



**RAYLI SİSTEM UYGULAMALARI İÇİN BİR ULTRA-KAPASİTÖR TABANLI
GERİ KAZANIMLI FRENLEME SİSTEMİ**

Abdullah Talha MERT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Abdullah Talha MERT tarafından hazırlanan “RAYLI SİSTEM UYGULAMALARI İÇİN BİR ULTRA-KAPASİTÖR TABANLI GERİ KAZANIMLI FRENLEME SİSTEMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Murat Hüsni SAZLI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 26/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdullah Talha MERT

26/06/2019

RAYLI SİSTEM UYGULAMALARI İÇİN BİR ULTRA-KAPASİTÖR TABANLI GERİ KAZANIMLI FRENLEME SİSTEMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah Talha MERT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Her geçen gün toplumların şehirlerde yaşamayı tercih etmesi sebebiyle günümüzde şehirlerin nüfusu giderek artmaktadır. Artan nüfus ve nüfus yoğunluğu pek çok soruna sebep olmaktadır. Bu sorunların en önemlilerinden biri ulaşım"dır. Özellikle büyük şehirlerde sürdürülebilir kitle kent taşımacılığı bu sorunu çözmekte en önemli kaynaklarımızdan biri olmalıdır. Raylı sistemlerin yüksek güçlere ulaşmaları, trafiktten etkilenmemeleri, konforlu ve yüksek yolcu kapasiteli olmaları gibi avantajları sayesinde kentsel taşımacılıkta giderek daha avantajlı olduğu anlaşılmaktadır. Günümüzde toplu kentsel ulaşım sisteminde kullanılan en önemli araçlardan biri de metrodur. Kendine ait özel bir yolu ve raylı sistem araçları bulunan, hiçbir şekilde diğer sistemler ile yolları kesişmeyen kapalı bir sistemdir. Kent metro taşımacılığı için tercih edilen enerji kaynağı ise elektriktir. Raylı ulaşım sistemlerinde hem ana enerji kaynağı hem de çekiş enerjisi kaynağı olarak kullanılan elektriğı sağlamak için farklı sistemler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında 750 Volt DC gerilim kullanılarak oluşturulan çıkış enerjisi ve bu enerjiye bağlı frenleme sebebiyle ortaya çıkan rejeneratif enerjinin meydana gelmesinden bahsedilecektir. Buna bağlı olarak, raylı sistemlerde istasyon içerisindeki elektrik ekipmanlarından enerji iletim sistemlerine ve buradan da motorlarda frenleme gerçekleşinceye kadar izlenen yol ve bu süreçte enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşümü Ankara Metrosunda kullanılmakta olan metro araçlarındaki motorlarda anlatılacaktır. Rejeneratif frenleme, elektrik motorunun frenleme sırasında elektrik üretmesini sağlayan bir sistemdir. Rejeneratif frenleme esnasında elektrik motoru, araçların kinetik enerjisini geri kazanıp elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan bir jeneratör görevi görmektedir. Bu tez çalışmasında, rejeneratif enerjiye etki eden çeşitli parametreler ve parametrelere ait sonuçları incelenmiştir. Büyükşehirlerdeki demiryolu sistemlerinde rejeneratif fren enerjisini depolama yöntemi olarak ultra-kapasitörlerin kullanımı araştırılmış ve incelenmiştir. Rejeneratif sistemler sayesinde demiryolu araçlarında frenleme esnasında boşa harcanan ve ısıya dönüşen enerjinin ivmelenme sırasında kullanılması hedeflenmiştir. Ayrıca Ankara Metro sistemi incelenmiş, rejeneratif geri kazanım enerjisini analiz etmek için ultra-kapasitör modülleri boyutlandırılmış ve ayrıca simülasyon üzerinden bir kontrol sistemi kurulmuştur.

Bilim Kodu : 90513

Anahtar Kelimeler : Raylı Sistem, Rejeneratif, Enerji, Ultra-kapasitör, Güç Elektroniğı

Sayfa Adedi : 100

Danışman : Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

DESIGN OF AN ULTRA-CAPASITOR BASED REGENERATIVE BRAKING SYSTEM FOR RAILWAY APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Abdullah Talha MERT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

Today, the population of cities is increasing due to the fact that societies prefer to live in cities every day. The increasing population and population density cause many problems. One of the most important of these problems is transportation. Especially in big cities, sustainable mass urban transportation should be one of the most important resources in solving this problem. It is understood that rail systems are becoming more and more advantageous in urban transportation thanks to their advantages such as reaching high powers, being not affected by traffic, and having comfortable and high passenger capacity. Today, one of the most important vehicles used in the mass urban transportation system is the Metro. It is a closed system with its own special path and rail system tools, which in no way intersect with other systems. Electricity is the preferred source of energy for urban metro transport. In rail transportation systems, different electrical systems are used to provide electricity, which is used both as the main energy source and as the traction energy source. In this thesis, the output energy generated by using 750-volt DC and the generation of regenerative energy due to braking related to this energy will be mentioned. Accordingly, the path followed from the electrical equipment in the station to the energy transmission systems in the rail systems and from this to the braking of the engines and the conversion of energy to regenerative energy in this process will be explained in the engines of the subway vehicles used in Ankara Metro. Regenerative braking is a system that allows the electric motor to generate electricity during braking. During regenerative braking, the electric motor acts as a generator that restores the kinetic energy of the vehicles and converts them into electrical energy. In this thesis, various parameters affecting the regenerative energy and their results are examined. The use of ultra-capacitors as a method of storing regenerative brake energy in railway systems in major cities has been investigated and studied. With the help of regenerative systems, it is aimed to use the energy wasted during braking and turned into heat during acceleration in railway vehicles. In addition, Ankara Metro system was examined, ultra-capacitor modules were sized to analyze regenerative recovery energy and a control system was established through simulation.

Science Code : 90513

Key Words : Railway, Regenerative, Energy, Ultra-capacitors, Power Electronics

Sayfa Adedi : 100

Danışman : Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Tezimizin araştırma aşamasında, yön tayininde ve tamamlanmasında bana destek olan değerli hocam sayın Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na bana ayırdıkları değerli zaman ve sağladıkları destek için minnettarım. Tezimizin başlangıcından bitimine kadar bana inanan, benden yardımlarını esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma, İstanbul Teknik Üniversitesi değerli hocam sayın Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ'e ve EGO Genel Müdürlüğü üst yönetimine, Ankara Metrosu İşletmesindeki çalışma arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
3. ANKARA DA KULLANILAN RAYLI SİSTEMLER	13
3.1. Hafif Raylı Sistem	13
3.2. Metro Sistemi	14
3.3. Raylı Sistemler Enerji Tüketimleri	16
4. RAYLI SİSTEMLERDE REJENERATİF ENERJİ	19
4.1. İstasyonlarda ve Hatta Enerjinin Tüketimi	19
4.1.1. Orta gerilim kesici hücresi	22
4.1.2. Transformatörler	24
4.1.3. DC şalt hücresi ve doğrultucu grubu.....	25
4.1.4. Enerji iletim sistemleri	28
4.2. Raylı Sistem Araçlarındaki Enerji Tüketimi	34
4.2.1. Ana şalter (MS)	37
4.2.2. Ana bağlantı kesme şalteri (MDS).....	38
4.2.3. Ana sigorta (MF), kuplaj devre kesicisi (CCB)	38

4.2.4. Yüksek hızda devre kesici (HSCB).....	39
4.2.5. Filtre reaktörü (FL)	39
4.2.6. Fren rezistörü (DBRe).....	40
4.2.7. Filtre kondansatörü (FC)	41
4.2.8. Elektrik gücü modülü (PEM)	41
4.2.9. Cer motorları	42
4.3. Rejeneratif Direnç Sistemi.....	42
4.4. Metro Araçlarında Frenleme Çeşitleri.....	43
4.4.1. Pnömatik frenler	43
4.4.2. Rejeneratif frenleme	45
5. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TASARRUFU İÇİN ALINMASI GEREKEN TEDBİRLER	49
5.1. Ankara Raylı Sistem Hatlarının Enerji Tüketimleri	49
5.2. Trenlerde Enerji Tüketimi ve Kayıpları	50
5.2.1. Mekanik kayıplar	52
5.2.2. ER ekipmanı kayıpları.....	53
5.2.3. Yardımcı servis kayıpları	54
5.2.4. Besleme sistemi kayıpları	54
5.3. Enerji Tüketimi Hakkında Bazı Hususlar	55
5.4. Enerji Verimliliği Stratejileri	56
5.5. Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Kullanımının İyileştirilmesi.....	59
6. ULTRA-KAPASİTÖR	65
6.1. Ultra-Kapasitör Tanımı	65
6.2. Ultra-Kapasitör Eşdeğer Modeli.....	65

Sayfa

7. UYGULAMA	67
7.1. Enerji Tüketimine Etki Eden Ana Parametrelerin İncelenmesi	68
7.1.1. İşletme sıklığının etkisi	68
7.1.2. Tren ağırlığının etkisi	69
7.1.3. Hızlanma ivmesinin etkisi	71
7.1.4. Frenleme ivmesinin etkisi	72
7.2. DC Merkezi Tasarım	74
7.3. AC-DC 12 Darbe Trafosu Doğrultucu Modellemesi	74
7.4. Matlab/Simulink’de Trafo Merkezinin Genel Tasarımı	75
7.5. Tren Modellemesi	77
7.6. CRRC Treninin Mekanik Çalışması	79
7.7. Trenin Güç ve Tork Hesabı	82
7.8. Ultra-Kapasitörlü Bank Tasarımı İçin Kriterler	85
7.9. Ultra-Kapasitörlü Bank Boyutlandırma	85
7.9.1. Rejeneratif enerjiyi kullanmak için ultra-kapasitör boyutlandırması	85
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
8.1. Sonuç	89
8.2. Öneriler	90
KAYNAKLAR	91
EKLER	97
EK-1. Ankara metrosu M2 hattı DC cer gücü bölümü	98
EK-2. Tren parametreleri Matlab/Simulink kodları	99
ÖZGEÇMİŞ	100

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Ankara’da ulaşım istatistikleri.....	3
Çizelge 3.1. Ankaray ve Ankara metroları araç bilgisi.....	15
Çizelge 3.2. Ankaray işletme dönemi toplam istatistikleri	17
Çizelge 3.3. Ankara metroları işletme dönemi toplam istatistikleri	17
Çizelge 4.1. Ana şalter konumları.....	37
Çizelge 5.1. Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü elektrik enerjisi tüketimleri.....	49
Çizelge 7.1. 6’lı tren seti için değişik sefer aralıklarındaki talep ettiği enerji ve bu enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı.....	68
Çizelge 7.2. Farklı tren ağırlıkları için enerji tüketimi	70
Çizelge 7.3. Farklı hızlanma ivmeleri için enerji tüketimi	71
Çizelge 7.4. Farklı frenleme ivmeleri için enerji tüketimi.....	73
Çizelge 7.5. Üç faz enerji kaynağı parametreleri.....	76
Çizelge 7.6. Üç faz trafo merkezi parametreleri	76
Çizelge 7.7. Tren setlerinin gösterimi.....	77
Çizelge 7.8. Tren setleri kombinasyonlarının özellikleri.....	78
Çizelge 7.9. Mekanik parametreler	78
Çizelge 7.10. Teker dönme ataleti	78
Çizelge 7.11. Çekiş motoru parametreleri	78
Çizelge 7.12. CRRC trenin parametreleri	81
Çizelge 7.13. Motorun toplam tork ortalaması	82
Çizelge 7.14. Ortalama motor gücü	84
Çizelge 7.15. Hızlanma enerjisini sağlamak için bir tren için ultra-kapasitör boyutlandırma	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. M2 Çayyolu-Kızılay metrosu orta gerilim tek hat şeması.....	21
Şekil 4.2. Raylı sistemlerde enerji iletim sistem çeşitleri	28
Şekil 4.3. Üçüncü ray sistemleri temas şekilleri	29
Şekil 4.4. CRRC araçları akım pabucu	31
Şekil 4.5. Rijit katener sistemi [36]	33
Şekil 4.6. Ankara metrosunda kullanılan CRRC metro araçlarının elektrik devre şeması	36
Şekil 4.7. Yüksek voltaj güç kaynağı diyagramı	38
Şekil 4.8. Fren rezistörü M851RF.....	41
Şekil 4.9. Kullanılmayan rejeneratif enerji bölgeleri.....	43
Şekil 4.10. Elektrikli frenleme çeşitleri	46
Şekil 5.1. Şebeke geri besleme enerjisini maksimize etmek için kullanılan stratejilerin özet diyagramı	61
Şekil 6.1. Bir ultra-kapasitör eşdeğer devresi [63].	66
Şekil 7.1. Tren işletme sıklığına göre rejeneratif enerji.....	69
Şekil 7.2. Farklı yolcu ağırlıklarına göre rejeneratif enerji.....	70
Şekil 7.3. Farklı hızlanma ivme değerlerine göre rejeneratif enerji	72
Şekil 7.4. Farklı frenleme ivmelenme değerlerine göre rejeneratif enerji	73
Şekil 7.5. 12-Darbeli doğrultucu [64]	75
Şekil 7.6. Uygulama çalışmasının yapıldığı trafo merkezinin Matlab/Simulink modeli	76
Şekil 7.7. Bir CER trafosunun DC simülasyon sonucu	77
Şekil 7.8. CRRC aracı AW3 yükünde tren çekiş gücü eğrisi	79
Şekil 7.9. CRRC treni motor hızı.....	80
Şekil 7.10. Hesaplanan motor hızı	83

Şekil	Sayfa
Şekil 7.11. Motorun güç profili.....	83
Şekil 7.12. Motorun toplam torku.....	83
Şekil 7.13. CRRC aracı Matlab/Simulink modeli.....	84



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Ankara Büyükşehir Belediyesi raylı sistemler ağ haritası.....	5
Resim 3.1. Ankaray hafif raylı sistemi araçları	13
Resim 3.2. Ankara metrosu eski ve yeni araçlar.....	14
Resim 4.1. Milli Kütüphane istasyonu enerji besleme sistemine ait SCADA ekran görüntüsü	22
Resim 4.2. Orta gerilim panosunun bölümleri.....	23
Resim 4.3. Schneider’e ait orta gerilim panosu	23
Resim 4.4. Ankara metrosunda kullanılan kuru tip trafonun içyapısı	24
Resim 4.5. Diyot grubunun görünümü	25
Resim 4.6. CER besleme merkezi.....	26
Resim 4.7. Schneider’e marka yüksek hızlı DC kesicisi arabasının görünümü	27
Resim 4.8. Ankara metrolarında kullanılan DC salt panosu.....	28
Resim 4.9. Ankara metrosu 3. ray kesiti.....	30
Resim 4.10. Ankara metrosunda korumalı üstten temas uygulamalı 3. ray sistemi	30
Resim 4.11. Rijit katener sistemi	32
Resim 4.12. Bir normal katener sisteminin genel görünüşü [31]	34
Resim 4.13. Batıkent istasyonu CER gücü sisteminin OG panosu ile 3. ray arasındaki enerji akışının SCADA görüntüsü	35
Resim 4.14. Ana şalter görünümü.....	37
Resim 4.15. HSCB’nin görünümü	39
Resim 4.16. Fren rezistörü görünümü.....	40
Resim 4.17. CCRC araçlarında kullanılan cer motoru	42
Resim 4.18. Servis frenleri görünümü	44
Resim 4.19. Servis frenleri görünümü	45

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Enerji geri dönüşümüne sahip şehir içi raylı sistemler için enerji akışlarının Sankey diyagramı	51
Resim 5.2. Kentsel rayda rejeneratif enerji alışverişinin şematik gösterimi.....	59
Resim 5.3. Kentsel raylı araçlarda yerleşik ESS'nin şematik çalışması	61
Resim 5.4. Kentsel ray uygulamaları için sabit ESS'nin şematik çalışması	62



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
Al	Aliminyum
dk	Dakika
F	Farad
GWh	Gigawatt Saat
h	saat
Hz	Hertz
kA	KiloAmper
kg	Kilogram
km	Kilometre
kV	KiloVolt
kWh	kilowatt Saat
m	Metre
m²	Metre Kare
m³	Metre küp
mF	MikroFarad
MgSi	Magnezyum Silisyum
MJ	MikroJul
mm	Milimetre
MVA	Mega Volt Amper
MW	Mega Watt
°C	Santigrat Derece
ph	Histeriz Kayıpları
pu	Birim Başına
rms	Karekök Ortalama
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
s²	Saniye Kare

Simgeler**Açıklamalar**

sa	Saat
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbon
t	Ton
TL	Türk Lirası
V	Volt
VA	Volt Amper
kVA	Kilo Volt Amper

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif Akım
AG	Alçak Gerilim
APS	Otomatik Güç Kaynağı
ATC	Otomatik Tren Kontrolü
ATO	Otomatik Tren İşletimi
ATP	Otomatik Tren Koruma
BCCT	Akım Transdüseri
BCU	Fren Kontrol Birimi
BECU	Fren Elektronik Kontrol Ünitesi
C	Kapasitör
CCB	Kuplaj devre kesicisi
C_d	Aerodinamik Sürüklenme Katsayısı
CRRC	China Railway Rolling Stock Corp
DBRe	Fren Rezistörü
DCPT	Potansiyel Transdüseri
DS	Deşarj Şalteri
T	Treyler Araç (Motorsuz Araç)
E	Enerji
EGO	Elektrik Gaz Otobüs
ESR	Eşdeğer Seri Direnç

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ESS	Enerji Depolama Sistemi
FC	Filtre Kondansatörü
FL	Filtre Reaktörü
GR	Dişli Oranı
GTO	Kapısı Kapalı Tristör
HB	Hareketli Blok
HSBC	Yüksek Hızda Devre Kesici
HV	Yüksek Gerilim
HVB	Ana Şalter Kutusu
HW	Sefer Süresi
IGBT	Yalıtılmış Kapılı Çift Kutuplu Transistör
kN.m	Kilo Newton Metre
LB/CHK	Hat Kontaktörleri
Lm	Mıknatıslanma Endüktansı
LRT	Hafif Raylı Sistem
LV	Alçak Gerilim
MC	Motorlu Araç
MDS	Ana Bağlantı Kesme Şalteri
MF	Ana Sigorta
MMC	Çok Kademeli Dönüştürücü
MS	Ana Şalter
MVB	Çok İşlevli Araç Barası
NFPA	Amerikan Yangından Korunma Kurumu
OG	Orta Gerilim
OSA	Araç Üstü Süperkapasitör Dizisi
PEM	Elektrik Gücü Modülü
PF	Güç Faktörünü
PWM	Darbe Genişliği Modülasyonu
Rm	Mıknatıslanma Direnci
SB	Sabit Blok
SCADA	Danışmalı Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
TAS	Trenler Arası Süre

Kısaltmalar**Açıklamalar****TM**

Trafo Merkezi

UC

Ultra Kapasitörler

UIC

Uluslararası Demiryolu Birliği

UITP

Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği

vb.

Ve Benzeri

VAC

Alternatif Akım Voltajı

VDC

Doğrudan Akım Voltajı

v_{hc}

Araç

VLD

Gerilim Sınırlama Cihazı

VVVF

Değişken Voltaj Değişken Frekans

YG

Yüksek Gerilim

 ρ

Hava yoğunluğu

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ısınmanın etkisi ve enerji kaynaklarının hızla tükenmesinden dolayı enerji tasarrufu daha fazla önem kazanmaktadır. Dünyada ve ülkemizde gittikçe artan elektrikli kentsel ulaşım sistemleri için enerjinin de verimli bir şekilde kullanılması her geçen gün daha fazla önem arz etmektedir. New York şehrinde elektrikle çalışan raylı sistemler, 2013 yılı içerisinde 2819 GWh enerji tüketimiyle, şehrin en fazla enerji tüketimine sahiptir. Bu açıdan bakıldığında gelişmiş büyük şehirlerde raylı sistemlerin enerji tüketimlerinin daha tasarruflu kullanılmasının önemi açıkça ortadadır [1].

Bu sebepten Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) demiryolu enerji tasarrufu teknolojilerinin analiz edildiği, sınıflandırıldığı ve değerlendirildiği bir projeyi finanse etmiştir. Bu konuda Mart 2003 tarihinde bir rapor yayınlayarak, şu ana kadar uygulamaya geçirilmiş olan ve potansiyel fayda içeren çeşitli teknoloji ve yaklaşımları belirlemiştir [2]. Benzer şekilde, Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP) de Dünya çapındaki üyeleri ile çeşitli toplantılar düzenlemektedir. Bu toplantılar da şehir içi raylı toplu ulaşım sistemlerinde enerji tüketimini azaltıcı ve maliyetlerini düşürücü tedbirler ile ilgili çalışmalara yapılmaktadır [3]. Üzerinde durulan konular, toplu ulaşım sistemlerinin sürdürülebilir gelişmeye pozitif katkı açısından büyük önem arz etmektedir.

