderek daha fazla entegre edilecek ve raylı sistemler ile daha geniş enerji şebekesi arasında daha iyi koordinasyon sağlanacaktır. Bu, yük dengelemeyi, tepe değeri talebini düşürmeyi ve yenilenebilir enerjinin verimli kullanımını kolaylaştıracaktır. Gelecekteki ESS teknolojileri, depolama bileşenlerinin ömrünü ve dayanıklılığını artırmaya, sık değiştirme ihtiyacını azaltmaya ve yaşam döngüsü maliyetlerini düşürmeye

odaklanacaktır. Geri dönüşüm teknolojilerindeki ilerlemeler, kullanılmış ESS'deki malzemelerin verimli bir şekilde geri kazanılmasını ve yeniden kullanılmasını sağlayarak çevresel etkiyi en aza indirecek ve yeni sistemlerin maliyetini azaltacaktır.

6.2 Endüstri Trendleri

Ülkeler ve şehirler sürdürülebilir ulaşım öncelik verirken, elektrikli demiryolu ağlarının genişletilmesi ESS'ye olan talebi artıracaktır. Elektrifikasyon, dizel motorlara olan bağımlılığı azaltacak, emisyonları azaltacak ve hava kalitesini iyileştirecektir. Elektrifikasyon trendi, ESS'nin yüksek enerji taleplerini yönetmede ve ağır yük trenleri için güvenilir güç sağlamada önemli bir rol oynayabileceği yük demiryoluna kadar uzanacaktır. Hükümetler ve özel sektör oyuncuları, raylı sistemlerde gelişmiş ESS teknolojilerini finanse etmek ve uygulamak için kamu-özel sektör ortaklıklarından yararlanarak ESS projeleri üzerinde giderek daha fazla işbirliği yapacaktır. Sera gazı emisyonlarını azaltmayı ve temiz enerjiyi teşvik etmeyi amaçlayan politikalar ve teşvikler, demiryolu taşımacılığında ESS'nin benimsenmesini desteklemeye devam edecektir. Düzenleyici kurumlar daha sıkı emisyon standartları uygulayarak demiryolu işletmecilerini bu gereklilikleri karşılamak ve cezalardan kaçınmak için ESS teknolojilerini benimsemeye teşvik edecektir. Toplu taşımada sürdürülebilir teknolojilerin kullanımını zorunlu kılan politikalar, ESS'nin entegrasyonunu teşvik edecek ve raylı sistemlerin daha geniş çevresel hedeflere katkıda bulunmasını sağlayacaktır. Gelişmekte olan pazarlar, daha gelişmiş bölgelerde kaydedilen ilerlemelerden yararlanarak demiryolu altyapı geliştirmelerinin bir parçası olarak ESS teknolojilerini giderek daha fazla benimseyecektir. Demiryolu taşımacılığında ESS teknolojileri için uluslararası standartlar ortaya çıkacak ve bu standartlar uyumluluğu, birlikte çalışabilirliği ve en iyi uygulamaların küresel değişimini kolaylaştıracaktır. ESS endüstrisinin büyümesi imalat, kurulum, bakım ve araştırma ve geliştirme alanlarında istihdam yaratacaktır. ESS teknolojilerindeki ilerlemeler ve artan ölçek ekonomileri, maliyetlerin azalmasına yol açacak ve bu sistemleri demiryolu işletmecileri için daha erişilebilir ve uygun fiyatlı hale getirecektir. ESS'nin yaygın şekilde benimsenmesi, demiryolu taşımacılığının karbon ayak izini önemli ölçüde azaltacak ve iklim değişikliğiyle mücadeleyle yönelik küresel çabalara katkıda bulunacaktır. ESS, dizel motorlara olan bağımlılığı azaltarak ve emisyonları düşürerek kentsel alanlardaki hava kalitesini iyileştirecek ve halk

sağlığına fayda sağlayacaktır. ESS, demiryolu hizmetlerinin güvenilirliğini ve verimliliğini artıracak, gecikmeleri azaltacak ve genel yolcu deneyimini iyileştirecektir. ESS, şebeke kesintileri sırasında yedek güç sağlayarak kesintisiz demiryolu hizmeti sağlayabilir ve sistem dayanıklılığını artırabilir. Daha gelişmiş ESS teknolojilerine olan talep, malzeme bilimi, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve güç elektroniği dahil olmak üzere ilgili alanlarda inovasyonu teşvik edecektir. Diğer Sektörlerle Sinerjiler: ESS'de demiryolu taşımacılığına yönelik yeniliklerin yayılma etkileri olacak ve otomotiv, havacılık ve sabit enerji depolama gibi diğer sektörlerle fayda sağlayacaktır.