Takribi 5,5 milyon nüfusa sahip olan Ankara'da günlük seyahat sayısı kişi başında 500 bindir. Her gün taşınan yolculukların sadece %15'i raylı sistemler ile yapılmaktadır. Dünya metropollerin de trafik probleminin çözülmesi için yapılan toplu taşımacılık politikalarına bakıldığında raylı sistem ağlarının inşası çok önemli bir parametredir. Bu inşa edilen raylı sistem ağlarının enerji tüketimleri büyük boyutlara ulaşmaktadır. Şubat 2016 itibari ile EGO Genel Müdürlüğü işletiminde 68,446 km uzunluğa sahip raylı sistem hattı bulunmaktadır. Bu hatlar 2013-2018 yılları arasında toplamda yaklaşık olarak 760 milyon kWh aktif elektrik enerjisi tüketmiş ve bunun karşılığı olarak 265 milyon TL serbest tüketici olarak tüketim bedeli ödemiştir. Bu açıdan bakıldığında enerji tüketiminde tasarrufun, raylı sistem işletmecileri için çok önemli bir kazanç haline geldiği görülmektedir. Enerji tasarrufu ile ilgili birçok uygulama yapılmakta veya geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu uygulamalardan en önemli olanlardan biri de şüphesiz rejeneratif frenlemedir. Basit anlatım ile; elektrik motorlarının araçların frenlemesi esnasında mekanik

hareketlerinden dolayı geçici süreliğine oluşturduğu ters güç (Rejeneratif Enerji) frenleme dirençleri yardımıyla söndürülmektedir. Dolayısıyla raylı sistem araçlarının motorlarına verilen enerji, frenleme durumunda elektrik enerjisine tekrar çevrilebilir. Üretilen elektrik enerjisi, bağlı olduğu şebeke koşullarına uygun olarak depolanarak veya senkronizasyon koşulları sağlanarak enerji iletim hatları yardımı ile (katener, rijit katener, üçüncü ray vb.) sisteme geri besleme ile tekrar aktarılabilir. Bu durum rejeneratif frenleme olarak bilinir ve çoğunlukla elektrik enerjisi ile çalışan raylı sistemlerde kullanılır. Bu enerjinin kullanılmayan kısmı araçlar üzerinde var olan veya hat üzerinde bulunan frenleme dirençleri üzerinde yakılmaktadır. Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanım oranı birçok parametreye bağlıdır. Temel parametrelerden biri olarak işletme sıklığı ön plana çıkmaktadır [4]. Rejeneratif frenleme hakkında detaylı bilgiler vermeden önce ulaşım politikaları ve çalışmamızın yapıldığı Ankara şehrindeki ulaşım sistemleri ve metro sistemleri hakkında bilgi verilmektedir.

Sürdürülebilir kent içi ulaşım politikalarının ve ulaşım planlarının geliştirilmesi için kapsamlı ve özverili çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu amaçlara erişmeye olanak verecek hedef ve politikalar ise; taşıtlara değil insana öncelik veren, modern teknolojileri kullanan ulaşım türlerinin kullanılması olmalıdır. Belirtilen hedef ve politikalara uygulanabilirliği ancak toplu taşıma sistemleriyle sağlanabilmektedir. 2014 yılında Birleşmiş Milletler'in yayınladığı Dünya Kentleşme Olasılıkları raporunda yer alan verilere göre dünya nüfusunun %54'ü (3,8 milyar kişi) kentlerde yaşamakta olup, 2050 yılında şehirlerde yaşayan toplam nüfus oranının %66'ya ulaşacağı yönündedir. Bu büyüklükte toplulukların bir arada yaşadığı kentsel alanlarda ulaşım ihtiyacı problemi doğmakta ve şartlara göre bu ihtiyacın planlanarak oluşturulması gerekmektedir. Yeni yüzyılın başından beri kentsel ulaşımın sürdürülebilirliği yönünde de çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların gerçekleştirilmesi için politika ve eylemler ortaya konarak gerçekleştirilmektedir.

Ülkemizde de sürdürülebilir ulaşım sistemleri oluşturulması hususunda çeşitli politikalar uygulanmaktadır. Bu yüzden ülkemizin büyük kentlerinde özellikle son yıllarda iş ve nüfus yoğunluğunun artmasıyla beraber raylı toplu taşıma sistemlerine hızlı bir yöneliş olmuştur.

Raylı Sistemler, karayolu araçlarına göre daha yüksek kapasite imkânı sunan, daha güvenli, enerji tüketimi daha az ve çevre dostu sistemlerdir. Bu nedenlerle kent planlaması

ile uyumlu bir şekilde metro, tramvay ve hafif raylı sistem hatlarının yapılması, o kentin geleceği için hayati bir sürecin başlangıcını oluşturmaktadır.

Raylı sistem yatırımları, kentsel gelişmeye etkileri nedeniyle, kentsel yenileme, canlandırma ve dönüşüm gibi projelerde de başlıca planlama aracı olarak kullanılmaktadır. Türkiye'nin başkenti Ankara'da artan ulaşım talebini karşılamak amacıyla raylı sistem yatırımlarına önem verilmiştir [5].

2016 Ocak ayı EGO verilerine göre Ankara'da günlük yolculukların yaklaşık yüzde 57,1'i toplu taşıma sistemleriyle, yüzde 42,9'u ise bireysel ulaşım sistemleriyle yapılmaktadır. Toplu taşıma sistemleri kendi arasında değerlendirildiğinde ise minibüs ve dolmuşların yüzde 17,3'lik bir oranla ilk sırada geldiği, yüzde 14,0 ile servis araçlarının, yüzde 12,2 ile belediye otobüslerinin, yüzde 6,2 ile halk otobüsü ve özel toplu taşıma araçlarının, yüzde 6,7 ile de metro ve hafif raylı sistemlerin takip ettiği görülmektedir. Ankara'da 2016 Ocak ayında iş günü yolcu sayılarının toplu taşıma türlerine göre dağılımı Çizelge 1.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. Ankara'da ulaşım istatistikleri

Türler	Araç Sayısı	Taşınan Yolcu Sayısı	Yolcu Genel %	Yolcu Toplu Taşıma
Ego Otobüs	1.809	762.907	12,2	21,4
Ankaray	3*11=33	118.813	2,1	3,7
Metro	Bombardier 6*18=108 CRRC 3*19=57	261.534	4,6	8,1
Banliyö Treni	51	36.000	0,6	1,1
Minibüs-Dolmuş	2.231	982.000	17,3	30,3
Servis Aracı	7.200	792.000	14,0	24,5
Özel Halk Otobüsü	200	220.000	3,9	6,8
Özel Toplu Taşıma Aracı	69.300	69.300	1,2	2,1
İlçe Özel Toplu Taşıma Aracı	169	29.400	0,5	0,9
Toplu Taşıma Toplam	12.947	3.237.889	57,1	100,00
Taksi	7.701	308.000	5,4	-
Otomobil	1.135.650	2.129.350	37,5	-
Genel Toplam	-	5.675.239	100,00	-

Günlük, aylık ve yıllık yolcu verileri incelendiğinde, yaklaşık bir hesap yapılarak, 2015 yılında minibüs ve dolmuşlarla 440 milyon, otomobiller ile 650 milyon, belediyeye ve şahıslara ait otobüslerle 389 milyon, raylı sistemler ile 121 milyon yolcu taşındığı söylenebilir. Ulaşımın çoğunlukla otomobil, minibüs ve dolmuşlar ile yapılması yaklaşık 5,5 milyonluk nüfusa sahip olan Ankara'da ulaşımının sürdürülebilirlikten uzak olduğunu göstermektedir.

Ankara şehrimiz raylı sistemler açısından ülkemizin önde gelen illeri arasındadır. Ankaray Hafif Raylı Sisteminin temeli 1992 yılında atılmıştır ve 1996 yılında tamamlanmıştır. Ankaray Hafif Raylı Sistemi 8.527 m hat uzunluğundan ve 11 istasyondan oluşmaktadır. Ankaray çift yönde saatte 54.000 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Ankaray güzergâhının 215 m'si hemzemin, 410 m'si yarma, 1.757 m'si delme tünel, 4.920 m'si ise aç-kapa tünel şeklinde, inşa edilmiştir. Ankara Metrosu, 29.03.1993 tarihinde temeli atılmıştır. 28.12.1997 tarihinde Kızılay-Batıkent arasındaki hatta Ankara Metrosu ticari işletmeye açılmıştır. Ankara Metrosu Kızılay-Batıkent (M1) hattı 14.661 m hat uzunluğundan ve 12 istasyondan oluşmaktadır. Tek yönde saatte 70.000 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Ankara Metrosu M1 hattının 1.731 m'si hemzemin, 2.088m.'si yarma, 3.025 m'si delme tünel, 2.591m.'si aç-kapa tünel, 3.210 m'si ise viyadük şeklinde inşa edilmiştir.

Söz konusu iki raylı sisteme ilaveten M2 (Kızılay-Çayyolu) ve M3 (Batıkent-Sincan) Metro hattının yapımına sırasıyla 2002 ve 2001 yıllarında başlanmış olup 2014 yılında tamamlanmıştır. M2 (Kızılay-Çayyolu) Metro hattı toplam 16.590 metre hat ve 11 istasyondan oluşmaktadır. M3 (Batıkent-Sincan) Metro hattı toplam 15.360 metre hat ve 11 istasyon olarak hizmete açılmıştır. M4 (Tandoğan-Keçiören) Metro Hattı ise 10.582 metre hat ve 11 istasyon olarak projelendirilmiştir ve hattın yapım çalışmalarına 15.07.2003 tarihinde başlanılarak 05.01.2017 yılında tamamlanmıştır [6].

Yenimahalle-Şentepe arasında teleferik hattı yolcu taşıma amacıyla yapılmıştır. Test sürüşlerine 15 Mart 2014 tarihinde başlanmış olup, Teleferik hattının 17 Haziran 2014 tarihinde 1. Etabı açılmıştır. 20 Mayıs 2015 tarihinde ise 2. etabı da işletmeye açılarak hizmet vermeye devam etmektedir. Teleferik sisteminde günlük ortalama 12 Bin vatandaşımıza hizmet verilmektedir.

Şu an EGO Genel Müdürlüğü tarafından Havaray projesinin çalışmaları devam etmekte olup, Ulaştırma ve Denizcilik Bakanlığı tarafından da M-5 Havaalanı metro hattının projelendirilme çalışmaları Ankara ili için devam etmektedir.



Resim 1.1. Ankara Büyükşehir Belediyesi raylı sistemler ağı haritası



2. LİTERATÜR TARAMASI

Bombardier (2003), tarafından yapılan çalışmada, Mannheim prototip bir hafif raylı aracı (LRV), Bombardier Transportation'ın MITRAC Enerji Tasarrufu sistemini kullanarak çatıya monte edilmiş bir superkapasitör ünitesi ile mekanik fren enerjisini depolamak için kullanılmıştır [7]. Her biri 2700 F/2.7 V'lık üç paralel hatla birbirine bağlı 192 kondansatörden oluşmaktadır. Bu devre, 1.5 kWh'lik bir enerji sağlamaktadır. Tren harekete geçeceği sırada bu araç üstü superkapasitörlü sistem kalkış için 600 kW'lık güç sağlamaktadır ve bu elde edilen güç sayesinde kataner hatlarından enerji almaya ihtiyaç duymaksızın 1 km'ye kadar araç ilerleyebilmektedir [8].

Alstom (2006), tarafından yapılan çalışmada, Paris'te T3 yolu üzerindeki bir tramvay, 2009'dan beri Alstom'un "STEEM" adlı bir enerji yenileme sistemi ile çalışmaktadır [9]. Sistem, frenleme enerjisini depolamak için 48 adet çatıya monte edilmiş superkapasitörlerden oluşmaktadır. Trenlerin, hat güzergahının bir bölümünde katener sistemi olmadan çalıştırılmalarını ve istasyonlarda durduklarında şarj edilmelerini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Testler sırasında, trenlerin ortalama olarak yaklaşık %16 daha az enerji kullandığı görülmüştür [9].

Gemici (2006), tarafından yapılan çalışmada, enerji depolama sistemlerinin raylı ulaşım tesislerine uygulanabilirliği incelenmiştir. Kent içi raylı ulaşım sistemleri DC LRT sistemi çerçevesinde anlatılmış, ayrıca enerji depolama sistemleri ile faydalı frenleme enerjisi açıklanmıştır. Sonuçta hafif raylı sistemlere uygulanacak enerji depolama sistemlerinin yatırım maliyetlerinde tasarruf sağlanması ve işletme maliyetlerini azaltabilmesi sonucuna varılmıştır [10].

Brenna ve diğerleri (2007), tarafından yapılan çalışmada, raylı sistem araçlarının enerjiyi kullanım döngüsünü karakterize etmektedir. Metro trenlerinin birçok fren aşaması sırasında enerjinin bir bölümünü kullanmak ve elektrik tasarrufuna odaklanmaktadır. Bu araştırmanın amacı hem teknik hem de ekonomik açıdan fren enerjisini kullanmak için en iyi çözümü bulmaktır. Bu nedenle, superkapasitörler gibi yeni enerji depolama teknolojileri çalışılmıştır [11].

Bae ve diğerkleri (2007), tarafından yapılan çalışmada, Seul 2 numaralı hat ve Kwangju 1 numaralı hattında çalışan iki trafo merkezindeki rejeneratif enerjinin analiz sonuçları incelenmiştir. DC hat voltajı ve enerjiyi besleyen akımları, dört besleyici için tkutilen ve şebeke geri besleme gücünü hesaplamak için bir gün boyunca ölçülmüştür. Daha sonra diğerk hatlardaki enerji sistemlerinde tkutilen bir miktar rejeneratif enerji hesaplamıştır. Sonuç olarak, rejeneratif enerjinin yeniden kullanılması nedeniyle enerji tüketimindeki maliyet düşüşü tahmin edilmiştir [12].

Park ve diğerkleri (2007), tarafından yapılan çalışmada, raylı sistem araçlarının frenleme esnasında üretilen rejeneratif enerjisinin DC hattının voltajını arttırmamasından kaynaklı problemlerden bahsedilmiştir. Bu sebeple, rejeneratif enerjinin depolanmasının ve verimli kullanılmasının önemine hitaben elektrikli araç sistemlerinde kullanılan çift yönlü DC/DC konverter kontrol algoritması tasarlamıştır. Yapılan bu tasarımla rejeneratif fren enerjisinden yararlanmak istenilmiştir. Sonuç olarak, prototip model oluşturularak çift yönlü DC/DC konverterin verimliliğı ispatlanmıştır [13].

Latkovskis ve Grigans (2008), tarafından yapılan çalışmada, elektrikli ulaşım sistemlerinde güç kaynağı şebekesinde kullanılmayan rejeneratif fren enerjisinin rezervlerinin bir kestirimini sunuyor. Çalışmada olasılık tahmini ilkelerine, araç zaman çizelgesine ve ölçülen g şemalarına dayanan bir yöntemle yapılmıştır. Kullanılmayan rejeneratif enerji miktarı, Letonya Riga'daki T3A tramvaylarını besleyen iki trafo merkezi için g ölçüm tekniğı ile hesaplanmaktadıştır. Çalışmanın sonucunda, günümüzde ve gelecekte rejeneratif enerjinin kullanımı ekonomik açıdan hesaplanmıştır [14].

Szenasy (2008), tarafından yapılan çalışmada, yenilenebilir bir enerji için modelleme ve simülasyon kullanımı üzerinde durulmuştur. Elektrikli taşıtların performansını arttırmak için bir enerji depolama sistemi sunulmuştur. Süperkapasitörler elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme ile ilişkili çok hızlı enerji geri kazanımına katkıda bulunmaktadırlar. Bu g sistemi, minimum enerji kaybıyla aracın hızlanmasını ve yavaşlamasını sağılamaktadır. Elektrikli raylı sistem hatlarındaki kısa mesafeli durak aralıkları, frenlemeden enerji geri kazanımının toplam enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabileceğı vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, şehir içi raylı sistem araçları için Matlab-Simulink'in simülasyon modelinin sonuçları ve kapasitansın ihtiyaç değerkini azaltma yöntemi sunulmuştur [15].

Jisheng ve Xiaoqing (2008), tarafından yapılan çalışmada, Şehir içi raylı sistem araçlarının çalışma modunu analiz ettikten sonra, rejeneratif enerjiyi depolama sistemi kullanmanın gerekliliğini açıklamıştır. Daha sonra enerji depolama elemanı olarak Ultra-kapasitörü kullanan yeni bir rejenerasyon frenleme sistemi önermişlerdir. Sistem de rejenerasyon fren sistemi tarafından üretilen enerjiyi kondansatörün depolayabildiğinden emin olmak için, Ultra-kapasitör ve çekiş inverteri DC linki arasında çift yönlü dönüştürücü kullanılmıştır. Dolayısıyla hareket halinde araç olduğu zaman inverter, DC beslemesine enerji sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu sistemin hafif raylı sistem araçlarının frenleme esnasında rejeneratif frenlemeyi gerçekleştirmesini ve enerji tüketimini azalttığı tespit edilmiştir [16].

Ustaoğlu (2009), tarafından yapılan çalışmada, İstanbul Metrosu araçlarının frenleme esnasında ortaya çıkardığı rejeneratif enerjinin geri kazanımı için nasıl bir enerji kazancı elde edilebileceği araştırılmıştır. Simülasyon programları ile İstanbul Metrosu hattında farklı sayıda trenler için çizelgeler oluşturulmuş, enerji kazancının en fazla olduğu durumlar bulunmuştur. Yapılan simülasyonlarla, kullanılan ve kaybedilen rejeneratif enerji miktarları gözlenerek en uygun sonuca yaklaşılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, yapılan çalışmada kilometre başına tüketilen enerji miktarında %12,9'luk bir azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, trenler arasında sağlanacak senkronizasyonun rejeneratif enerjinin kullanımı için önemli olduğu ortaya konulmuştur [17].

Nasri ve diğerleri (2010), tarafından yapılan çalışmada, istasyonlarda trenlerin frenleme esnasında açığa çıkan rejeneratif enerjisini tamamen kullanmak için, trenlerin hareketi için optimize edilmiş bir zaman çizelgesi önerilmiştir. Seçilen bir metro sistemi simüle edilerek ve genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Sefer ve seyir sürelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi araştırılmış ve örnek metro sistemi için optimize edilmiştir. Sefer ve seyir zamanları, metroya ait toplam enerji tüketimini optimize etmek için belirlenmiştir. Sonuçta, optimize edilen değerlerin sonuçları, çalışmada önerilen yaklaşımı göstermek için mevcut olan değerlerle karşılaştırılmıştır [18].

Grbovic (2011), tarafından yapılan çalışmada, matris dönüştürücüler gibi sıradan çözümlerin yanı sıra, tahrik sistemleri gibi bazı uygulamalarda, enerji depolama elemanı ile donatılmış normal diyotlu ön uç tahrik konvertörüne dayalı bir yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşım son zamanlarda ultrakapasitörler olarak adlandırılan elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörlerin hızla gelişmesi üzerine odaklanıyor. Sistem

esnekliği ve daha iyi verim elde etmek için, ultrakapasitörler bir dc-dc dönüştürücü aracılığıyla sürücüye bağlanır. Dönüştürücü, kontrol sisteminin hedeflerini karşılayacak şekilde yani DC-bus voltajının kontrolü, ultrakapasitör şarj durumu ve maksimum güç filtrelemesi gibi durumlarda kontrol edilir. Bu çalışmada, ultrakapasitörü enerji depolama ve acil durum güç kaynağı aygıtı olarak kullanarak rejeneratif kontrollü elektrikli tahrik modelleme ve kontrol yöntemleri tartışılmıştır. Sonuç olarak ortaya çıkan kontrol şeması ve simülasyon ile 5.5 kW'lık prototip bir model üzerinde bir dizi deney ile doğrulanmıştır [19].

Tseng ve Shiao (2012), tarafından yapılan çalışmada, Taipei şehrindeki hızlı tren hatlarında (TRTS) kullanılan Elektriksel Çoklu Birimlerin (EMU) rejeneratif fren gücü modu ile rejeneratif olmayan frenleme gücü modu arasındaki güç değişimlerini araştırmaktadır. Aynı zamanda, rejeneratif frenleme gücünün optimum kullanımını bulmayı, hatların inşaat aşamasında trafo kapasitesinin makul bir şekilde planlanmasını sağlamakla kalmayıp aynı zamanda elektrik tesisatlarının yüklenmelerini de etkili bir şekilde azaltmayı hedeflemektedir. [20].

Dominguez ve diğerleri (2012), tarafından yapılan çalışmada, enerji tüketimini ve maliyetleri düşürmek için hangi sistemin yatırım yapacağını bulmaktır. Birincisi, metro hatlarının ATO (Otomatik Tren İşlemleri) hız profillerinin yeniden tasarlanmasıdır. Ayrıca, enerji ölçümleri de dikkate alınmıştır. Hız profilleri tasarlandıktan sonra ikinci olarak araç üstü enerji depolama aygıtının uygulanması değerlendirilmiştir. Rejeneratif enerjiden yararlanmak amacıyla, ek kütlesine bağlı olarak, dahili bir depolama aygıtına yatırım yapmanın ekonomik ve enerjik avantajları incelenmektedir. Sonunda her iki yaklaşımda birleştirilir ve elde edilen hız profilleri araç üstü enerji depolama sisteminin uygulanmasıyla daha da verimlidir. Madrid şehrinin 10 numaralı Metro hattındaki ölçümlerle yapılmıştır. Çözümler, sadece hız profillerinin yeniden tasarımı ile yaklaşık %25 enerji tasarrufu beklediğini göstermiştir. Buna ek olarak, bu optimal hız profilleriyle beraber, araç üstü bir enerji depolama aygıtı da eklendiği haliyle enerji hesaplarını da göstermektedir [21].

Killer ve ark. (2012), tarafından yapılan çalışmada, şehir içi raylı sistemleri için bir enerji depolama sistemi olarak ultrakapasitörlerin kullanımı araştırılmıştır. Temel olarak trenlerin frenleme işlemi sırasında üretilen enerjinin boşa harcanmadan ve ısıya dönüştürülmeden

tekrar kullanılmasıdır. Metro sistemine bağlı sabit bir ultrakapasitör sisteminin davranışını analiz etmek için bir güç sistemi benzetimi yapılmıştır. Ultrakapasitör modülleri boyutlandırılmış, güç elektroniği elemanları ayarlanmış ve ayrıca bir kontrol sistemi kurulmuştur. Aynı zamanda, rejeneratif enerjinin ultrakapasitörün teknik özelliklerinin şarj ve boşalma davranışına bağımlılığı gösterilmektedir. Ayrıca yapılan simülasyondaki kullanıcı ara yüzü ile çok sayıda parametrenin değiştirilmesini kolaylıkla sağlamaktadır. Şehir içi raylı sistemlerinin ultrakapasitör yardımcı rejeneratif frenlemesini analiz etmek için bilimsel bir yöntem sağlanmıştır. Örnek olarak, Kolombiya'daki Medellín Metro'sunda uygulanabilirliği ve ekonomik açıdan faydaları tahmin edilmiştir [22].

Shen ve diğerleri (2013), tarafından yapılan çalışmada, Yerleşik enerji depolama sistemi (ESS) kentsel demiryolu geçişinde önemli bir enerji tasarrufu sağlayan teknoloji olduğundan bahsedilmiştir. İlk olarak, araç üstü superkapasitör diziyi (OSA) kapasite kısıtlı yapılandırma yönteminin sınırlamaları araştırılmıştır. İkincisi, frenleme enerjisinin geri kazanılabilmesi için, güç ve kapasite kısıtlamaları dikkate alınarak OSA'nın matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Son olarak, güç ve kapasiteye bağlı yapılandırma metodolojisi önerilmektedir (P & C-Yöntemi). Sonuçta elde edilen verilerle, önerilen P & C Yöntemi ile OSA'nın emilen fren enerjisinin, rejeneratif fren kazanımını gerçekleştirebildiğini ve yüksek bir enerji tasarruf etkisine sahip olduğunu göstermektedir [23].

Fazel ve diğerleri (2014), tarafından yapılan çalışmada, rejeneratif frenleme ve geri dönüşümlü trafo merkezleri kullanılarak farklı senaryolarda enerji açısından verimli bir yöntem önerilmiştir. Daha sonra, bu öneri tipik bir metro hattında test edilmiştir. Simülasyonu yapılan metro hattındaki enerji tüketiminin, rejeneratif enerji geri kazanımını ve farklı senaryolar için geri dönüşümlü trafo merkezleri uygulaması yoluyla yaklaşık olarak % 33'e kadar düşürülebileceği sonucuna varmaktadır [24].

Moghbeli ve diğerleri (2016), tarafından yapılan çalışmada, Esfahan şehir içi demiryolu hattında rejeneratif frenleme koşullarında bir hibrid elektrik enerjisi deposunun (HEES) tasarımını ve simülasyonunu yapmışlardır. HEES, pil ve süper kondansatörden oluşmaktadır. Süperkapasitör ve akünün kapasitesi, diğer trenlerin ivmelenmesi, normal yolculuk sırasında tükettikleri güç ve frenleme sistemleri dikkate alınarak her bir trenin geri besleme fren enerjisine dayanılarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, rejeneratif

frenleme enerjisini süperkapasitör-akümülatörde depolanması ve yardımcı sistemleri beslemek için DC / DC dönüştürücüler kullanarak hazırlanan bir algoritma ile kontrol sistemi oluşturmuştur. MATLAB / Simulink ile hazırlanan simülasyondaki sonuçlar ile sunulan algoritma ve kontrol sisteminin etkin performansını doğrulamışlardır [25].

Bu tez çalışmasında üzerinde durulan konu, raylı sistemler için rejeneratif enerji ve rejeneratif enerjinin depolanması olacaktır. Bu konu da Ankara metrosu Kızılay-Çayyolu Hattında enerjinin üretildiği orta gerilim seviyesinden iletilmesinden dağıtımına kadar, bu aşamalara gelene kadar kullanılan tüm malzeme ve ekipmanlar hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Aynı zamanda trenlerde bulunan bazı ekipmanlar tanıtılacak olup, frenleme sistemleri anlatılacaktır. Bunların yanı sıra şehir içi raylı sistemlerinde enerji tasarrufu için alınması gereken tedbirler hakkında bilgiler verilecektir. Çok az sayıda kişinin içinde bulunabildiği bir metro hattı hakkında araştırmacıların bilgi sahibi olmaları amaçlanmıştır.

Yöntemin faydası özellikle işletmeye alınacak yeni hatlarda ortaya çıkmaktadır. Normal olarak sürücülerin yeni açılan hattı tanıyarak, zamanla en iyi olmasa da iyi sayılabilecek bir enerji verimli sürüş yöntemini uzmanlıkları ile geliştirebilmektedirler.

Önerilen yöntemle, uzun bir süre alan bu deneme yanılma çalışmaları yapılmadan daha ilk günden itibaren enerji tasarruflu sürüş gerçekleştirilebilecektir. Aynı husus otomatik sürüş, kontrollü sistemlerde enerji tasarruf miktarının, daha da iyileştirilmesi için kullanılabilir.

Özellikle yapılan bu çalışma ile hat üzerinde rejeneratif enerjinin en yüksek kazanç oranına sahip olduğu hallerde bile yakılan enerjinin ultra-kapasitörler ile depolanmasının faydası gösterilecektir. Rejeneratif enerjinin ultra-kapasitörler kullanılarak depolanması konusunda daha sonraki çalışmalara ışık tutacak ve sorunların gelecekte daha hızlı çözülmesine de olanak sağlayacaktır.

3. ANKARA DA KULLANILAN RAYLI SİSTEMLER

3.1. Hafif Raylı Sistem

Hafif Metro Sistemi şehir içi raylı toplu taşımacılık sistemleri arasında önemli bir ulaşım aracıdır. Hafif demiryolu transitleri (LRT), metro sistemleri ve ağır demiryolları için kullanılanlardan daha az büyük olan ekipman ve altyapıyı kullanan belirli bir şehir içi ve banliyö yolcu demiryolu sınıfıdır. Bu nedenle, LRT ve metro sistemleri arasındaki ana fark, ekipman ve altyapının büyük kullanımındır. UITP, LRT'yi, modern bir tramvaydan tünellerde veya zemin seviyesindeki bir nakliye adım adım geliştirilebilen izlenmiş, elektrikle çalışan yerel ulaşım aracı olarak tanımlamaktadır.

LRT sistemleri evrensel olarak genellikle havai hatlarla iletilen elektrikle işletilmektedir. Bununla birlikte, Resim 3.1'de de görüldüğü gibi Ankaray trenlerinin elektrik enerjisi için kullandığı standart üçüncü ray sistemleriyle de işletilmektedir.



Resim 3.1. Ankaray hafif raylı sistemi araçları

Benzer bir zaman periyodunda veya araç başına taşınan yolcu sayısı ile ilgili olarak, LRT ve metro sistemleri arasındaki en büyük fark, yolcu taşıma kapasitesidir. Maksimum yolculuk kapasiteleri saatte 35.000 yolcu/yön şeklindedir. Daha az yolcu kapasitesiyle tasarlanan sistemlerin "daha hafif" olduğu düşünülür. Araçların hızı, bu sistemlerin

sınıflandırılmasında başka bir ifade olabilir. LRT sistemleri ağır raylardan daha dik duran eğimleri, eğimi ise sokak kavşaklarında uyacak şekilde keskinleştirebilirler. Bunlar genellikle küçük, hafif tren veya tek araba ile sıklıkla hizmet veren kentsel alanlarda inşa edilmiştir.

3.2. Metro Sistemi

Dünyadaki birçok büyük şehirde ana toplu ulaşım sistemi olarak çalıştırılmakta olan metro sistemleri, şehir içi toplu ulaşım sistemleri arasında en yüksek yolculuk kapasitelerine sahip ulaşım sistemleridir.

Uluslararası Toplu Taşıma Birliği (UITP), metroyu "kendi başına (geniş yer altı veya yükseltilmiş bölümler) ayrılmaz, sürekli raylı yatağa sahip olan, izlenen, elektrikle çalışan yerel ulaşım aracı" olarak tanımlamaktadır. Metropoller, diğer trafik, yol veya yaya yollarından tamamen bağımsızdır.



Resim 3.2. Ankara metrosu eski ve yeni araçlar

Büyükşehirlerde, yüksek kapasiteli en iyi toplu taşıma modudur. Dünyanın farklı yerlerinde metro sistemleri Yeraltı, Metro, Kentsel, Hızlı Transit veya Tüp olarak da bilinir; Metro terimi, aynı tür transit sistem için kullanılan çeşitli isimleri

genelleştirmektedir. Başka bir deyişle, bir metro sistemi tamamen ayrılmış bir sistemdir. İstasyonlar arasındaki aralıklar tipik olarak 1 km'den daha fazladır ve genel olarak daha yüksek bir ticari hız sağlamaktadır. Yoğun saatlerde yolcu kapasiteleri 100.000 yolcu/yön'e kadar ulaşabilmekte olup, 40 sefer olarak işletilebilmekte ve bu sayede yüksek miktarda yolcunun hızlı bir şekilde ulaşımı sağlanabilmektedir. Bu büyük taşıma kapasitesi metro ve LRT sistemleri arasındaki ana farkı göstermektedir. Bu nedenle UITP, metro sistemlerinin LRT'ye göre daha ağır yatırımlar gerektirdiğini ve talebin sermaye maliyetini haklı kıldığı büyük şehirlerde uygulanabileceğini belirtmiştir.

Metro hatlarında genelde 4 akslı, 16–23 metre uzunluğa ve 2,5–3,2 metre genişliğe sahip tipik metro araçları kullanılmakta olup, bu araçlar 120–250 kişilik yolcu kapasitesine ve yüzde 25–60 arası koltuk kapasitesine sahiptir. Ortalama işletme hızı 25–60 km/saat civarındadır. 6–10 araçlık tren setleriyle saatte 20–40 arası sefer yapabilen bu sistemler ile Ankara Metrosunda olduğu gibi saatte tek yönde 70.000'in üzerinde yolcu taşınabilmektedir. Metro sistemlerinde teorik olarak 90 saniye aralıkla 2500 yolcu kapasiteli 10 araçlı dizilerin işletilmesiyle saatte tek yönde 100.000 yolcu kapasitesine ulaşılabilse de bu durum pratikte uygulanabilirliğini yitirmektedir. [26] Çizelge 3.1'de Ankaray ve Ankara metroları araç bilgisi gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Ankaray ve Ankara metroları araç bilgisi

Araç Özellikleri	Ankaray 	Metro-1 	Metro-2 	Metro-3 
Araç Boyu (m)	29	22.78	22.88	22.88
Araç Eni (m)	2,65	3,15	3,15	3,15
Araç Yüksekliği (m)	3,465	3,64	3,18	3,18
Araç Ağırlığı (t)	40,5	32,459	40,6	40,6
Araç Kapasitesi (6 Kişi/m ²)	308 (60 yolcu oturan)	275 yolcu (64 yolcu oturan)	275 yolcu (64 yolcu oturan)	275 yolcu (64 yolcu oturan)
Dizideki Araç Sayısı	3	6	6	6
Enerji (VCD)	750	750	750	750
Ticari Hız (km/saat)	38	38	38	38
Max. Hız (km/saat)	80	80	80	80

Çizelge 3.1. (Devam) Ankaray ve Ankara Metroları araç bilgisi

Günlük Çalışma Süresi (saat)	18	18	18	18
Doruk Süresi (saat/gün)	4	4	4	4
Uygulanabilir Kapasite (Yolcu/saat/yön)	27.000	70.000	70.000	70.000
Dolaşım Süresi (dk)	31	48	55	48
Seyahat Süresi (dk)	13	22	25	22

3.3. Raylı Sistemler Enerji Tüketimleri

Raylı sistemler diğer ulaşım sistemleri arasında belki de en önemli vasıtalarlardır. Dolayısıyla Metro sistemleri sürdürülebilir kent içi ulaşım politikaları bakımından toplu ulaşımın geliştirilmesi açısından çok önemli yer tutmaktadır. Diğer toplu taşıma sistemlerine göre yüksek yapım maliyetine karşın özellikle nüfusun yoğun olduğu büyük şehirlerde kişi başına işletme maliyeti ve seyahat süresi ile konfor, enerji tüketimi, emniyet, güvenlik, gaz emisyonu ile dakiklik gibi özellikleri ele alındığında doğru seçilen bir güzergahta kurulması kaydıyla metro sistemleri kent içi ulaşımın en önemli araçlarından biridir.

Metro sistemlerinin diğer toplu taşıma sistemlerine kıyasla bazı önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yolcu taşıma kapasitesinin yüksek olması
- Elektrik enerjisi kullanıldığından dolayı araçların sera gazı emisyonunun olmaması
- Kendine ait bir hatta hareket ettiğinden ötürü şehir içi trafiğine olumsuz yönde etki etmemesi
- Şehir içi ulaşımında hızlı, konforlu, emniyetli ve dakik bir ulaşım sağlaması şeklinde sıralanabilir.

Ankara büyükşehir belediyesinin şehir içi toplu taşımada kullandığı metro ve hafif raylı sistemlerinde sistemlerin de yapılan bir araştırmada, enerji verimliliği yönünden taşınan yolcu sayısı, sefer sayısı ve tüketilen enerji miktarları çizelge 3.2 ve çizelge 3.3’de ki değerler bulunmuştur.

Çizelge 3.2. Ankaray işletme dönemi toplam istatistikleri

Ankaray İle İlgili İstatistik Bilgiler			
	Yolcu Sayısı (Kişi)	Harcanan Enerji (Kwh)	Yapılan Sefer (Tur)
1998	46.314.659	18.825.184	61.342
1999	41.837.873	19.017.522	61.049
2000	35.994.344	18.826.663	60.889
2001	40.133.589	18.671.004	61.944
2002	35.511.894	17.483.989	61.431
2003	36.974.956	16.134.553	62.507
2004	39.556.061	15.019.673	61.301
2005	40.078.899	20.163.598	61.193
2006	41.674.242	16.238.060	61.694
2007	44.646.512	18.861.203	61.298
2008	44.364.026	17.080.820	63.756
2009	37.019.914	15.567.182	62.632
2010	34.991.529	17.174.957	64.374
2011	34.591.585	17.926.980	61.482
2012	37.862.314	16.906.073	61.040
2013	35.107.331	17.267.855	60.793
2014	37.078.547	15.048.572	61.149
2015	38.537.129	17.348.629	61.425
2016	34.353.751	18.592.540	63.520
2017	37.169.329	18.562.018	62.271
2018	37.286.821	18.587.974	63.031
TOPLAM	748.821.724	333.991.419	1.179.136

Çizelge 3.3. Ankara metroları işletme dönemi toplam istatistikleri

Ankara Metrosu (M1, M2, M3, M4) İle İlgili İstatistik Bilgiler			
	Yolcu Sayısı (Kişi)	Harcanan Enerji (Kwh)	Yapılan Sefer (Tur)
1998	50.133.405	40.042.680	62.879
1999	50.715.518	37.677.388	59.641
2000	45.951.204	37.306.782	56.328
2001	48.933.272	37.360.182	52.223
2002	43.535.408	37.214.080	52.966
2003	46.677.954	42.814.451	53.310
2004	53.168.981	37.921.973	53.292
2005	54.306.947	42.436.809	52.739
2006	58.502.336	35.512.756	53.729
2007	64.237.405	36.179.444	53.712
2008	65.439.511	43.294.428	56.802
2009	57.951.714	35.895.514	57.501
2010	56.721.951	37.071.099	57.920
2011	57.042.146	36.182.321	57.338
2012	56.631.842	39.958.763	59.019
2013	54.316.166	40.412.870	58.307
2014	66.367.092	68.318.590	102.789
2015	82.849.480	74.457.240	139.701
2016	75.088.984	76.674.700	143.350
2017	94.111.236	94.644.394	192.028
2018	101.099.900	98.359.785	201.746
TOPLAM	1.013.482.332	760.057.369	3.140.196



4. RAYLI SİSTEMLERDE REJENERATİF ENERJİ

Tez çalışmasının bu bölümünde ilk olarak Ankara da ulaşımın genel ve istatistiksel bilgileri verilmiştir. Ayrıca ulaşım türlerinin şehrin bütün ulaşımındaki yüzdelik payına değinilmiş ve metro hatları hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Bu bölümde geri kazanımlı frenleme enerji elde edilene kadar geçen süreçte akımın, elektrik dağıtıcısı firmadan metro istasyonuna gelmesi, ardından ekipmanlara dağılarak istasyon içerisinde ve metro araçlarının beslenmesinde izlediği yol sunulacaktır. Aynı zamanda frenleme enerjisinin oluşması için araç içerisinde ve istasyonlarda kullanılan bütün ekipmanlarında tanıtımı yapılacaktır.

4.1. İstasyonlarda ve Hatta Enerjinin Tüketimi

Dünya genelinde raylı sistemler için cer elektrik gücü kullanılmaktadır. Raylı sistemlerde trenin hareketi için ve diğer yardımcı elemanların beslenmesi için gerekli olan güç “CER Gücü” olarak adlandırılmaktadır. Raylı Sistemlerin enerji tüketimi yolcuları taşıyan trenlerin tahriki yani cer gücü trafo merkezi güç talebi tren yüküne, tren sefer sıklığına, bu merkezden beslenen ray hattı sayısına bağlı olarak değişmektedir. Trenin çektiği enerji ise, trenin hızına ve ray profillerine bağlı olarak değişmektedir. Cer gücü haricinde raylı sistemlerinin enerji tüketimini yardımcı güç sistemlerin beslenmesi olarak da gruplandırabiliriz. Yolcu istasyonları ile buralara erişim sağlayan alanların enerji ihtiyacını sağlayan yardımcı güç sistemlerin beslenmesi aynı zamanda sistemin kendi iç ihtiyaçları ve bakım tesislerinin tüketimi de bu sınıfa dâhildir.

Bu iki grubun enerji tüketim oranları sistemden sisteme belirtilen sebeplere göre değişkenlik arz etmektedir. İstasyonları ve bütün hattı ile yeraltında olan metro sistemlerinde tüketilen enerjinin yaklaşık yarısı yardımcı güçler tarafından kullanılmakta iken hemzemin veya viyadük metro sistemlerinde yardımcı güç tüketimi daha düşük değerlerde olduğu söylenebilir.

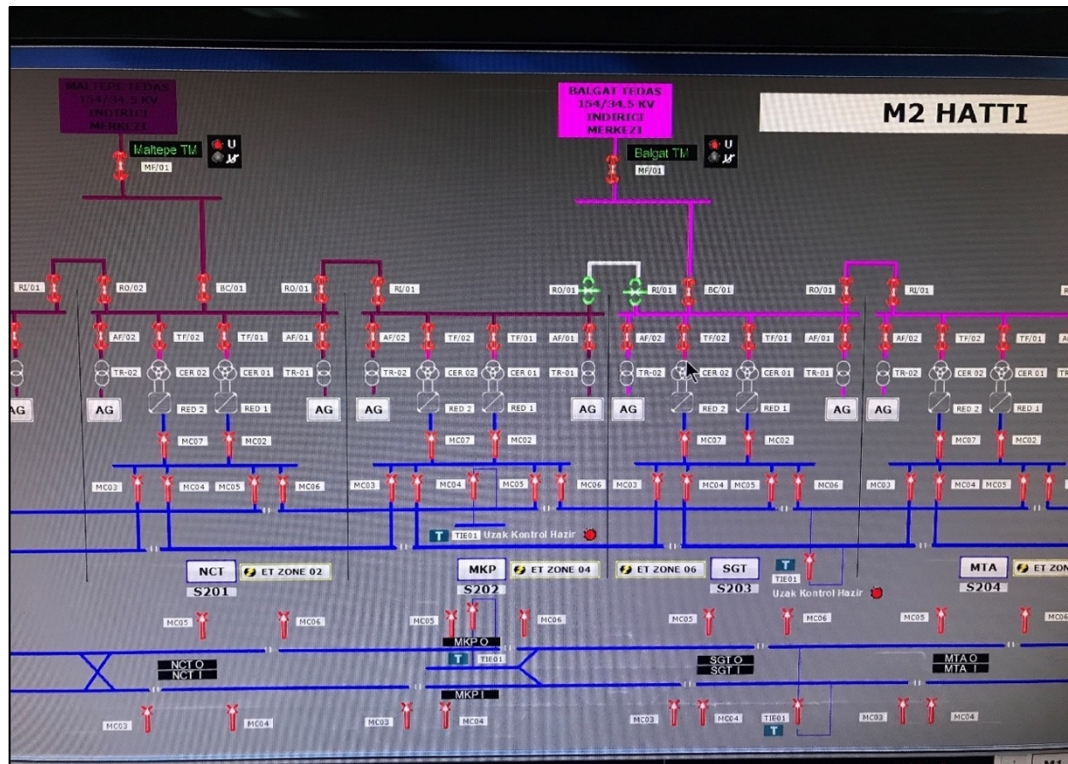
M2 Çayyolu-Kızılay Metro hattı için Maltepe, Balgat ve Ümitköy (154/34,5kV indirici merkezleri) merkezlerinden alınan 34,5 kV’luk enerjiyi tek kol fiderlerle; CER trafosuna, iç ihtiyaç trafolarına ve enerji ihtiyacı olan tüm ekipmanlara enerji dağıtımı yapılırken

kullanılmıştır. Bütün cer trafo istasyonları çift trafo doğrultucu grubuna sahiptir. Aynı zamanda bütün istasyonlarda iki iç ihtiyaç trafosu bulunmaktadır ve bunlardan herhangi birinin bara sistemleri acil durumlarda tüm yükleri besleyebilecek yeterliliktedir. Bütün trafo istasyonları, ekipman, kablolar, şalt cihazları, ölçme, gözleme, transducerler; 90 saniye dizi aralığı ile çalışacak tren sayısına göre tasarlanmış ve tesis edilmiştir. Tesis edilen sistemin işletme hedefleri açısından bazı kriterler bulunmaktadır. Bunlar;

- DC enerjinin cer trafo merkezlerinin herhangi birinden kesilmesi halinde, trenlerin devamlı normal çalışmaları bundan etkilenmemesi,
- DC enerjinin cer trafo merkezlerinin bitişik olmayan herhangi ikisinden kesilmesi halinde, trenlerin dizi aralıklarında küçük oynamalarla devamlı çalışabilmesini sağlanması,
- DC enerjinin cer trafo merkezlerinin bitişik ikisinden kesilmesi halinde, trenlerin düşük performansla çalışabilmesinin mümkün olmasıdır.