Demiryolu taşımacılığında ESS teknolojilerinin geleceği, teknolojik gelişmeler, destekleyici politikalar ve sürdürülebilirliğe artan vurgu sayesinde ümit vericidir. ESS daha verimli, uygun fiyatlı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre hale geldikçe bunların benimsenmesi raylı sistemleri küresel olarak dönüştürecektir. Bu dönüşüm, demiryolu taşımacılığını sürdürülebilir ve dayanıklı bir ulaşım altyapısının temel bileşeni olarak konumlandırarak önemli ekonomik ve çevresel faydalar sağlayacaktır. Devam eden araştırma, geliştirme ve işbirliği, önümüzdeki yıllarda ESS teknolojilerinin tam potansiyelinin hayata geçirilmesi için hayati önem taşıyacaktır.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Enerji Depolama Sistemi (ESS) teknolojilerinin ve bunların demiryolu taşımacılığında enerji verimliliğini artırma potansiyellerinin kapsamlı bir analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, lityum iyon bataryalar, süper kapasitörler, volanlar ve hibrit sistemler dahil olmak üzere çeşitli ESS teknolojileri araştırılmış ve bunların uygulamaları, faydaları, zorlukları ve gelecekteki beklentileri incelenmiştir. Ekonomik ve çevresel hususları değerlendirerek ve ESS'nin seçimi, boyutlandırılması ve yerleştirilmesinin stratejik yönlerini tartışarak bu çalışma, ESS'nin demiryolu taşımacılığını nasıl dönüştürebileceğine dair ayrıntılı bir anlayış sağlamaktadır.

Lityum-iyon bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ve verimliliği kanıtlanmış olup, bu bataryaların yol boyu entegrasyon uygulamaları simülasyon yolu ile incelenmiştir. Özellikle uzun vadeli enerji depolama ve sabit güç kaynağı senaryolarında etkilidirler. Süper kapasitörler ve volanlar kentsel raylı sistemler gibi sık hızlanma ve yavaşlama içeren uygulamalar için hayati önem taşıyan hızlı şarj ve deşarj döngülerini sağlama konusunda olağanüstü yetenekler göstermektedir. Hibrit Sistemler çeşitli ESS teknolojilerinin birleştirilmesi, ilgili güçlü yönlerden yararlanarak genel sistem performansını ve güvenilirliğini artıran dengeli bir çözüm sunmaktadır.

ESS teknolojileriyle ilişkili yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen, enerji tasarrufu, azaltılmış bakım maliyetleri ve gelişmiş operasyonel verimlilik açısından uzun vadeli faydalar, zorlayıcı bir ekonomik durum sunmaktadır. Kamu-özel sektör ortaklıkları ve hükümet teşvikleri, başlangıç maliyetlerinin karşılanması ve ESS teknolojilerinin benimsenmesini teşvik etmede önemli bir rol oynamaktadır. ESS teknolojileri, enerji kullanımını optimize ederek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Demiryolu taşımacılığında ESS'nin benimsenmesi, küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olup, daha temiz ve daha verimli ulaşım sistemlerini teşvik etmektedir. ESS, özellikle rejeneratif frenleme ve pik yük yönetimi yoluyla raylı sistemlerin enerjiyi daha etkili yönetme yeteneğini geliştirmektedir. ESS'nin entegrasyonu demiryolu hizmetlerinin güvenilirliğini artırır ve elektrik kesintilerine karşı dayanıklılık sağlayarak kesintisiz operasyonlar sağlar.

Demiryolu taşımacılığında ESS teknolojilerinin geleceği, teknolojiye devam eden gelişmeler, destekleyici düzenleyici çerçeveler ve sürdürülebilirliğe artan vurgu nedeniyle umut vericidir. Gelecekteki temel beklentiler şunları içerir:

- Katı hal ve lityum kükürt bataryaların geliştirilmesi ve süper kapasitörler ve volanlardaki iyileştirmeler gibi batarya teknolojisinde devam eden gelişmeler.
- ESS'nin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla gelişmiş entegrasyonu, enerji kullanımının optimize edilmesi ve daha sürdürülebilir bir enerji şebekesine katkıda bulunulması.
- Uluslararası standartlar ve en iyi uygulamalarla desteklenen, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan pazarlarda ESS teknolojilerinin daha geniş çapta benimsenmesi.
- Artan ölçek ekonomileri ve teknolojik gelişmeler, maliyetlerin azaltmakta ve ESS teknolojilerine daha geniş erişilebilirliğe yol açmaktadır.