Şekil 4.1’de M2 Çayyolu-Kızılay Metrosu ile ilgili OG besleme sistemi tek hat şeması gösterilmektedir.

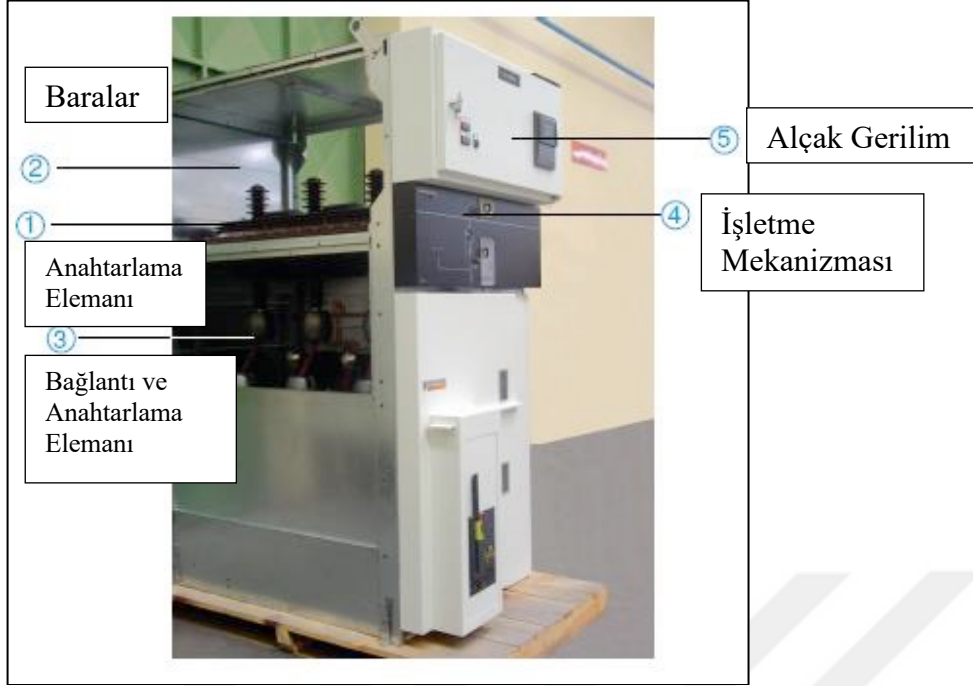
Yapı itibariyle OG ağı kendi içinde ring şebeke gibi düşünülebilir. Maltepe indirici merkezinden gelen OG fideri Necatibey İstasyonu giriş hücrelerine girmekte, Balgat indirici merkezinden gelen OG fideri Söğütözü İstasyonu girmekte ve Ümitköy'den gelen OG fideri Kuru İstasyonu giriş hücrelerini beslemekte olup buradan diğer tüm istasyonlara dağılmaktadır. Bütün istasyonlar sırasıyla birbirlerini beslemektedir. Her istasyona dağıtılan 34,5kV besleme, istasyonlarda istenen gerilimlere dönüştürülmektedir.



Resim 4.1. Milli Kütüphane istasyonu enerji besleme sistemine ait SCADA ekran görüntüsü

4.1.1. Orta gerilim kesici hücresi

Yüksek gerilim sisteminden gelen enerji orta gerilim kabloları ile geldikten sonra CER gücü trafo merkezindeki orta gerilim kesici hücrelerine girmektedir. Orta gerilim hücreleri hem gerilimi ölçmek hem de yönlendirmek için kullanılmaktadırlar. Bütün hücrelerde, gelen akıma göre değişiklik gösteren vakumlu veya gazlı arabalı kesiciler ya da yük ayırıcılar bulunmaktadır. Orta gerilim panosu 5 ana hücre bölümünden oluşur bunlar Resim 4.2'de görüldüğü gibi rakam sıralamasına göre; anahtarlama elemanı, baralar, bağlantı ve anahtarlama elemanı, işletme mekanizması ve alçak gerilim hücresidir.



Resim 4.2. Orta gerilim panosunun bölümleri



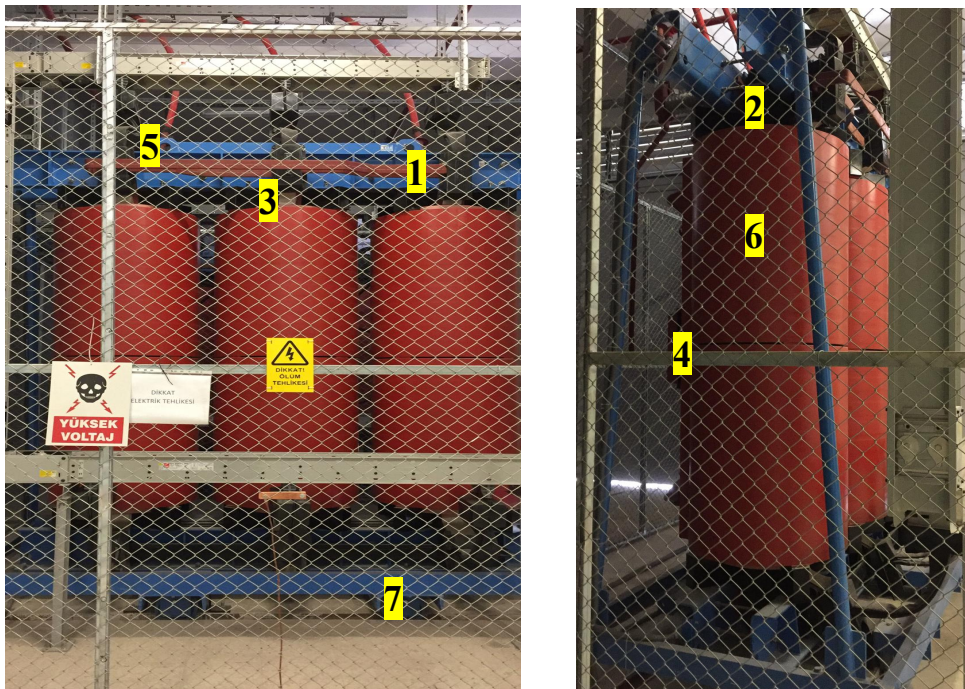
Resim 4.3. Schneider'e ait orta gerilim panosu

Bölgesel elektrik dağıtım şirketinden gelen enerji kablo yardımı ile orta gerilim panosunun kablo bölmesine yani anahtarlama cihazına bağlanmaktadır. Anahtarlama elemanından da ana baraya bağlanmaktadır. Alçak Gerilim hücresinden Resim 4.3'de bulunan panonun manuel veya uzaktan (SCADA Sistemi yardımıyla) çalışmasını sağlayacak kontaktör, röle, sigorta ve anahtarlama cihazı bağlantısını sağlayan sistemleri bulunmaktadır.

4.1.2. Transformatörler

Trafolar istasyonlardaki iç ihtiyacı (aydınlatma, yürüyen merdiven ve havalandırma fanları vb.) temin etmekle sorumlu iç ihtiyaç trafoları, treni hareket ettiren CER Trafoları ve istasyondaki konkors yapılarının birinde herhangi sorun olması durumunda diğer konkorsun iç ihtiyaç trafosunun beslenmesi için gerekli olan transfer trafolarıdır. Rejeneratif enerji için gerekli olan trafo, trenin motorize olmasını sağlayan CER trafolarıdır. Ankara Metrosunda kullanılan CER trafolarının kapasitesi 2750 KVA mertebesindedir.

CER merkezleri dediğimiz istasyonlarda Resim 4.4’de gösterilen iki adet 2750 kVA gücünde 34,5/0,58kV çift sekonderli (yıldız-üçgen çıkış), kuru tip, D0d0yn11 vektör grubuna sahip, dökme reçine transformatörler mevcuttur. Yine yardımcı tesisler beslemeleri için ise her istasyonun kuzey ve güney bölümlerinde 1000 kVA veya 1250 kVA gücünde, 34,5/0,4 kV, kuru tip, dökme reçine transformatörler mevcuttur. Transformatörlerin primer taraflarında, tam yük ve belirlenen aşırı yük düzeyine göre % -5, %-2.5, 0, % +2.5, % +5 yüksüz kademe değiştirme düzeni sağlamaktadır. Doğrultucu-transformatörleri sekonder bağlantı uçları, doğrultucunun AC girişine doğrudan bağlanmıştır.



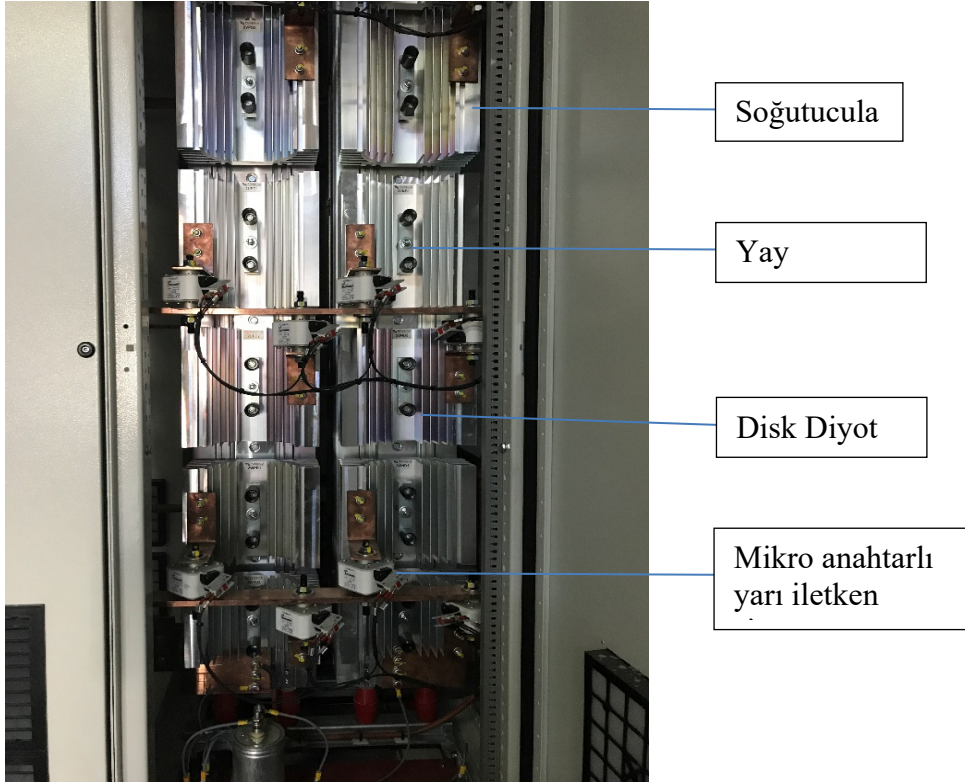
Resim 4.4. Ankara metrosunda kullanılan kuru tip trafonun içyapısı

Resim 4.4’de bulunan numaralı kısımlar sırasıyla belirtilmiştir. 1-Nüve (Three-limb core) , 2-AG ve OG Sargı Bölgesi (LV and HV winding), 3- İzolasyon Silindiri (Insulation cylender), 4- YG Terminal (HV terminals), 5- AG Terminal (LV terminals), 7- Esnek Tutucular (Resilient spacers), Taşıyıcı (Yoke clamping frame and truck)

4.1.3. DC şalt hücresi ve doğrultucu grubu

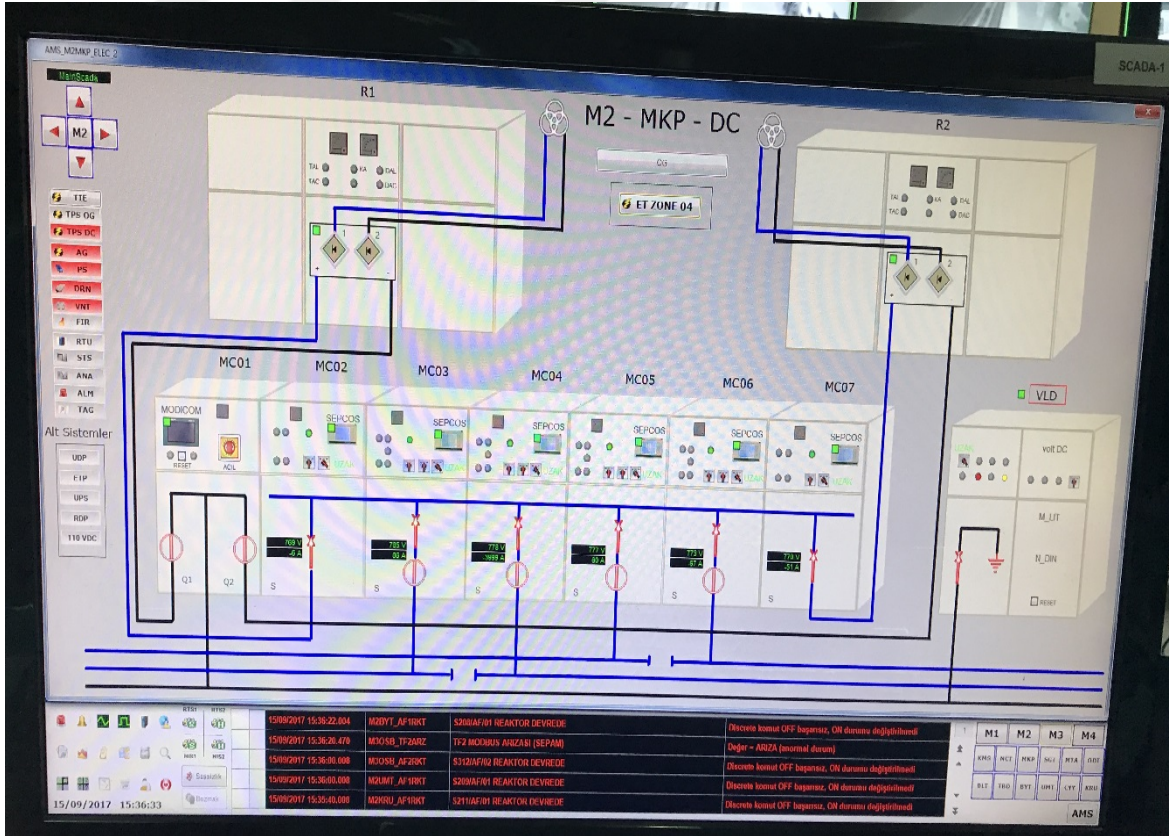
Dünya üzerinde birçok şehir içi raylı sistem hatları doğru akım ile çalıştığından dolayı istasyonlarda alternatif akımı doğru akıma çevirecek Resim 4.5’deki gibi doğrultucu (diyot) gruplarının bulunması gerekmektedir.

Çift sekonderli CER trafosu, Doğrultucu-transformatörlerin sekonderleri yakın ve kapalı bara olarak, çift sekonderlerle 12 darbeli doğrultuculara göre, yani bir yıldız bir üçgen şeklinde düzenlenmiştir. Doğrultucu grubu iki adet 6 darbeli paralel iki tam dalga kontrolsüz doğrultucudan meydana gelmektedir. Doğrultucu grupları birbirine paralel çalıştığından iki 6 darbelik gerilim birleşerek daha düzgün bir 12 darbeli gerilim oluştururlar. Bu gerilim doğrultucu çıkışı 750V DC olarak gerçekleşmektedir.

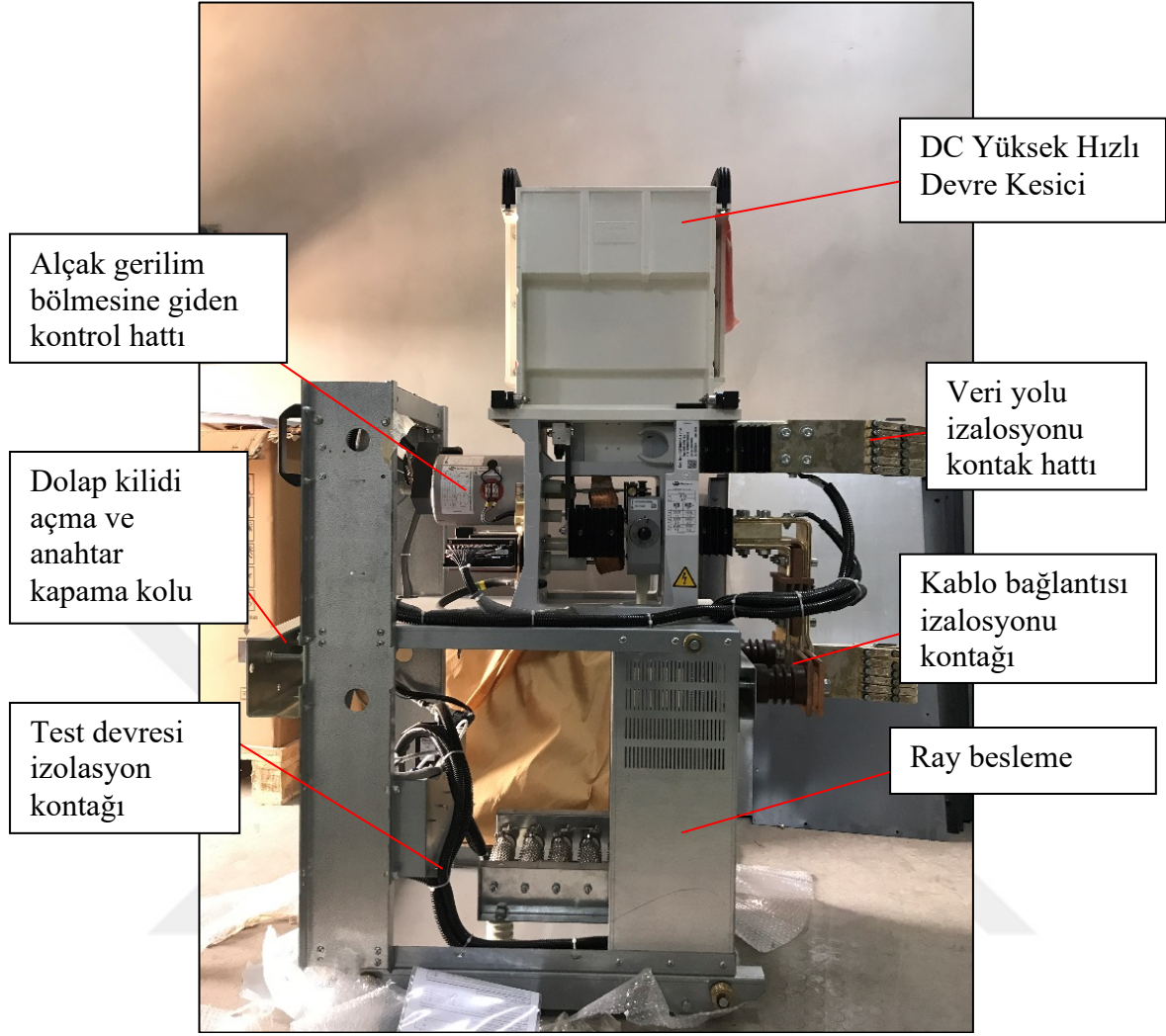


Resim 4.5. Diyot grubunun görünümü

Resim 4.6'da iki CER trafosunun beslemiş olduğu iki doğrultucu grubunun çıkışındaki, 6000 A'lık Resim 4.7'de görülen DC kesiciler, ortak bir barayı beslemektedirler. Bu baradan ise, 4000 A'lık hat kesicileri üzerinden hattın enerjilendirilmesi istenilen bölgelerini beslemektedir. Bu enerji 3. raya iletilmektedir. Negatif geri dönüş ise taşıyıcı ray üzerinden ortak bir negatif baraya gelmektedir. Buradan ise iki negatif ayırıcıya girer ve doğrultucu grubuna dönmektedir. Her iki ayrı hattın beslendiği ortak DC bara incelendiğinde, ilgili panoda her iki hatta elektriksel kısa devre gibi düşünülmektedir. Bu ekipmanlar dışında sistem güvenliğini sağlamak amacı ile CER merkezlerinde negatif ray-toprak gerilimini kontrol etmek için voltage limiting devices (VLD) dediğimiz ekipmanlar mevcuttur. Bu ekipman ray-toprak arası gerilimi ölçmektedir ve ayarlanan sınır değerler (120V) üzerinde bir değeri 0.1 sn. görmesi anında taşıyıcı ray-toprak arasını bir bobin vasıtasıyla kısa devre etmektedir. Kısa devreden sonra sistemi 10 saniye izlemektedir ve ardından bobin kısa devreyi kaldırmaktadır. Sistemin güvenli durumunun görülmesi sonrasında hat normal çalışmaya devam etmektedir. Aksi durumda ise bobin tekrar ilgili devreyi kapatmaktadır. Bu güvensizlik durumu devam ettiği sürece 3 kere aynı işlemi tekrarlayan VLD sistemi blokaja düşmektedir.



Resim 4.6. CER besleme merkezi



Resim 4.7. Schneider'e marka yüksek hızlı DC kesicisi arabasının görünümü

Hatta taşıyıcı ray üzerinden toprağa bir kaçak akım akması istenmez. Çünkü bu akımlar tünel üzerindeki ekipmanlarda zamanla korozyona yol açmaktadır. Sistemde bu kaçak akımlar sürekli izlenmektedir. Taşıyıcı ray üzerinden toprağa kaçan bu akımlar, toprak ve taşıyıcı ray arasına bağlanan bir diyot vasıtasıyla taşıyıcı raya (negatif dönüşe) verilmektedir. Bu diyot ve ilgili izlemeyi yapan ekipman kaçak akım panosudur. Toprağa 10A'in üzerinde bir akım aktığı tespit edilirse yine ilgili çalışma bölgesini besleyen DC kesiciler trip (hata) konumuna geçmektedir.