Bu çalışmanın bulgularına dayanarak, ESS teknolojilerinin demiryolu taşımacılığına etkin entegrasyonunu kolaylaştırmak için çeşitli önerilerde bulunulabilir:

- Demiryolu işletmecileri ve politika yapıcılar, fizibilite ve faydaları göstermek için ayrıntılı maliyet-fayda analizleri ve pilot projelerle desteklenen ESS teknolojilerine yapılan yatırımlara öncelik vermelidir.
- Hükümetler, ESS teknolojilerinin benimsenmesini teşvik etmek için teşvikler, sübvansiyonlar ve destekleyici düzenlemeler sağlamaya devam etmelidir.
- Devam eden Ar-Ge çalışmaları, ESS teknolojilerinin verimliliğini, dayanıklılığını ve maliyet etkinliğini artırmanın yanı sıra gelişmiş enerji yönetim sistemleri geliştirmeye odaklanmalıdır.
- Kamu ve özel sektör arasındaki işbirliğinin yanı sıra uluslararası ortaklıklar, demiryolu taşımacılığında ESS'nin benimsenmesinde yenilikçiliği teşvik etmek ve uygulamaları standartlaştırmak için gerekli olacaktır.

Enerji Depolama Sistemleri, demiryolu taşımacılığında enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliği artırmak için çok önemli bir teknolojiyi temsil etmektedir. ESS, ekonomik ve çevresel zorlukları ele alarak ve teknolojik gelişmelerden ve geleceğe yönelik beklentilerden yararlanarak raylı sistemleri küresel olarak önemli ölçüde

dönüştürebilir. Bu çalışma, daha verimli, güvenilir ve çevre dostu bir demiryolu ulaşım altyapısının önünü açarak, ESS teknolojilerinin tüm potansiyelinin hayata geçirilmesinde stratejik planlamanın, yatırımın ve işbirliğinin önemini altını çizmektedir.

Bu çalışma, enerji depolama sistemlerinin kentsel raylı ulaşım sistemlerinde nasıl optimize edilebileceğini inceleyen bir ön çalışma niteliğindedir. Ancak, daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak adına, gün içinde ve hat boyunca değişen tren yüklerinin etkisini göz önünde bulunduran çok trenli simülasyonların yapılması faydalı olacaktır. Özellikle farklı işletme senaryoları ve enerji geri kazanım dinamiklerinin detaylı analizi için, daha kapsamlı simülasyon çalışmaları gelecekteki araştırmalar açısından kritik öneme sahiptir.





KAYNAKLAR

- [1] BS EN 50163:2004+A3:2022 Demiryolu uygulamaları. Çekiş sistemlerinin besleme gerilimleri. Durum: Mevcut | Yayınlanma tarihi: 06/01/2005.
- [2] www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/track/third-rail/.
- [3] Gonzalez A, Goikolea E, Barrena JA, et al. Review on supercapacitors: technologies and materials. *Renew Sust Energ Rev* 2016; 58:1189–206.
- [4] Faraji F, Majazi A, Al-Haddad K, et al. A comprehensive review of flywheel energy storage system technology. *Renew Sust Energ Rev* 2017; 67:477–90..
- [5] Course on Application of Hydrogen in the Railway Level 1, Organized by the Spanish Railways Foundation (Fundación de Ferrocarriles Españoles) and presented by rolling stock manufacturers and railway operators: RENFE and Adif, Alstom, CAF, Talgo, Calvera, Sep./Oct. 2021.
- [6] J. Varney, “Alstom Presentation APTA Rail Conference: Coradia iLint—Hydrogen fuel cell train.,” Accessed: Nov. 25, 2022. [Online]. Available: https://www.apta.com/wp-content/uploads/CoradiaILint-%E2%80%93Hydrogen-Fuel-Cell-Train_James_Varney-1.pdf.
- [7] J. B. Botella and M. C. Sola, “Hydrogen technologies applied to rolling stock,” in Online Course on Application of Hydrogen in the Railway Level 1. Spanish Railways Foundation (Fundación de Ferrocarriles Españoles), FFE, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.formacionffe.es/OnLine/catalogo.asp>.
- [8] TC 9—Electrical Equipment and Systems for Railways—Railway Applications—Rolling Stock—Fuel Cell Systems for Propulsion— Part 1: Fuel Cell Power System, Standard IEC 63341-1. Accessed: Dec. 4, 2022. [Online]. Available: <https://www.iec.ch/technicalcommittees-and-subcommittees>.
- [9] TC 9—Electrical Equipment and Systems for Railways—ED1 Railway Applications—Rolling Stock—Fuel Cell Systems for Propulsion— Part 2: Hydrogen Storage System, Standard IEC 63341-2. Accessed: Dec. 4, 2022. [Online]. Available: <https://www.iec.ch/technicalcommittees-and-subcommittees>.
- [10] Chen H, Cong TN, Yang W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Prog Nat Sci* 2009; 19:291–312.
- [11] Gonzalez-Gil A, Palacin R, Batty P. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energ Convers Manage* 2013; 75:374–88.
- [12] Luo X, Wang J, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Appl Energ* 2015; 137:511–36.

- [13] Hadjipaschalis I, Poullikkas A, Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renew Sust Energ Rev* 2009; 13:1513–22.
- [14] Parfomak PW. Energy storage for power grids and electric transportation: a technology assessment. Technical report. Congressional Research Service 2012.
- [15] Farret FA, Simoes MG. *Integration of Alternative Sources of Energy*, Hoboken, US.. John Wiley & Sons, 2006.
- [16] Zhao H, Wu Q, Hu S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support. *Appl Energ* 2015; 137:545–53.
- [17] Fetcenko M, Ovshinsky S, Reichman B, et al. Recent advances in NiMH battery technology. *J Power Sources* 2007; 165:544–51.
- [18] Chatzivasileiadi A, Ampatzi E, Knight I. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings. *Renew Sust Energ Rev* 2013; 25:814–30.
- [19] International Electrotechnical Commission. *Electrical energy storage: white paper*. Technical report. IEC 2011.
- [20] Howard WF, Spotnitz RM. Theoretical evaluation of high-energy lithium metal phosphate cathode materials in Li-ion batteries. *J Power Sources* 2007; 165:887.
- [21] Barote L, Weissbach R, Teodorescu R, et al. Stand-alone wind system with vanadium redox battery energy storage. In: 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, Romania, 2008, 407–12.
- [22] Weber AZ, Mench MM, Meyers JP, et al. Redox flow batteries: a review. *J Appl Electrochem* 2011; 41:1137–64.
- [23] Winter M, Brodd RJ. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chem Rev* 2005; 104:4245–69..
- [24] Schoenung SM. Characteristics and technologies for long vs short-term energy storage. Technical report. United States Department of Energy 2001.
- [25] Pickard WF, Shen AQ, Hansing NJ. Parking the power: strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply–demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources. *Renew Sust Energ Rev* 2009; 13:1934–45.
- [26] Battke B, Schmidt TS, Grosspietsch D, et al. A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications. *Renew Sust Energ Rev* 2013; 25:240– 50.
- [27] Arangarajan V, Oo AMT, Chandran J, et al. Role of energy storage in the power system network. In: Kale SA, Thirumulalai PR, Prabaker K (eds). *Renewable Energy and Sustainable Development*. Hauppauge, NY: Nova Science, 2015,201– 25.
- [28] Tzimas E, Moss R, Ntagia P. Technology map of the European Strategic Energy Technology plan (SET-Plan). Technical report. JRC Scientific and Technical Reports 2011.