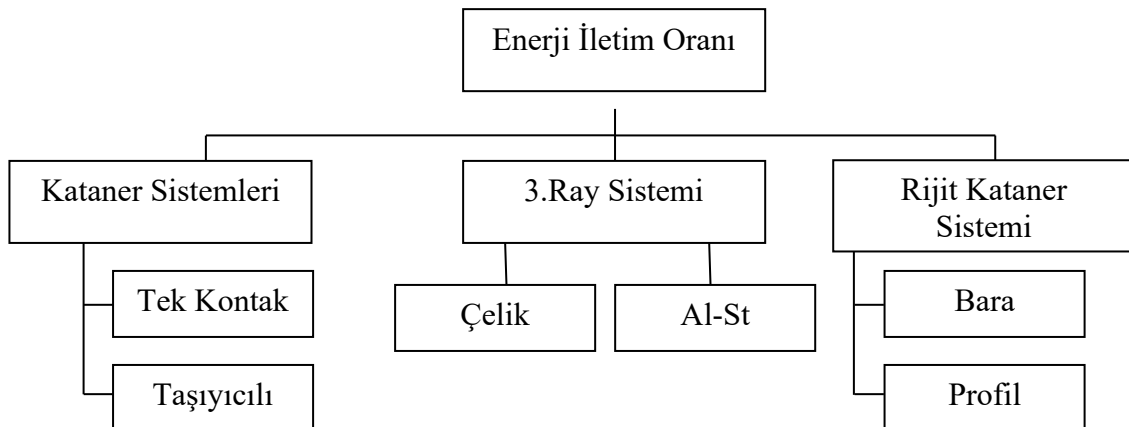
Bu diyot ve ilgili izlemeyi yapan ekipman kaçak akım panosudur. 100A'e kadar kaçak akım taşıyabilen kablo bulunmaktadır. Kaçak akım aktığı tespit edilirse yine ilgili çalışma bölgesini besleyen DC kesiciler trip (hata) konumuna geçmektedir [27]. Ankara Metrolarında Resim 4.8'da gösterilen Schneider marka DC şalt panoları kullanılmaktadır.



Resim 4.8. Ankara metrolarında kullanılan DC salt panosu

4.1.4. Enerji iletim sistemleri

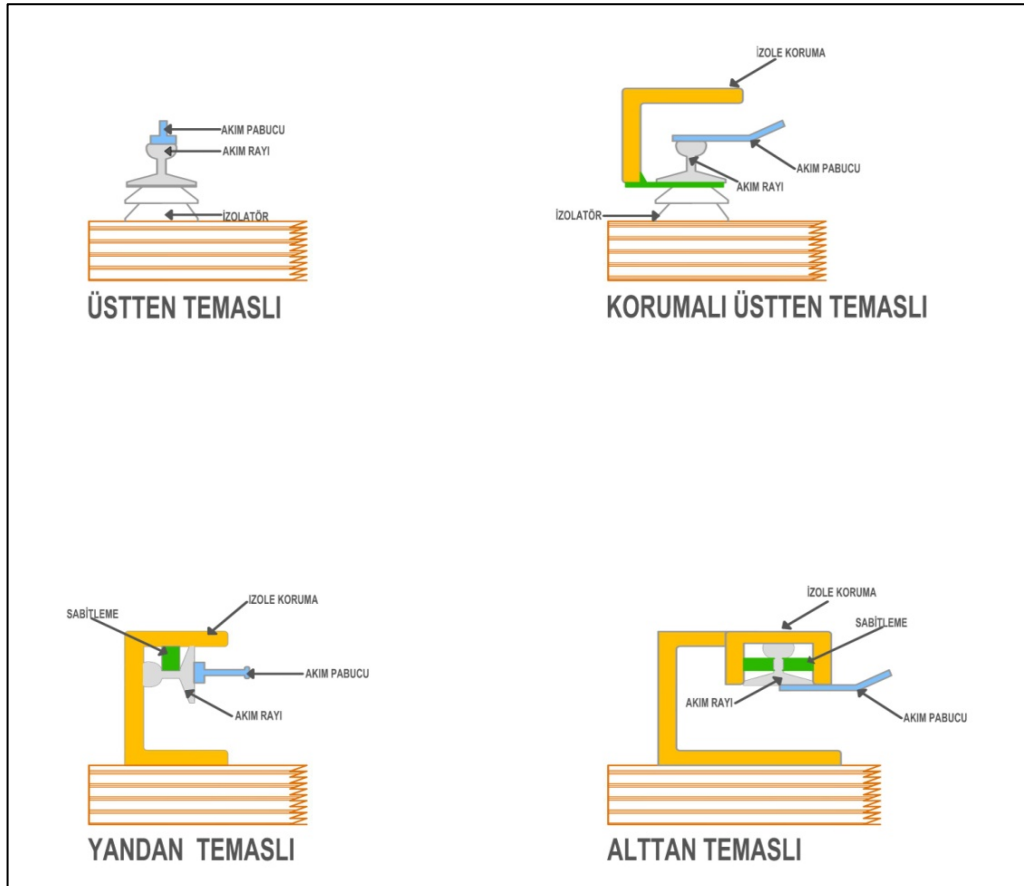
Doğrultucu grubundan gelen akım, raylı sistem aracına hatta bulunan enerji iletim sistemleri ile ulaşmaktadır. Şehir içi raylı toplu ulaşım hatlarında enerji iletim sistemi olarak Şekil 4.2’de verilmiş olan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler sistemin genel özelliklerine göre farklılık göstermektedirler. 3. ray, normal katener ve rijit katener sistemleridir. Bu Raylı sistem elektrifikasyon sistemleri arasında maliyetleri ve enerji kayıpları açısından farklılıklar bulunmakta olup avantajları ve dezavantajları aşağıda kısaca özetlenmeye çalışılmıştır. Bu sistemlerden özellikle Ankara metrosunda kullanılmakta olan 3.ray hakkında bilgi verilmiş olup, katener ve rijit kataner sistemleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.



Şekil 4.2. Raylı sistemlerde enerji iletim sistem çeşitleri

Üçüncü ray sistemi

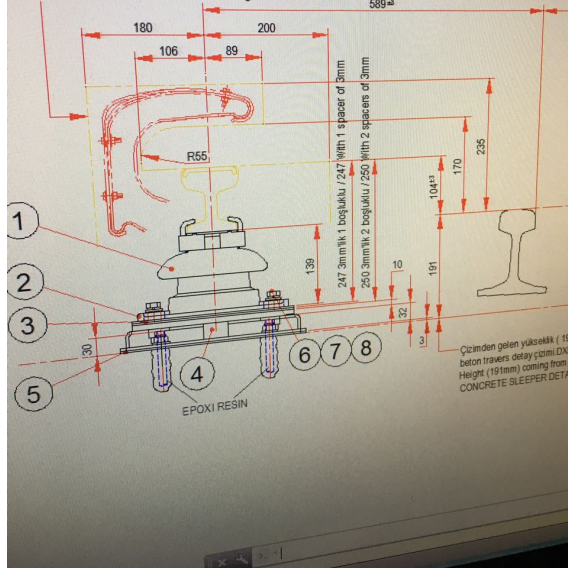
Üçüncü ray sistemi raylı sistem trenleri için elektrikli çekiş gücü sağlayan bir yöntemdir. Şehir içi raylı ulaşım sistemlerinde 3. ray sistemleri genel olarak kullanılmaktadır. Üçüncü ray sisteminde, trenler enerjiyi ray pabucu denilen ekipman ile iletken raya temas yaparak almaktadır. Şekil 4.3’de gösterilen diyagram da pabucun alttan, üstten veya yandan temaslı 3.ray’a temas şekillerine göre anlatımları gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Üçüncü ray sistemleri temas şekilleri

Ankara Metrolarından biri olan M1 hattı 3. rayı çelik alaşımlı olup, M2, M3 ve M4 hatlarında kullanılmış olan Al kompozit (Al-MgSi) enerji rayları, cer yüklerini aşırı gerilim düşmesi olmadan taşıyabilecek şekilde tam olarak boyutlandırılmıştır. Enerji rayları, üstten basmalı akım toplama sistemine uygun olacak ve iki yanı ve üstü, insanların kazayla temasına karşı, iletken olmayan koruyucu kapaklarla örtülecek şekilde dizayn edilmiştir. EN 50 163’e uygun olarak 750 V DC 3. ray sisteminden beslenerek Resim 4.9’dan görülebileceği gibi korumalı Akım Toplama Pabucu üstten temaslı sistemdir. Yapısal

olarak, dış koşullara dirençli izolatörler üzerine sıkı bir şekilde oturtulmuş olup, kar birikmesinden doğabilecek toprak kaçaklarına karşı uygun önlemler alınmıştır.



Resim 4.9. Ankara metrosu 3. ray kesiti

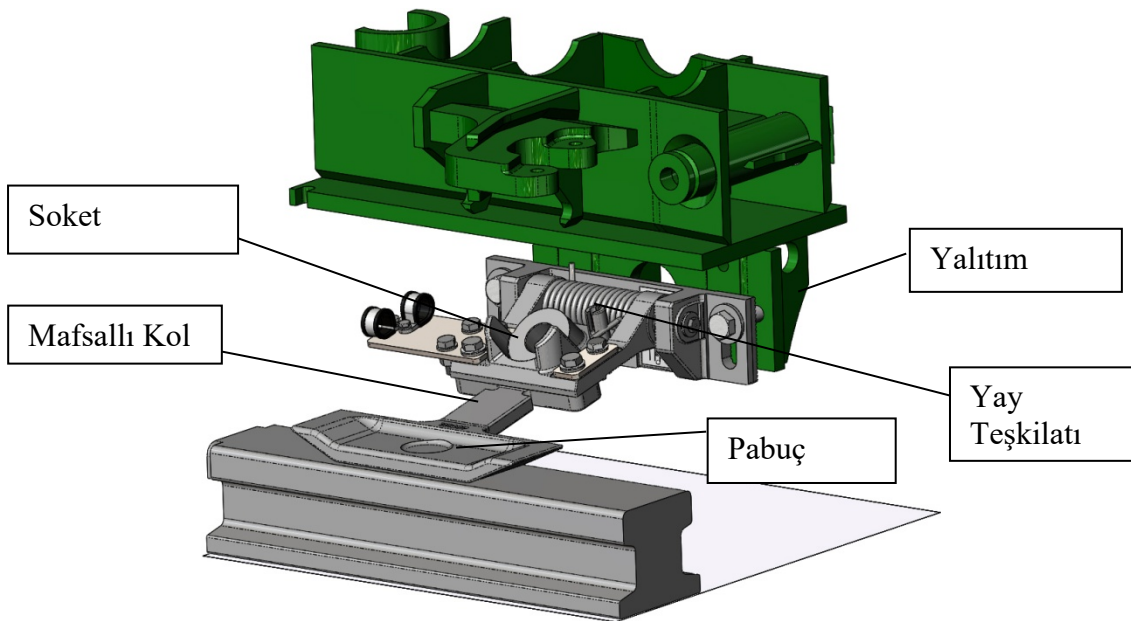


Resim 4.10. Ankara metrosunda korumalı üstten temas uygulamalı 3. ray sistemi

Al kompozit (Al-MgSi) enerji rayları, cer yüklerini aşırı gerilim düşmesi olmadan taşıyabilecek şekilde tam olarak boyutlandırılmıştır. Bunların haricinde 3. Ray kesim aralıklarını istasyonlardan uzağa rast getirilmiş olup; ideal olarak bu aralıklar, trenler bunların üzerinden hızlanma veya frenleme modunda değişken geçecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu aralıkların, araç ekipmanının bakımı açısından, yoğun akım çekişli

hızlanma kesimi ile rejeneratif frenleme kesiminin "dışında" konumlandırılmıştır. Karbon yoğunluğu az çelikten imal edilen 3. raylar ebatlarına bağlı olarak 20 C° sıcaklıkta 13-22,5 m²/km gibi bir iç dirence sahiptir. Al kompozit (Al-MgSi) üçüncü raylar ise 7–15 m²/km dirence sahiptir. Aynı zamanda ortalama %92-94 gibi yüksek seviyede bir iletim verimliliği sunmaktadır.

Resim 4.10’da Ankara Metrosunda kullanılan örneğinde olduğu gibi Al kompozit 3. rayın avantajıdır. 3. ray sisteminin bir diğer avantajı ise katener sistemlerine göre daha az bakım gerektirmesidir. Ülkemizde inşa edilen üçüncü ray kullanılan hatlar, insanların ve hayvanların erişimine kapatılmıştır. Aynı sebepten, tüm hat boyunca ve özellikle yolcu istasyonlarında özel önlemler alınmasını gerektirir. İnsanlar için temas edilebilir düzeyde bulunma durumunda 3. ray sisteminin en büyük dezavantajıdır. Pham ve diğerleri çalışmalarında yolcu istasyonlarında “Acil Durum Enerji Kesme” sisteminin kurulmasının NFPA 130 (“Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems”), standardının 2000 versiyonunun gerekliliklerinden biri olduğunu vurgulamışlardır [28]. Bir diğer dezavantajı koruma kapağı bulunmayan çeşitlerinde kar ve buz yani olumsuz hava koşullarından dolayı pahalı kimyasal maddelerin hat üzerinde kullanılmasıdır. Katenerli sistemlerde acil durum enerji kesme gibi sistemlerin kurulmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. 3.ray sistemlerinin bir diğer dezavantajı ise işletme saatleri içerisinde hatta çalışma yapılmasının tehlike arz etmesindendir [29].



Şekil 4.4. CRRC araçları akım pabucu

Son olarak, yük taşımacılığı ve hızlı tren sistemleri yüksek güç gerektiren sistemler olduğundan, üçüncü raylarda kullanılan gerilim düzeyi bu gücü için yetersiz kalmaktadır. Günümüzde 3.ray genellikle DC gerilimle kullanılmakta olup; en yaygın kullanımı olan 750V haricinde, 600 V Tokyo metrosu, 825 V Moskova Metrosu, 1.2 kV Berlin Metrosu ve 1.5 kV Guangzhou Metrosu gibi çeşitli gerilimlerde örnekleri bulunmaktadır [30].

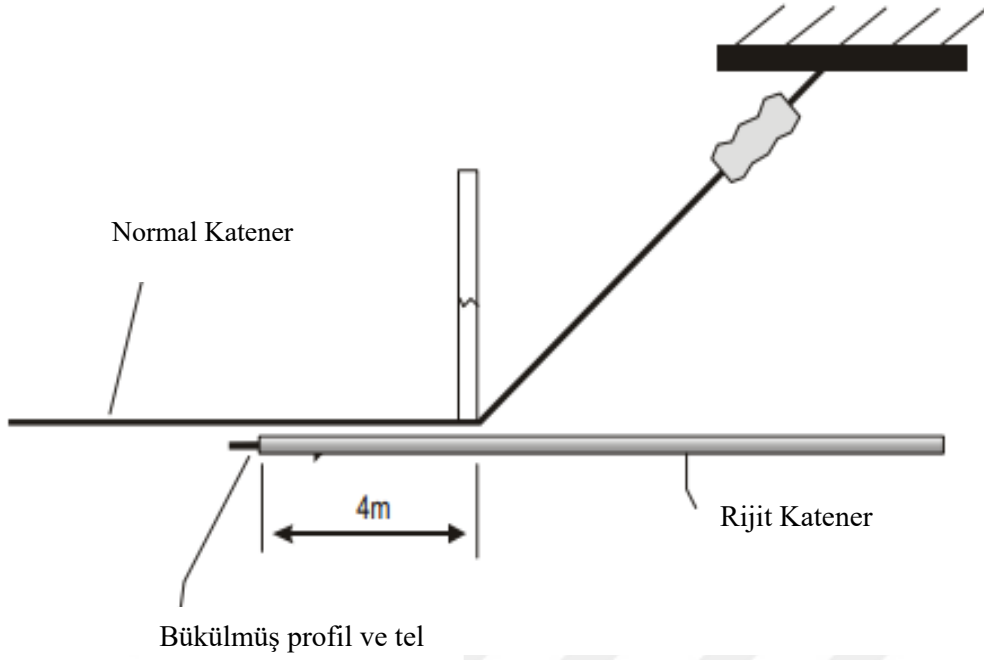
Rijit katener sistemi

Raylı sistemlerde, üçüncü raya alternatif olarak tünellerde kullanılan, hafif, üçüncü raya kıyasla daha esnek ve yüksek iletkenlik seviyelerine sahip sistemlerdir. 1500V DC ve 750V DC hafif ve ağır metro sistemlerinde kullanılmakla birlikte 3000 V DC, 15kV AC ve 25kV AC sistemlerde de kullanılmaktadır. Genellikle Resim 4.11’de verilmiş olan Al kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden oluşmaktadır. Bu sistemlerin en büyük avantajlarından birisi, konvansiyonel katener sistemleri ile beraber aynı hat içinde kolaylıkla kullanılabilmektedir.



Resim 4.11. Rijit katener sistemi

Şekil 4.5’de de görüldüğü üzere her iki kontak sistemi arasında geçiş yapmak için iyi sonuçlar veren sistem, hava bölümleri montajını kullanmaktır. Bunu yapmak için, standart kablo teması asılı bir duvara sabitlenmeli ve katı katenar ise kendi desteğiyle devam etmelidir. Hat yolunun açık kesimlerinde yer alacak normal katener sistemi ile uyumlu olacak ve iki tip arası geçişler düzgün ve pürüzsüz olmalıdır.

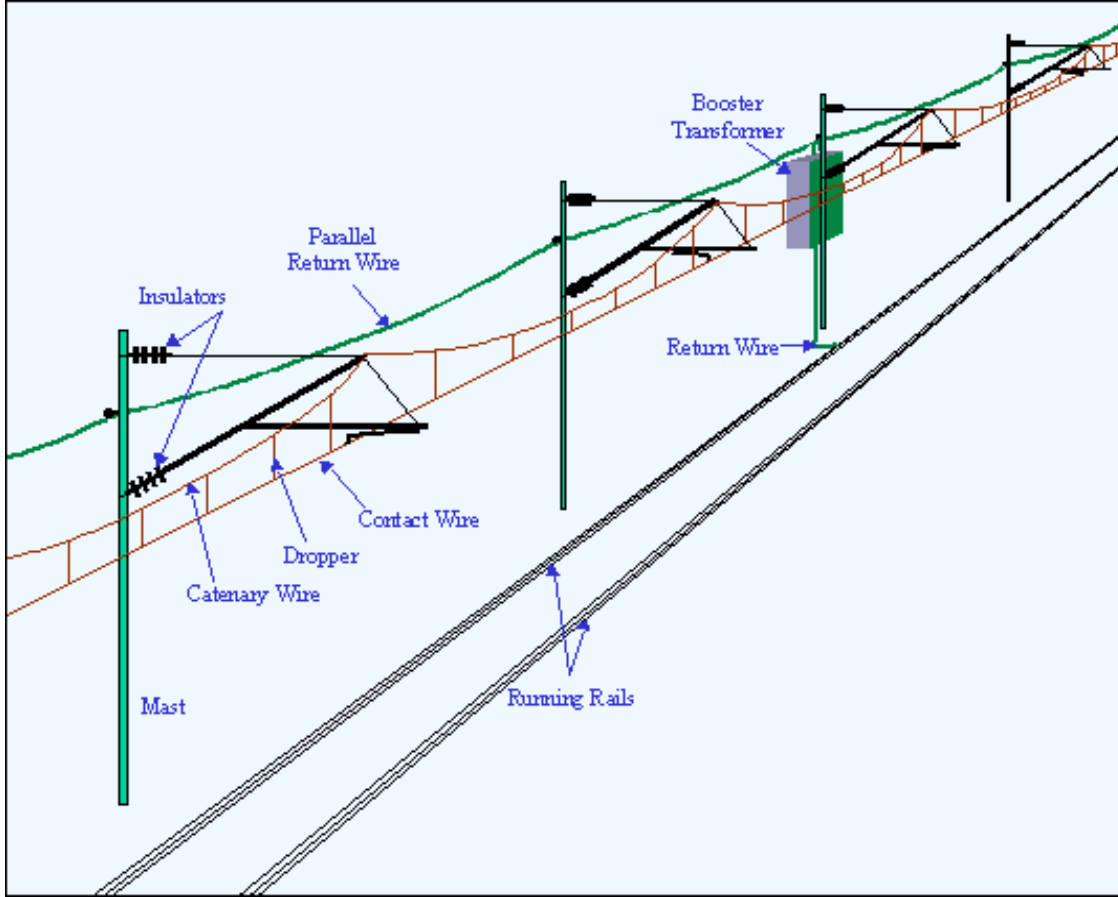


Şekil 4.5. Rijit katener sistemi

Normal katener sistemi

Katener Sistemi, günümüzde bilgisayarlar tarafından tasarlanan karmaşık bir geometriye sahiptir. Trenlere, her türlü iklim ve çevre koşullarında demiryolunun farklı geometrik şekillerinde, tercih edilen azami hızda kesintisiz, can ve mal güvenli elektrik enerjisi sağlayan havai hat sistemi olarak adlandırılmaktadır. Resim 4.12’den de görüleceği üzere katener sistemi iletkenler, direkler, taşıyıcı sistem, izolatörler, besleme sistemi, ray bağlantılarından oluşmaktadır. Katener sisteminin yapılandırılması, o hatta kullanılacak olan azami tren hızı, tren sıklığı, tren sistemi ve trafoların yerleşimi gibi önemli faktörlere göre değişmektedir. Günümüz de genellikle 1500 V ve üzeri gerilimlerde katener sisteminin kullanılması tercih edilmektedir. Bu yüzden Dünya da ana hat demiryolu sistemlerinin elektrifikasyonu katener sistemleri kullanılarak inşa edilmektedir.

Katener sisteminin en önemli bileşenlerinden olan kontak teli, yatay olarak gergin tutulmalı ve ray içindeki eğrileri alabilmesi için yana doğru çekilmelidir. Temas telinde gerginlik 2 ton civarında olacaktır. Tel uzunluğu sıcaklık aralıklarına bağlı olarak genellikle 1000 ile 1500 metre arasında değişir. Tel, altından geçerken trenin pantografındaki aşınmayı azaltmak için hattın orta çizgisine göre zikzak şeklindedir.

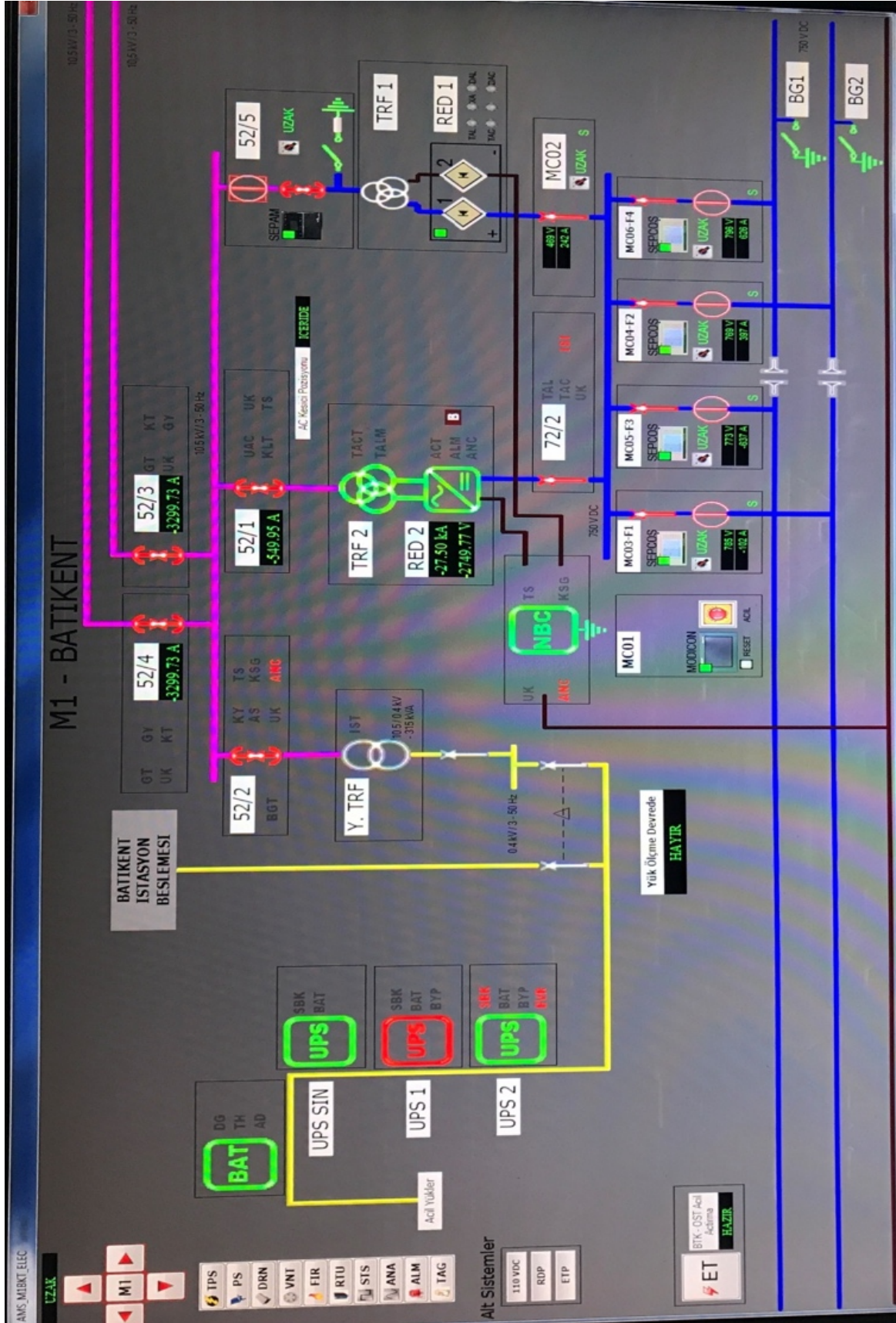


Resim 4.12. Bir normal katener sisteminin genel görünüşü [31]

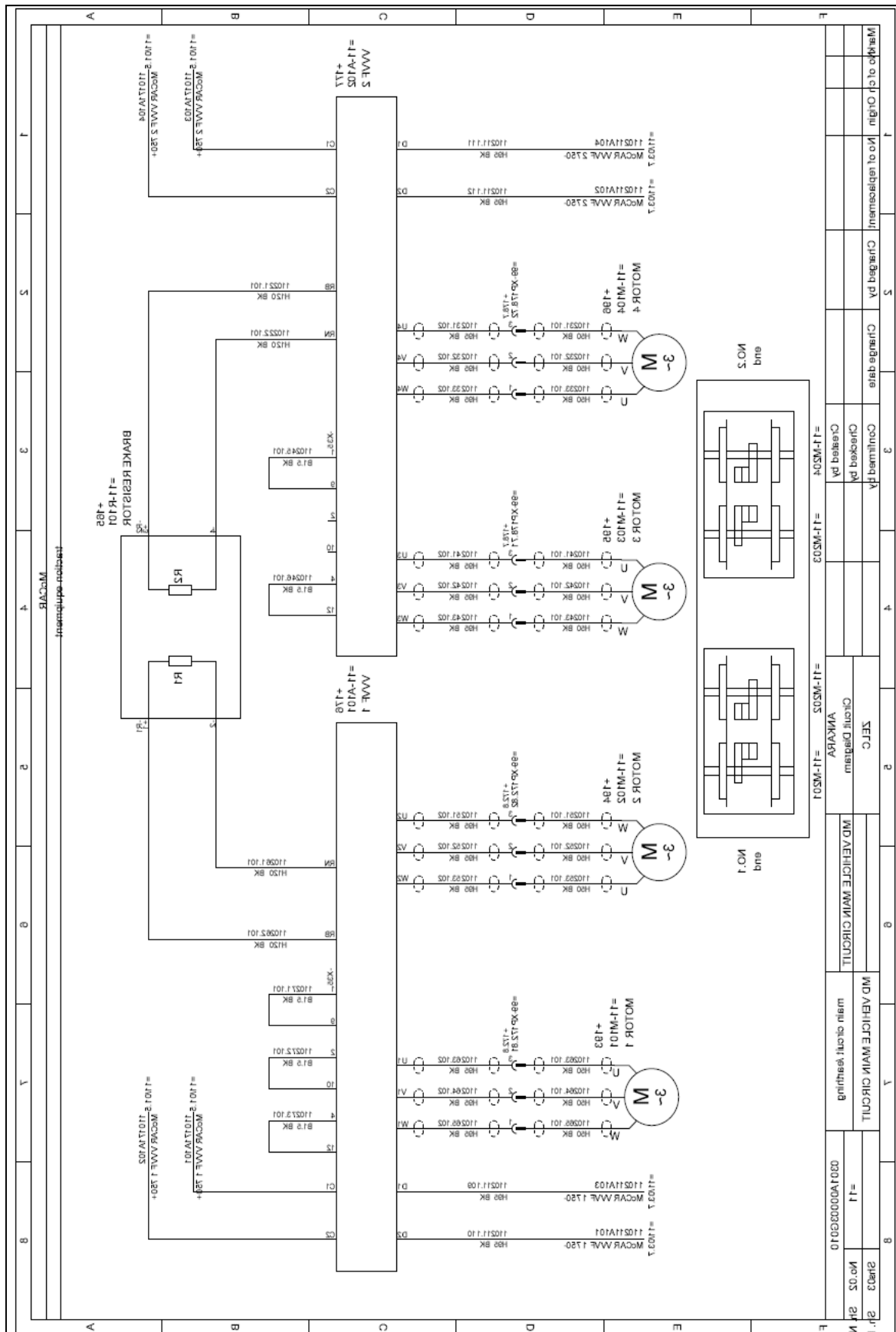
4.2. Raylı Sistem Araçlarındaki Enerji Tüketimi

Şu ana kadar 34,5 kV'luk indirici merkezlerinden gelen enerjinin ilerlediği yol, istasyonlardaki ve hat üzerindeki ekipmanlarla ifade edilmiştir. Resim 4.13'de M1 hattı Batıkent metro istasyonunun da bulunan enerji besleme sistemine ait ekipmanların SCADA ekranından görünümü bulunmaktadır.

Önceki bölümde anlatılan enerji iletim sistemlerinden gelen akımın, akım pabucu sayesinde raylı sistem aracında kullanılmak üzere iletildi belirtilmiştir. Bu kısımda enerjinin araç içerisinde motor kısmından başlayarak, frenleme esnasında açığa çıkan rejeneratif enerjiye dönüştükten sonra hat üzerinde uygun yerlere konumlandırılan dirençlere kadar kullanılan bütün ekipmanlar gösterilecektir. Bu ekipmanları anlatılırken Ankara Metrosunda son 5 yıldır kullanılmakta olan Çin menşeli üretici CRRC firmasına ait metro araçlarının Şekil 4.6'da verilen elektrik şeması çizimlerine göre incelenecektir.



Resim 4.13. Batıkent istasyonu CER gücü sisteminin OG panosu ile 3. ray arasındaki enerji akışının SCADA görüntüsü



Şekil 4.6. Ankara metrosunda kullanılan CRRC metro araçlarının elektrik devre şeması

4.2.1. Ana şalter (MS)

750V DC gerilim 3.Ray pabucundan girerek ilk olarak Ana sigortadan geçerek ana şaltere gelmektedir. Ana şalter Çizelge 4.1'den görüleceği gibi üç konuma sahip manuel bir şalterdir. Resim 4.14'de gösterilen ana şalter manuel olarak üç modan birinde çalıştırılmaktadır. (Üçüncü ray / stinger / OFF (çalışmaz)). Nominal değerleri; Gerilim: 750VDC, Akım:1000 A



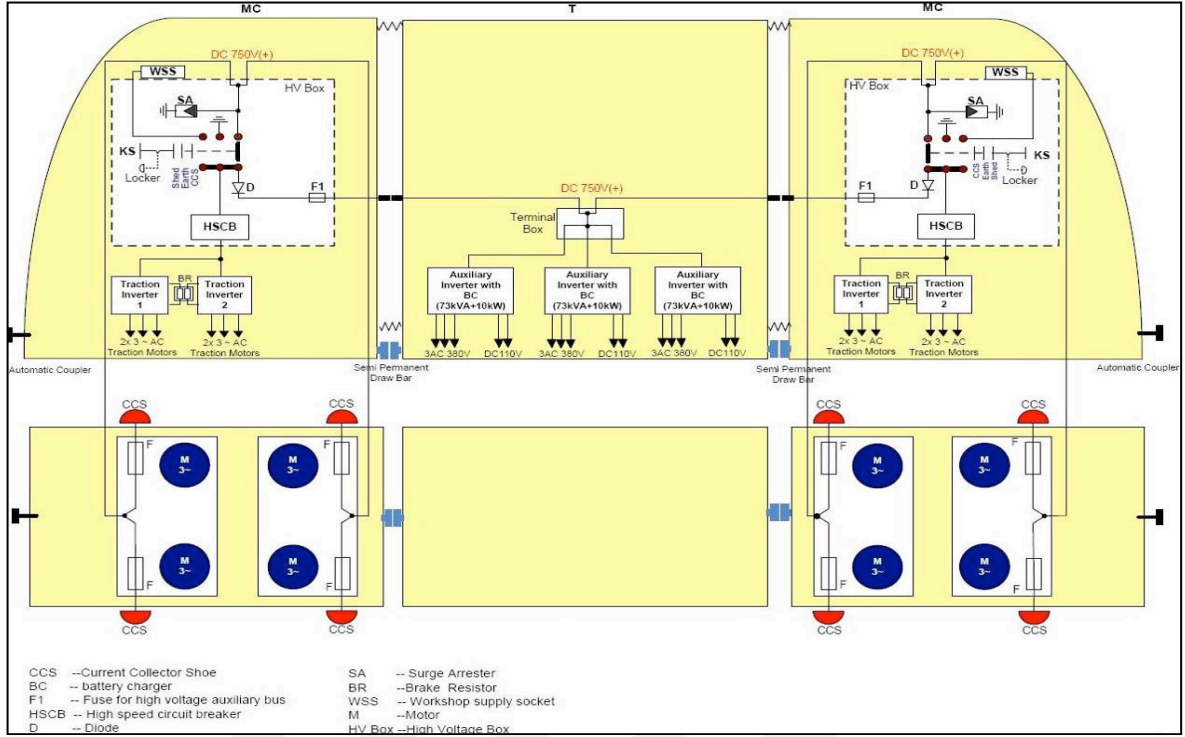
Resim 4.14. Ana şalter görünümü

Yüksek gerilim kutusuna (HVB) 3 konumlu bir bıçak anahtarı (= 31-S01) monte edilir ve tahrik sistemi için güç devresi bağlanır ve bıçak anahtarı ile kesilir. Bıçak anahtarı aşağıdaki üç mod da ayarlanabilir.

- Kollektör pabucu: Bıçak anahtarı, VVVF invertör ve yardımcı invertörü 750V tren hattına bağlamaktadır.
- Toprak: Bıçak anahtarı VVVF frekans çeviriciyi ve yardımcı frekans çeviriciyi üçüncü raydan ayırır ve HSCB'lerin parça devresini toprağa bağlamaktadır.
- Çalışma Temini: Bıçak anahtarı, yardımcı invertörü besleme soketine bağlamaktadır.

Çizelge 4.1. Ana şalter konumları

Şalter konumu	Statü
OFF (Çalışmaz)	Aracın atölyede güvenli bir şekilde muayene edilip onarılabilmesi için bütün elektrik bağlantısı izole etmektedir.
Üçüncü ray	Üçüncü raya bağlantı sağlamaktadır.
Test	Atölyede plugla bağlanmaktadır.



Şekil 4.7. Yüksek voltaj güç kaynağı diyagramı

Şekil 4.7’de gösterilen DC 750 V güç kaynağı, Mc bojilerine konumlandırılmış olan akım kolektörlerinden alınmaktadır. Mc bojilerindeki akım kolektörleri, aynı Mc arabasındaki sürüş sistemini besler ve buna ek olarak da T araçlarındaki yardımcı invertörlere kaynak sağlamak için DC 750 V hattını beslemektedir.

4.2.2. Ana bağlantı kesme şalteri (MDS)

Ana bağlantı kesme şalteri dış elektrik kaynaklarından izole etmek için monte edilmiştir. Ana bağlantı kesme şalteri açık olduğunda ve ilgili şalter DS de (deşarj şalteri) kapalı olduğunda, filtre kondansatörünün gerilimi güvenli bakım ve onarım için hat kesicisi kutusundakideşarj rezistörü iledeşarj edilmektedir. Bu şalter sadece evireci güç kaynağından izole edebilmektedir. Nominal Gerilim: 1000VDC, Nominal Akım:1000 A

4.2.3. Ana sigorta (MF), kuplaj devre kesicisi (CCB)

Ana sigorta ve kuplaj sigortası aşırı akımlara karşı sistemi korumak için akımı kesmek için kullanılmaktadır. Nominal değerleri; Gerilim: 800VDC, Akım:1000 A

4.2.4. Yüksek hızda devre kesici (HSCB)

Evireçte aşırı akım veya istenmeyen durum oluştuğunda, Resim 4.15’da gösterilen HSCB sistemini korumak için açılmaktadır.



Resim 4.15. HSCB’nin görünümü

- VVVF evireci hızlanma ya da frenleme komutunu aldığı anda, HSCB kontrolör tarafından kapatılmaktadır.
- HSCB öz açma seviyesi 1500 A üzerindeki akımlarda açar HSCB’nin kontrolör tarafından açılması koşulları sağlanmaktadır.
- Aşırı akım seviyesinin üzerinde acil açma düğmesi ile büyük arıza olması durumunda yardımcı kontakların izlenmesi yapılmaktadır.
- HSCB yardımcı kontak sinyalinin açma/kapama komutu ile uymadığını tespit ederse, arıza ortaya çıkmaktadır.

Max gerilim: 1000VDC, izolasyon Gerilimi: 2000V, Akım 1500A

4.2.5. Filtre reaktörü (FL)

Filtre reaktörü, filtre kondansatörü olan hat filtresinden oluşmaktadır. Akım harmoniklerinin azaltılması için kullanılmaktadır.

- Ana devre aksamalarının korunması için geçici akımların bastırılması
- Trafo merkezinin topraklama arızasına karşı korunması

4.2.6. Fren rezistörü (DBRe)

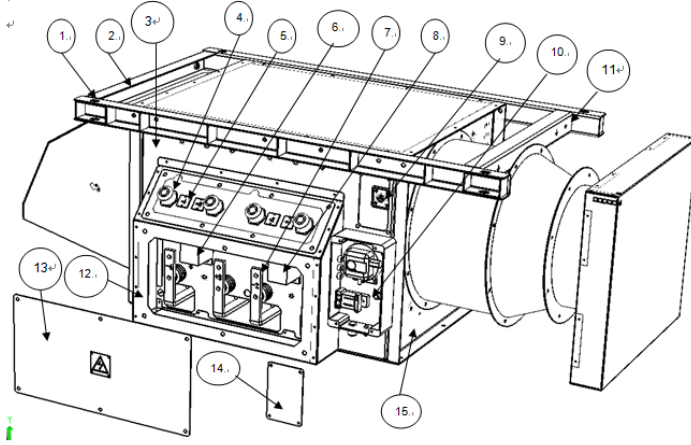
Resim 4.16’da gösterilen fren rezistörü araçta iki yönlü kullanılmaktadır. Biri reostatik (dinamik) frenlemede olup diğeri de aşırı gerilime karşı korumada filtre kapasitörünün deşarj edilmesindedir. Dinamik frenleme rejeneratif fren ve reostatik frenleme olmaktadır. Hat üzerinde yeterli seviyede rejeneratif yük mevcutsa, rejeneratif fren çalışmaktadır. Eğer rejeneratif yük yeterli değilse, rejenerasyon enerjisinin rezistör boyunca dağılması için reostatik frenlemeyi yapmak amacıyla fren akım kesicisi çalışmaktadır.



Resim 4.16. Fren rezistörü görünümü

Fren rezistörü değerleri

20 °C’de nominal ohm değeri	: 2x0,493 Ω +/-2%
Maksimum operasyon sıcaklığında ohm değeri	: $\leq 2x0,7 \Omega$ (üretici toleransı dahil)
-25°C’de minimum ohm değeri	: $\geq 2x0,47 \Omega$ (üretici toleransı dahil)



Şekil 4.8. Fren rezistörü M851RF

Şekil 4.8’de numaralı kısımlar sırasıyla belirtilmiştir. 1-N°4 Sabitleme noktası, 2-Şasi, 3-TB destek parçası, 4-Kablo rakoru, 5-Terminal plakaları, 6-TI2 IT rölesi, 7-N°4 Bakır terminal baraları , 8-TI1 IT Rölesi, 9-Basınç şalteri plakası, 10- Panel and “Fibox” Servis kutusu, 11-N°4 Toprak noktaları, 12-Terminal kutusu, 13-Terminal kutusunun ön paneli, 14-Kontrol paneli, 15-Fan flanşı

4.2.7. Filtre kondansatörü (FC)

Filtre kondansatörü akım harmoniklerini bastırmak ve dengeli hat gerilimi oluşturmak için filtre reaktörü olan LC filtre devrelerinden oluşmaktadır.

Sığa: 9 mF -0/+10%

Anma gerilimi: 750VDC

4.2.8. Elektrik gücü modülü (PEM)

PEM 6 adet IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), güç yarı iletkeni ve fren akım kesicisi, soğutma cihazı, bağlantı ana barasından oluşmaktadır. Bir evireç kutusunda 2 PEM mevcut olup her bir PEM iki adet cer motorunu değişken gerilim değişken frekans (VVVF) kontrolü yaparak PWM’li (darbe genişliği modülasyonu) anahtarlama ile çalıştırmaktadır. Bu sırada, güç yarı iletkeni anahtarlama kaybı nedeniyle ısı yaymaktadır. Sonra da bu ısı, ısı borusu ile dağılmaktadır.

4.2.9. Cer motorları

Şekil 4.17’de gösterilen cer motorları MC araçlarında 4 adet bulunmaktadır. Motorlar 750 VDC’yi 543 VAC’ye çeviren IGBT’lere bağlanmaktadır.