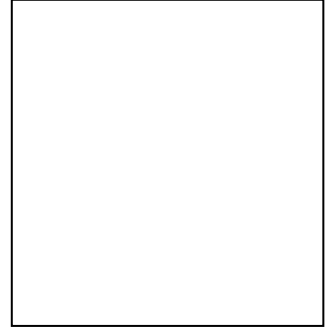
- [29] Curry C. Lithium-ion battery costs and market. Technical report. Bloomberg New Energy Finance 2017.
- [30] Schoenung SM, Hassenzahl WV. Long-vs. short-term energy storage technologies analysis a life-cycle cost study a study for the DOE energy storage systems program. Technical report. Sandia National Laboratories 2003.
- [31] D. Ronanki, S. A. Singh, and S. S. Williamson, “Comprehensive topological overview of rolling stock architectures and recent trends in electric railway traction systems,” *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 3, no. 3, pp. 724–738, Sep. 2017.
- [32] “Battery Trains Workshop—The UIC Energy Efficiency and CO2 Emissions Sector. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available: https://uic.org/events/IMG/pdf/battery_trains-slides-v1_compressed.pdf.
- [33] Y. Nagaura, R. Oishi, M. Shimada, and T. Kaneko, “Battery-powered drive systems: Latest technologies and outlook,” *Hitachi Rev.*, vol. 66, no. 2, pp. 138–144, 2017.
- [34] W. Klebsch, P. Heininger, J. Geder, and A. Hauser, “Battery systems for multiple units—Emission-free drives powered by lithium-ion cells,” VDE, Offenbach am Main, Germany, Tech. Rep., 2018.
- [35] M. Ayata et al., “Traction inverter system with lithium-ion batteries for EMUs,” in *Proc. 17th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, 2015, pp. 1–9.
- [36] K. Ogura, K. Nishimura, and Y. Oku, “A bidirectional DC-DC converter for battery electric light rail vehicle and its test run results,” in *Proc. IEEE 13th Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, 2019, pp. 1–6..
- [37] Mainline Locomotives for RCH, Hungary. Accessed: Dec. 11, 2022. [Online]. Available: <https://crrczelc-europe.com/mainlinelocomotive-rch-hungary>.
- [38] STADLER FLIRT: Akku Battery Train. Accessed: Dec. 4, 2022. [Online]. Available: <https://www.stadlerrail.com/en/>.
- [39] ABB Batteries to Power German Trains in Smart Mobility Move. Accessed: Dec. 4, 2022. [Online]. Available: <https://www.smart-energy.com/storage/abb-batteries-to-power-german-trains-in-smart-mobility-move/>.
- [40] Y. Laperrière, “Realize your vision with bombardier TALENT 3 BEMU—The battery electric multiple unit train,” in *Proc. APTA Rail Conf.*, 2019.
- [41] J. B. Botella and M. C. Sola, “Hydrogen technologies applied to rolling stock,” in *Online Course on Application of Hydrogen in the Railway Level 1*. Spanish Railways Foundation (Fundación de Ferrocarriles Españoles), FFE, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.formacion-ffe.es/OnLine/catalogo.asp>.
- [42] Siemens Mobility to Supply First Battery Powered Mireo Plus B Trains to Denmark. Accessed: Jan. 25, 2022. [Online]. Available: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-mobilitysupply-first-battery-powered-mireo-plus-b-trains-denmark>.

- [43] CRRC Delivers Hybrid Locomotive for Rail Cargo Hungary. Accessed: Jan. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.railjournal.com/locomotives/crrc-delivers-hybrid-locomotive-for-rail-cargohungary/>.
- [44] CAF Civity, 2022. Accessed: Jan. 6, 2022. [Online]. Available: <https://www.caf.net/en/soluciones/familia/civity/index.php>.
- [45] “Vivarail Shows off Battery Train at COP26,” 2022. Accessed: Jun. 6, 2023. [Online]. Available: <https://www.railjournal.com/technology/vivarail-shows-off-battery-train-at-cop26/>.
- [46] J. Pringle, “OCS-free light rail vehicle technology,” Accessed: Jan. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.miamidade.gov/citt/library/summit/jcpringle.pdf>.
- [47] Popescu, M., Bitoleanu, A.: A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems. *Energies*. 12(6), 1092 (2019). <https://doi.org/10.3390/en12061092>.
- [48] González-Gil, A., Palacin, R., Batty, P.: Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Convers. Manag.* 75, 374–388 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.039>.
- [49] Söylemez, M. T., DC Beslemeli Raylı Ulaşım Sistemlerinin Simülasyonunda Hat Gerilimi Düşümlerinin Etkileri, Uluslararası Demiryolu Sempozyumu (International Railway Symposium).
- [50] Söylemez, M. T. and Açıkbaş, S., Comparison of Stray Currents and Rail Voltage Profiles between 750 VDC And 1500 VDC Power Supply Systems Using Simulation, IEE Int. Conf. on Railway Engineering (ICRE'05).
- [51] Söylemez, M. T. and Açıkbaş, S., DC Beslemeli Raylı Ulaşım Sistemlerinin Simülasyonu, Elektrik – Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi.
- [52] Söylemez, M. T. and Açıkbaş, S., Multi-train Simulation of DC Rail Traction Power Systems with Regenerative Braking, Int. Conf. on Comp. Aided Design.
- [53] Açıkbaş, S. and Söylemez, M. T., Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, Int. Conf. on Comp. Aided Design.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

: Hasan Saim ÜNAL



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Gebze Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Ünal, Hasan Saim**, Söylemez, Mehmet Turan, 2024, Kentsel Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Verimliliği için Sabit Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Konumlandırılmasına Yönelik Model, *ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ KONFERANSI, ELECO 2024*, Bursa, Türkiye. 978-605-01-1340-2