Özellik: Dört kutuplu üç fazlı asenkron motor

Nominal değerler: 190kW, 543V, 261A, 1800rpm

Max değerler: 780V, 440A, nominal gerilim 1500V

Çalışma Frekansı 61 Hz

Termal sınıfı: Sınıf 200

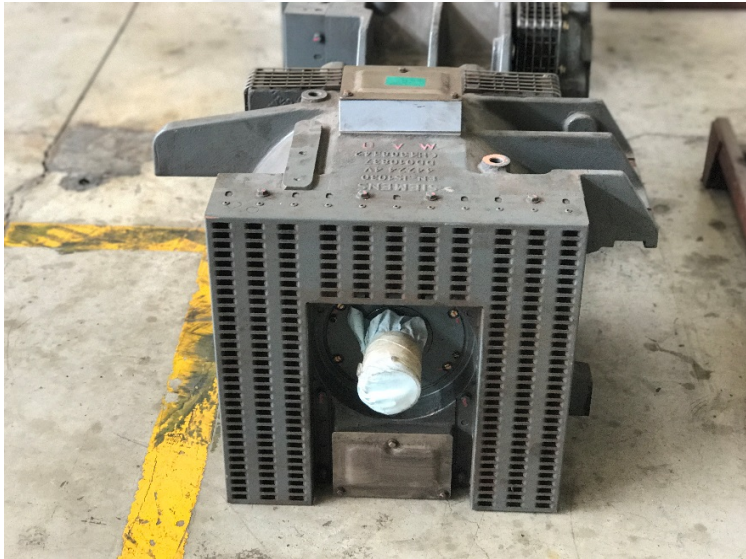
Havalandırma: Kendiliğinden havalandırmalı

Çalışma Aralığı: 525Vdc ~ 780Vdc

Çalışma Frekansı 61 Hz

Maksimum devir: 4350 rpm

Ağırlık: Yaklaşık 530kg

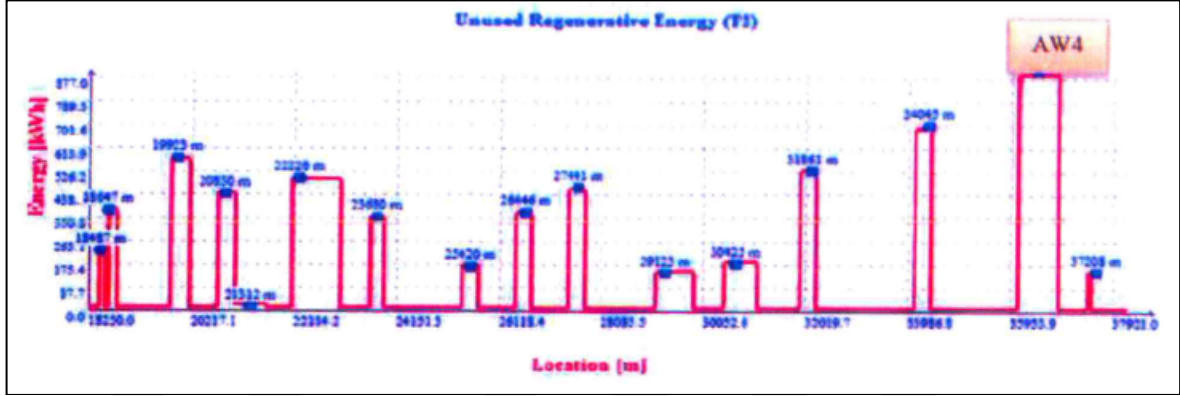


Resim 4.17. CCRC araçlarında kullanılan cer motoru

4.3. Rejeneratif Direnç Sistemi

Ankara M2 Çayyolu metrosun da hatta kullanılması düşünülen Bombardier araçlarına göre yapılmış olan DC simülasyon raporu incelendiğinde değişik yüklenme koşullarında kullanılmayan rejeneratif enerji bölgeleri görülebilmektedir. Simülasyon raporuna göre

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere rejeneratif gücün maksimum 977 kW olduğu görülmektedir. Trenlerin rejeneratif frenlemesi esnasında ortaya çıkan bu gücün absorbe etmek için 5x200 kW’lık otomatik kademeli rejeneratif yük setleri hat üzerinde tesis edilmiştir.



Şekil 4.9. Kullanılmayan rejeneratif enerji bölgeleri

4.4. Metro Araçlarında Frenleme Çeşitleri

Şehir içi toplu taşıma araçlarında beş tip frenleme mekanizması kullanılmaktadır. Bunlar; elektrik frenleme ve mekanik frenlemedir. Ankara Metrolarında kullanılan fren çeşitleri kısaca aşağıda özetlenmiştir.

4.4.1. Pnömatik frenler

Pnömatik frenler, adından da anlaşılacağı gibi, sıkıştırılmış hava tarafından uygulanan kuvvet kullanılarak frenlerin uygulanması prensibi üzerinde çalışmaktadır. Ankara metro hattı sisteminde, çalışma amacına göre üç farklı fren türü vardır.

- Acil frenler
- Park frenleri
- Servis frenleri

Acil durum frenleri

Bu frenler acil durumlarda kullanılmaktadır. Tren operatörü tarafından doğrudan uygulanabilmektedir. Ayrıca, işletme sırasında bazı koşullar yerine getirilmemiş ve

potansiyel olarak tehlikeli bulunmuş olsa bile, MVB (Multifunction Vehicle Bus) hattı üzerinden gateway valfe sinyal göndermektedir. Daha sonra gateway valfin tüm smart valfleri can-bus hattı ile acil durum frenleme bilgisini iletir.

Park freni

Bu frenler, tren bir depoda park edildiğinde kullanılmaktadır. Her metro aracında dört park freninin bir seti vardır, iki fren bir silindirde kurulmuştur. Bunlar hem MC hem T arabasına yerleştirilmiştir ve rezervuar basıncı düşük olduğunda manuel veya otomatik olarak uygulanabilirler.

Servis frenleri

Resim 4.18 ve Resim 4.19’da gösterilen bu frenler bir metro istasyonunun ana fren sistemini oluşturmaktadır. Normal çalışma koşullarında çalışırlar ve ayrıca bir rejeneratif fren sistemi ile donatılmıştır. Frenlerin uygulanması nedeniyle kaybedilen kinetik enerji, faydalı elektrik enerjisine dönüştürülür ve ağıdaki diğer araçlar tarafından kullanılmak üzere, pil sisteminde depolanır veya havai uzantıya geri gönderilir [32].

Bu tez çalışmasında servis (elektriksel) frenlemenin bir uzantısı olan rejeneratif frenleme üzerinde bilgi verilecektir ve çalışılacaktır.



Resim 4.18. Servis frenleri görünümü



Resim 4.19. Servis frenleri görünümü

4.4.2. Rejeneratif frenleme

Bir aracın, fren yaparken normalde kaybolacak olan kinetik enerjinin bir kısmını geri almasına ve saklamasına izin veren teknolojidir. Bir trenin kinetik enerjisini hemen kullanılabilir veya gerektiğinde depolanabilir forma dönüştürerek yavaşlatan bir geri kazanımlı enerji mekanizmasıdır. Elektrikli demiryolu araçları, yeniden dönüştürülen enerjiyi hatta geri gönderirken, kara araçları, volan, pil veya kapasitör kullanarak kendisine yeniden ivme kazandıracak şekilde depolamaktadırlar. Bu tip dinamik fren sistemleri, genellikle enerjiyi araç üzerinde bulunan frenleme dirençleri üzerinde yakarak ısı enerjisine dönüştürmektedir.

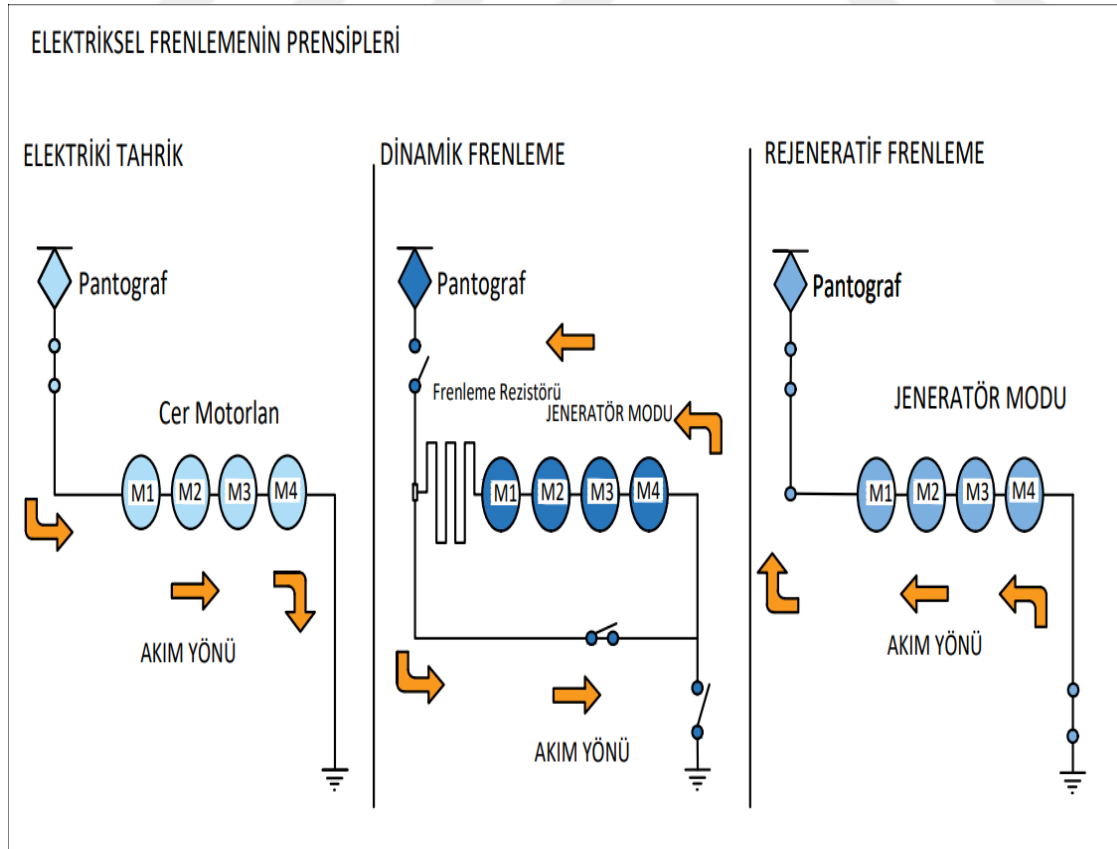
Prensip olarak, dinamik frenleme, motor frenleme esnasında jeneratör olarak çalışacağı için, ortaya çıkan kinetik enerjiyi frenleme dirençleri ile ısıya dönüştürmektedir. Rejeneratif frenin en yaygın şekli elektrikli bir jeneratör olarak elektrik motorunun kullanılmasıdır. Günümüzde daha çok; elektrikli demiryolu araçlarında üretilen elektrik, besleme sistemine geri gönderilirken, akülü elektrikli ve hibrid elektrikli araçlarda, daha sonra kullanmak üzere bir batarya veya kondansatör grubunda depolanmaktadır [33].

Şekil 4.10'da metro araçlarında elektriksel frenlemenin prensipleri gösterilmiştir. Şekilde ilk olarak 3.raydan alınan enerjinin elektriksel tahrik sistemi aktararak trenin hareketi için

kullanılması, ikinci olarak dinamik frenleme sistemi ve sonuncu olarak ise rejeneratif sisteminin çalışma prensiplerinin basit anlatımları bulunmaktadır. Tren hareketi ve hızlanması için motor şeklinde çalışırken, dinamik frenleme durumunda jeneratör gibi çalışırken, sistem frenleme direnci, armatürler ve besleme hattından oluşmaktadır [34].

Bu sistem, trenin kinetik enerjisi bir nevi jeneratör yardımı ile elektrik akımına dönüşür ve frenleme dirençleri tarafından ısıya dönüştürülerek yakılır ve devreden geçmektedir. Rejeneratif frenlemeye dayalı sistem aynı türde bir devrede mantığında çalışır, ancak frenle üretilen elektrik frenleme dirençleri tarafından yakılmamaktadır. Bunun yerine, enerjinin alındığı sisteme tekrar iletilir.

Elektrikli freni sistemleri, mekanik fren sistemlerinin aksine, sürtünme elemanlarını kullanmadığı için çok daha ekonomiktir. Ankara'da kullanılmakta olan metro araçlarında frenleme AW3 yüküne kadar 80–3 km/h arası elektriksels frenleme, 3–0 km/h arası mekaniksel frenleme uygulanır. AW3 yükü ve üstünde 80–8 km/h arası elektriksels frenleme, 8–0 km/h arası mekaniksel frenleme uygulanır.



Şekil 4.10. Elektrikli frenleme çeşitleri

Rejeneratif frenlemenin temel nedeni enerji tasarrufu ve mekanik frenlerin aşınmasının azalmasıdır. Şebeke geri besleme tekniği en çok metro araçlarında etkilidir. Bunun sebebi rejeneratif enerji değerini sağlayacak kadar sık durmalarıdır. Dolayısıyla rejeneratif enerji kullanımı, istasyondan kalkan ve istasyona gelen trenlerin senkronizasyonu ile artabilir. Rejeneratif frenleme trenlerde uygulandığında, bu frenleme işleminden gelen enerji her zaman başka trenler için kullanılamaz ve bu nedenle elektrik dirençlerinde ortadan kaldırılması gerekmektedir.

Rejeneratif fren sisteminde sistemin kalbi, motorun genel işlemini kontrol ettiği için fren kontrol ünitesidir. Fren kontrol ünitesinin fonksiyonları, tekerleğin hızını izlemekte, enerji depolama sistemine geri beslenecek tork, dönüş gücü ve üretilen elektriği hesaplamaktadır.



5. RAYLI SİSTEMLERDE ENERJİ TASARRUFU İÇİN ALINMASI GEREKEN TEDBİRLER

Raylı sistemler için enerji verimliliğinin anlamı; enerji tüketiminin ve bu yolla enerji maliyetinin azaltılmasıdır. Ayrıca, amaca yönelik diğer katkı da çevresel kirliliği en alt seviyeye indirerek sürdürülebilir gelişmeyi sağlamaktır.

Enerjinin raylı sisteme girişi %100 kabul edilirse, raylı sistemlerde tüketilen enerjinin %85'i elektrikli araç cer kısmı için geri kalanı (%15) binalar için harcanmaktadır. Raylı sistemlerde cer enerjisi için tüketilen %85'lik enerjinin %5-10'u 3.ray veya katenerlerde kaybedilmektedir. Sürdürülebilir enerji geleceğini başarmak için en etkin çözüm enerji verimliliğidir. Enerji verimliliğindeki iyileştirmeler enerji altyapısı için gereken yatırım bedelini azaltabilir [35].

5.1. Ankara Raylı Sistem Hatlarının Enerji Tüketimleri

Sistemde 2016–2018 yıllarında faturalarından tespit edilen yıllık Elektrik enerjisi tüketimleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü elektrik enerjisi tüketimleri

		2018		2017		2016		
Birimler		Aktif Enerji Toplam Tüketim Miktarı	Toplam Fatura Tutarı	Aktif Enerji Toplam Tüketim Miktarı	Toplam Fatura Tutarı	Aktif Enerji Toplam Tüketim Miktarı	Toplam Fatura Tutarı	
ULAŞIM		0,000 kWh	0,00 TL	69.879,480 kWh	24.231,42 TL	79.742,400 kWh	30.019,21 TL	
ARAÇ BAKIM-ONARIM		14.408.672,795 kWh	7.433.310,11 TL	13.114.283,840 kWh	4.507.825,26 TL	12.619.936,060 kWh	4.562.848,76 TL	
DESTEK		0,000 kWh	0,00 TL	0,000 kWh	0,00 TL	0,000 kWh	0,00 TL	
OTOBÜS	Bölge - 1							
	Bölge - 2							
	Bölge - 3							
	Bölge - 4							
	Bölge - 5	1.424.591,866 kWh	761.952,03 TL	1.400.935,962 kWh	482.620,05 TL	1.458.066,447 kWh	528.242,28 TL	
RAYLI	Metro	M 1	38540208,83kWh	19058259,32 TL	40887984,81 kWh	14097663,39 TL	41617014,76 kWh	13.215.323,46 TL
		M 2	26.188.894,800 kWh	13076752,11 TL	24294568,8 kWh	8393737,45 TL	18.875.419,200 kWh	6.811.749,88 TL
		M 3	20.862.288,000 kWh	10840940,32 TL	16233878,4 kWh	5625315,48 TL	16.182.266,400 kWh	5.074.325,13 TL
		M 4	13.282.362,000 kWh	6597180,34 TL	14098411,2 kWh	5500907,39 TL	0,000 kWh	0,00 TL
	Teleferik	2.636.314,510 kWh	1319107,32 TL	2906855,7 kWh	1007036,75 TL	2.396.622,13 kWh	870.529,4 TL	
	Ankaray	18.587.974,220 kWh	9.283.559,02 TL	18.562.018,410 kWh	6.380.748,72 TL	18.592.540,670 kWh	5.848.031,11 TL	
GENEL TOPLAM :		135.931.307,021 kWh	68.371.060,57 TL	131.568.816,602 kWh	46.020.085,91 TL	111.800.012,727 kWh	36.941.069,24 TL	

EGO Genel Müdürlüğü ülkemizde elektrik enerjisini kullanan en büyük kurumlardan birisidir. Tabloda da görüldüğü üzere EGO Genel Müdürlüğü bünyesinde bulunan bütün birimlerden en fazla elektrik enerjisi tüketiminin Raylı Sistemlere ait olduğu görülmektedir. 2018 yılında metro ve hafif raylı sistemlerin elektrik enerjisi tüketimi yaklaşık 118 milyon kWh olup, bu oran toplam tüketimin %87'sine denk gelmektedir. 2017 yılında ise yaklaşık 113 milyon kWh olup, bu oran toplam tüketimin %86'sına denk gelmektedir. Devam eden entegrasyon ve sinyalizasyon çalışmalarıyla beraber yakın zamanda M2 ve M3 hatlarında tren sayısı ve tren işletme aralığı daha da arttırılacaktır olup aynı zamanda 2019 yılında M4 Keçiören hattına daha fazla tren eklenmesiyle elektrik enerjisi tüketimin daha da artması beklenmektedir.

Yıldan yıla elektrik enerjisindeki bu artışın azaltılması için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler ile mevcut metro hatlarında ve gelecekte yapılması planlanan raylı sistem hatlarında enerji verimliliği sağlanabilir. Enerji verimliliği sağlamak için öncelikle trenlerde enerji tüketimlerinin nelere bağlı olduğunu incelemek gerekmektedir.

5.2. Trenlerde Enerji Tüketimi ve Kayıpları

Bir demiryolu aracının enerji talebi aynı kayıplarla bağlantılı olarak dört ana kategoriye ayrılabilir;

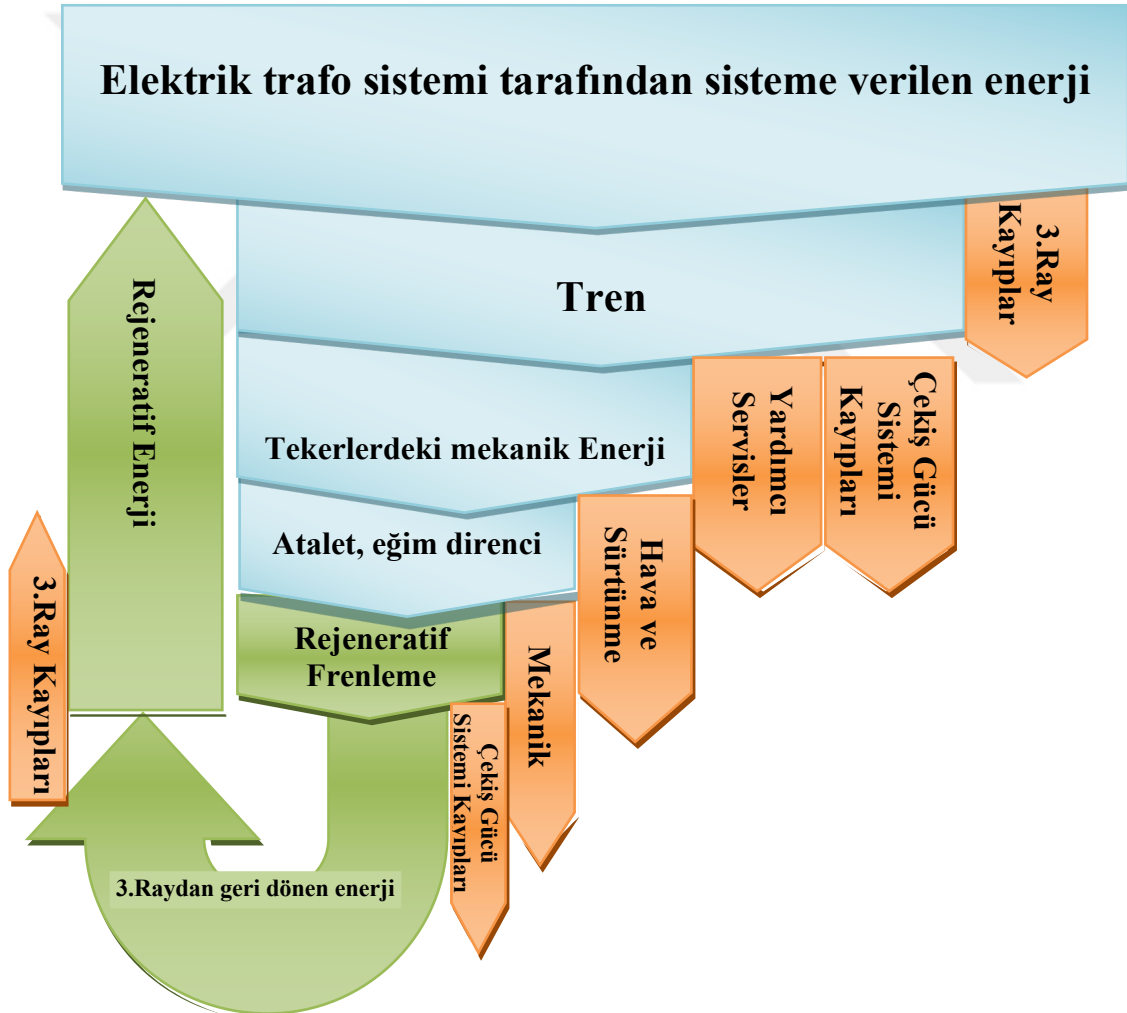
Mekanik kayıplar: Tekerleklerdeki mekanik güç, trenin karşılaştığı farklı direnç tiplerini (sürüş direnci, atalet ve eğim direnci) karşılamak için gerekmektedir.

Çekiş ekipmanı kayıpları: Mekanik güç çekiş sistemi tarafından sağlanır ve belirli bir ısı kaybı oluşmaktadır.

Yardımcı servis kayıpları: Bunlara motor havalandırma ve basınçlı hava üretimi gibi yardımcı sistemler dahildir. Dahası, yolcu konforu (ısıtma, aydınlatma, vb.) için toplam enerji tüketiminin kayda değer bir payı gerekmektedir.

Besleme hattı kayıpları: Elektrikli çekiş durumunda, enerjinin bir kısmı hiçbir zaman araçlara ulaşmaz, elektrikli trafo merkezinden ray pabucuna giderken kaybolmaktadır.

Resim 5.1'de, rejeneratif frenlemeli bir tren için durum gösterilmektedir. Trenlerin frenleme esnasında enerjiyi yeniden oluşturduğu (rejeneratif veya dinamik frenleme olarak adlandırılan) bir DC-elektrikli demiryolu sistemi için en genel ifade ile enerji akışlarını anlatmaktadır. Bu enerji sisteme geri verilir ve diğer yardımcı sistemlerin tüketimi için veya diğer trenler tarafından tekrar kullanılmaktadır. Trenler şebeke geri besleme frenlemesi ile donatılmamışsa, yeşil okla gösterilen enerji geri beslemesi gerçekleşmez. Trenler tarafından tüketilen tüm enerji, trafo doğrultucuları tarafından iletilecek ve atalet ve eğim direncinin üstesinden gelmek için kullanılan enerjinin tamamı fren direnci ve mekanik frenlerde ısıya dönüşecektir.



Resim 5.1. Enerji geri dönüşümüne sahip şehir içi raylı sistemler için enerji akışlarının Sankey diyagramı

5.2.1. Mekanik kayıplar

Tekerleklerdeki mekanik güç, araç tarafından karşı karşıya kalınan farklı direnç tiplerinin üstesinden gelmek için gerekmektedir (sürüş direnci, atalet ve eğim direnci). Atalet ve eğim direnci hem araç kütlesi ile orantılı olduğu hem de dağılmayan olduğundan, etkileri çoğu durumda tek olarak ele alınır. İvme ve yokuş yukarı sürüşe verilen enerji ısıya dağıtılmaz, kinetik ve potansiyel enerji olarak saklanır ve bu nedenle rejeneratif frenleme tarafından büyük oranda geri kazanılabilir. Atalet ve eğim direnci etkileriyle alınan toplam enerji talebini büyük oranda tren kütlesi, hat topoğrafyası ve durak sayısı ile belirlenmektedir. Hareket gücü kayıpları ile ilgili olarak, bunlar temel olarak fazla enerji tüketen etkilerden olan, tekerlek hat sisteminin farklı sürtünme kuvvetleri ve hava sürtünmesini içeren Davis eşitliği ile açıklanmaktadır [36].

$$P_{Haraket\ kaybi} = (a + bV_t + cV_t^2) V_t \quad (5.1)$$

Burada katsayılar tren tasarımına bağlıdır ve V_t tren hızını temsil etmektedir. A, katsayısı esasen mekanik dirençten (sürtünme) kaynaklanırken bV_t ve cV_t^2 hava sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Bu katsayılar genellikle tren üreticileri tarafından verilmektedir ve genel sabit değildirlir. Trenlere (kütle, uzunluk, vb.) ve parça özelliklerine (teker yüzeyi, vb.) bağlı olarak değişmektedir. Genellikle c katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$c = \frac{1}{2} \rho_{hava} A_f C_D \quad (5.2)$$

$A_f C_D$, hava sürüklenme alanı olarak tanımlanmaktadır. İki parçaya bölünebilir. Bir bölüm, tren uzunluğundan bağımsızdır ve esasen trenin ön ve arka uçlarının şekline ve boyutuna bağlıdır. Diğer bölüm, tren uzunluğu ile yaklaşık olarak doğrusal olarak artmaktadır. Tren işletmesinin enerji talebi için sürüş direncinin önemi, servisin hız modeline güçlü bir şekilde bağlıdır. Ortalama hızların yüksek olduğu ve istasyonlar arasındaki tipik mesafelerin uzun olduğu yüksek hızlarda, hareket direnci egemen olan dirençtir. Bu direncinde neredeyse tamamı hava direncinden kaynaklanmaktadır. Ray sürtünmesi genellikle küçüktür. Esas olarak, tren ağırlığına ve parçanın eğri yarıçapına belirli bir derece bağlıdır. Ağır yük trenlerinde ise, tekerlek ray sürtünmesi enerji tüketiminde önemli bir rol oynamaktadır.

5.2.2. ER ekipmanı kayıpları

Tekerleklerde gerekli olan mekanik enerji, 3.raydan alınan elektrik enerjisi ile beslenen cer gücü ile sağlanmaktadır. 3. raydan indüklenen güç, tren içindeki bileşenlerde ve fan ekipmanı gibi yardımcı ekipmanlarda ısı kaybı şeklinde ek bir enerji tüketimine neden olmaktadır. Bütün bu kayıplar daha basit anlatım olması açısından özetle CER ekipmanı kaybı anlatılmıştır.

Enerji 3.raydan alınır ve karmaşık bir dönüşüm sisteminden sonra çekiş motorlarını beslemektedir. Bu dönüşüm sistemindeki ilgili bileşenlerin her biri belli miktarda ısı kaybına sahiptir. Soğutma Ekipmanının aşırı ısınmasını önlemek içinde yardımcı cihazlarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Modern elektrikli demiryolu araçları, 3 fazlı değişken gerilim ve değişken frekanslı çekiş frekans çeviriciler tarafından sağlanan AC indüksiyon motorları tarafından tahrik edilmektedir. Besleme sistemleri, bu invertörleri besleyen DC akımın üretilme biçimine göre farklılık göstermektedir. İnvertörler, DC sistemlerde katener tarafından, AC güç kaynağı durumunda bir transformatör ve doğrultucu tarafından sağlanmaktadır. Raylı araçların çekiş sistemlerinin verimliliği DC ve AC beslenen sistemler arasında da farklılık göstermektedir. 16.7-Hz, 15-kV sistemlere sahip en yeni AC lokomotifleri, genel olarak maksimum yükte ortalama %85'lik bir verimliliğe sahiptir. 50 Hz ve DC sistemlerinde, değer biraz daha yüksektir. 3.raydan tekerleğe olan çekiş sisteminin verimliliği ve frenleme sırasındaki ters zincirin verimliliği kabaca aynıdır.

Daha önce de belirtildiği gibi, kentsel raylı elektrik sistemlerinde genellikle DC elektrifikasyon katener veya 3. ray sistemleri kullanılmaktadır. Bu, besleme sistemlerini ana beslemeye bağlayan farklı yerlere yerleştirilen birkaç DC elektrik trafo merkezinin kullanımını içermektedir. Bu trafolar sadece elektrik şebekesinden raylı sisteme giden güç akışına izin vermektedir. Günümüzde birçok tren modelinde şebeke geri dönüşümlü frenleme sistemleri bulunmaktadır. Bu tür raylı sistem araçları, frenleme esnasında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine geri döndürmektedir.

Genel olarak, elektrikli çekiş sistemi, hem elektrikten mekanik tarafa enerji akarken hem de rejeneratif frenleme sırasında, araç dönüştürücülerinde ve motorlarında iletkenlik

kayıplarını toplamaktadır. Kayıpların ilk şartı, motor akımından ve bunun sonucunda üretilen torktan bağımsız olmasıdır. İkincisi ise tahrik akımına ve çekiş gücüne bağlı olmasıdır. Bu kayıpları modellemenin birkaç yolu vardır, ancak çekiş motorlarının olası çalışma noktalarının aralığı göz önüne alındığında, Eşitlik 5.3'deki gibi çekiş gücü kayıplarının doğru bir tahmini önerilmektedir [37].

$$P_{\text{Çekiş gücü kaybı}} = \left| V_t I_{t,max} \frac{F_t(V_t)}{F_{t,max}(V_t)} \frac{1}{k} - F_t(V_t) \right| V_t \quad (5.3)$$

Burada V_t , tren pabucundaki voltajı temsil etmektedir. $I_{t,max}$ maksimum çekiş gücü, $F_{t,max}$ için tren akım tüketimini, $F_t / F_{t,max}$, gerçek çekiş gücü ve maksimum çekiş gücü arasındaki oranı ve k şehir içi raylı araçlar için 0,55 ile 1 arasında değişen bir ceza faktörünü değeri temsil eder. Bu formül çekiş gücünün verimliliğini temsil etmektedir. Motor üreticileri tarafından verilen mevcut tüketim eğrileri dikkate alınarak değerlendirilebilir.

5.2.3. Yardımcı servis kayıpları

Genel olarak, tahrik sistemi motorlarının soğutulması için gerekli olan yardımcı enerjiyi içermektedir, ancak aynı zamanda araç için fren sisteminin çalışmasını da içermektedir. Yolcu taşıyan araçlarla ilgili olarak, ısıtma, aydınlatma gibi yolcu konforunu sağlamak için de ek bir enerji talebi bulunmaktadır. Bir trenin toplam enerji tüketiminin tipik olarak %20'sini oluşturan bu sistemler, çekiş sistemi için kullanılan birincil enerji kaynağı tarafından tedarik edilmektedir ve yardımcı ana besleme dağıtımıyla bütün trende kullanılmaktadır.

5.2.4. Besleme sistemi kayıpları

Bir raylı sistem hattına güç sağlamak için yeteri kadar enerji üretilmektedir ve geniş bir alana iletilmektedir. Elektrik üretim sistemindeki kayıplar, trafo merkezlerindeki dönüşüm kayıplarının yanı sıra, tedarik hatlarında ve 3.raylarda meydana gelen kayıpları içermektedir. Bu durum, hattın karakteristik yapısıyla alakalı olarak besleme sisteminin özelliklerine bağlıdır. Genellikle, kayıplar daha yüksek voltajlar da azalmaktadır. Oldukça düşük voltajlı DC sistemleri güç ünitelerinde en büyük kayıplara sahiptir. Esasen, besleme

hattı kayıpları iletkenlerin Joule kayıplarından oluşur ki bunlar iletkenlerin empedansı ve akımların karesi ile orantılıdır. 1'den N'ye kadar düğümleri olan bir DC elektrik sisteminde, iletkenlerdeki güç kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [37].

$$P_{Besleme\ hattı\ kaybı} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N (V_i - V_j)^2 (-G_{ij}) \quad (5.4)$$

Bu formülde belirli bir düğümdeki gerilimdir ve , düğümler arasındaki elektrik iletkenliğini tanımlayan i elemanını, düğümsel iletkenlik matrisindeki j elemanını temsil etmektedir. Bu kayıp kategorisinde, rejeneratif frenleme sağlanmadığında veya gerçekleştirilemediğinde (hatta geri alıcı tren olmadığında) fren reostasındaki kayıpları da dâhil etmek uygundur.

5.3. Enerji Tüketimi Hakkında Bazı Hususlar

Trafo merkezleri ($E_{Besleme}$) ve geri kazanımlı enerji ($E_{Rejeneratif}$) tarafından verilen enerji ile temsil edildiği açıktır. Çıktılar ise, tahrik için mekanik enerjiyi, yardımcı sistem ekipmanlarının enerjisini (E_{Mek} ve $E_{Yardımcı Ekipmanlar}$), sistem rejeneratif enerjiyi (E_{BR}) kabul etmediğinde yani reostatta boşa harcanan enerjiyi ve hat iletkenlerinin enerji kaybını ($E_{Besleme} - E_{Hat}$) ifade etmektedir. Her sistemde olduğu gibi güç dengelenmesi gerektiği için enerji ilişkileri aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$E_{Besleme} + E_{Rejeneratif} = E_{Mek} + E_{Yardımcı Ekipmanlar} + E_{Hat} + E_{BR} \quad (5.5)$$

Eşiklik 5.5'de çekiş gücü için net enerji alımı için genel bir ilişki verilmiştir. X, bir aracın çekiş dönüşümü zincirinin ($E_{Mek} / E_{Besleme}$) enerji verimliliğini, yani katenerden alınan enerjinin tekerleklerde mekanik enerjiye dönüşmesinin yüzdesini ve β ise geri kazanılabilir enerji payının katsayısını ifade etmektedir. Belirli bir sefer sırasında çekiş için gerekli net enerji alımı (E_{Mek}) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$E_{net, çekiş} = \frac{1}{X} (E_{Kin+pot} + E_{Hareket} + E_{Yar.}) - x\beta E_{kin+pot} \quad (5.6)$$

$E_{Kin+pot}$, tekerleklerde gerekli olan atalet ve dereceli enerjinin toplamı şu bileşenlerle ifade edilmektedir. $E_{Hareket}$, sürüş direncinin (mekanik sürtünme + hava sürtünmesi) üstesinden gelmek için tekerleklerde gerekli olan enerjidir. $E_{Yar.}$ ise, yardımcı sistem

ekipmanları için gerekli olan enerjidir. Enerji geri kazanım sisteminin, geri verimliliği X ile ifade edilir ve dinamik fren kısmen uygulandığında ($\beta < 1$), $x\beta E_{kin+pot}$ 'un geri kazanılmış enerjisini elde edilebilir. Enerji tasarrufu için temel stratejiler, yukarıda sözü edilen ilişkiden türetilir.

- $E_{Kin+pot}$ Aracın kütesinin azaltılması azalır
- E_{Mek} Aracın aerodinamik ve sürtünme sürtünmesini optimize etmek
- X Sürülen araçtaki veya EMU'daki dönüşüm kayıplarının azaltılması, enerji verimliliğini artırır;
- E_{Yar} . Yardımcı fonksiyonları daha verimli hale getirmek azaltır
- B Aracın rejeneratif frenleme kapasitesini artırmak

Bunlar, bir sonraki bölümde kısaca tartışılacak olan temel verimlilik stratejileridir.

5.4. Enerji Verimliliği Stratejileri

Raylı sistemler sürekli olarak tasarım geliştirmelerine tabi tutulmuştur. Bu nedenle modern elektrikli trenler gittikçe daha verimli hale gelmektedir ancak performanslarındaki niteliksel iyileştirmeleri kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleştirmek mümkün değildir.

Ağırlık, bir trenin enerji talebi için, özellikle de şehir içi raylı sistem işletmelerinde, hareket değişikliklerinde çok önemli bir faktördür. İlaveten, trenin daha düşük ağırlığı, verilen aks yükünde daha yüksek bir yolcu yüküne izin vermektedir. Yeni malzemeler ve daha hafif çekiş bileşenleri bu alanda daha iyi potansiyeller sunmaktadır. (Alüminyum ve karbon fiber malzemeler araç gövdesi teknolojileri) [38-39]. Bu bileşen tabanlı yaklaşımın yanı sıra, sistem tabanlı hafif tasarım yaklaşımı, tüm sistem için ağırlık açısından optimize edilmiş bir çözümü amaçlamaktadır. Ayrıca mekatronik temelli yeni süspansiyon teknolojileri ve yönlendirilebilen tek akslı bojiler gibi daha yenilikçi yaklaşımları içermektedir [40-41].

Yolcu trenlerinde hava direnci, enerji tüketimi için önemli bir unsurdur. Yolcu trenleri için aerodinamik tasarımlar üretme sorunu ele alınmış ve bunlar enerji tasarrufu potansiyelinin

hemen hemen tükendiği noktaya gelinceye kadar uzun yıllar optimize edilmiştir [42]. Pantografin ya da ray pabucunun tasarımı gibi bazı detaylar hala optimize edilmektedir [43]. Araçlarda alan kullanımını geliştirerek, tren ve hava direnci kütlelerinde yalnızca hafif artışlarla daha fazla koltuk yerleştirilebilir. Koltuk başına enerji tüketiminde belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Hem çift katlı hem de geniş gövde tren dizaynları genel enerji verimliliğinde önemli bir artış sunmaktadır. Bununla birlikte, altyapı ile uyumluluk, özellikle geniş gövde tasarımında güçlü sınırlamalar getirmektedir [44].

Elektrikli çekiş teçhizatında dönüşüm sistemi kayıplarının azaltılması ile ilgili olarak, son yıllarda teorik sınırlardan uzak olmayan bir teknolojik seviyeye ulaşmıştır. Bu gelişmede önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu dönüm noktası daha iyi kontrol algoritmaları sağlamak için geleneksel SCR (silikon kontrollü doğrultucu) tristör devresi teknolojisinin daha sonra GTO (kapısı kapalı tristör) dönüştürücüler ve daha da sonra IGBT teknolojisi ile değiştirilmesidir. Aynı zamanda güç modül cihazlarının ağırlık, hacim ve genel sayısındaki azalma ile dönüştürücü modüllerin basit bir şekilde paralelleştirilmesi de buna dahildir [45-46]. Gelecek yıllarda umut verici silikon karbür (SiC) teknolojisi, anahtarlama cihazlarının sınırlarını iyi yönde daha da değiştirecektir. Bunlar daha yüksek çalışma sıcaklığı ve daha yüksek anahtarlama hızı sağlayacaktır [47].

Bununla birlikte, günümüz teknolojisinde elektrikli çekiş bileşenleri yani IGBT invertörlü AC asenkron çekiş motorları, enerji optimizasyonu için çok güvenilir bir sistem sunmaktadır. Bu bileşenlerin kontrolünü ve bunların etkileşimini optimize ederek, yüksek veya orta gerilim için ortaya çıkan invertör topolojilerinden biri olan yenilikçi bir modüler çok kademeli dönüştürücü (MMC) kullanılabilir. Bu optimizasyonlar kısa vadeli iyileştirmeler gerçekleştirilebilir. Uzun vadeli bir perspektiften bakıldığında ise enerji verimliliğinde, kalıcı mıknatıslı senkron motorlar [48] veya süper iletken malzemeye dayanan transformatörler kullanarak tekerleklerle monte edilen tahrik sistemleri (doğrudan tahrikler) yeni nesil komponentler ile sağlanabilir [49].

Elektrikli olmayan trenler düşünüldüğünde onları bir enerji açısından optimize etmek için daha fazla işlem gerekmektedir. Günümüzde, hibridizasyon, dizel yakıtlı trenlerde optimum enerji yönetimi gibi konularda çeşitli araştırma çalışmaları yapılmaktadır [50-51]. Raylı sistemlerin enerji verimliliği ile ilgili bir diğer önemli konu ise enerji verimli sürüşdür. Bu, Coasting (ivmesiz, boşta gitme) kontrolünden başlayan yöntemler, gelişmiş

elektronik sürüş sistemlerinden senkronize tren işletimine kadar geniş bir yelpazedeki yaklaşımları kapsamaktadır. Bu alandaki çalışmalar, belirli bir yolculuk süresi için minimum enerji tüketimini sağlayan hız ve güç profillerini belirlemeye çalışmaktadır. Sonuç olarak, sürüş modlarındaki optimizasyonlar, yolculuk süreleri için en iyi sürüş stratejilerini değerlendirirken, akıllı seyir sistemlerini (telematik) temel alan modern trafik akışı yönetimini, hız profillerini düzleştirerek ve tıkanıklıklarda dur-kalk sürüşünden kaçınarak büyük bir teorik tasarruf potansiyeli sunabilir.

Yardımcı servislerin enerji tüketimi, yolcu trenlerinin enerji talebinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu sistemlerin güncel optimizasyon derecesi, çekiş unsurlarından çok daha düşüktür. Sıcaklık hedef değerlerinin gözden geçirilmesini, klima için akıllı uyarlanabilir kontrol araçlarını ve çekiş bileşenlerinden atık ısının genel kullanımını içermektedir [52-54].

Günümüzde, modern şehir içi raylı araçların enerji verimliliğini artırmak için en etkili tekniklerden biri kesinlikle dinamik frenleme sırasında enerji geri kazanımının artırılmasıdır. Gerçek geri kazanım oranları, besleme sistemi ve ray hattındaki trafik yoğunluğundan büyük ölçüde etkilenmektedir. Geri kazanımlı frenleme enerjisi hem AC hem de DC demiryolu sistemlerinde enerji tüketiminde niteliksel bir azalmayı temsil etmektedir. Aslında modern demiryolu araçları, frenleme enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahiptir. Yani elektrik üreten bir jeneratör olarak çalışmaktadır. Bu araçlarda, açığa çıkan kinetik enerjinin küçük bir kısmı araç yardımcı sistemlerine güç sağlamak için yeniden kullanılabilirken, geriye kalan enerji besleme sistemine geri gönderilebilir. Geri gönderilen enerji de yalnızca yakınındaki bir aracın kalkış ya da hızlanış zamanlarında kullanılabilir. Dolayısıyla hızlanan araç bu enerji transferinden faydalanmaktadır. Durum böyle değilse, aşırı enerji nedeniyle şebeke voltajı artar ve bu fazladan enerji fren dirençlerinde yakılmaktadır.

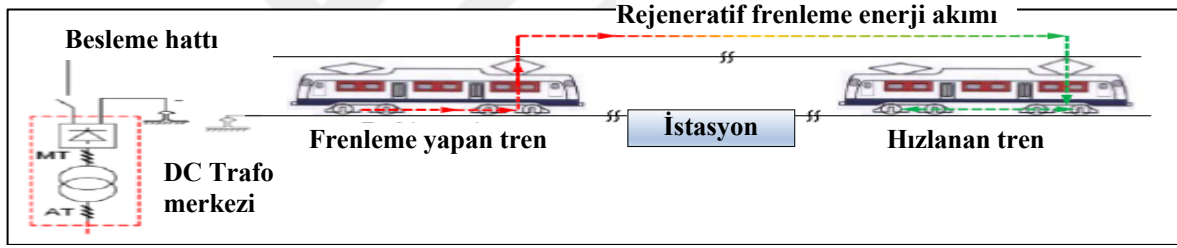
Çok sayıda tren seferi bulunan ve fazla duraksama yapılan kentsel ray hatlarının işletmesinde çok önemli bir yer tuttuğu söylenebilir. Fren enerjisinin geri kazanılması, şehir içi raylı sistemlerin enerji tüketimini azaltmak için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu son konunun önemi ve merkezi rolü bu çalışmada Ankara'daki raylı sistem hatları açısından daha da geliştirilecektir. Bir sonraki bölüm, şehir içi raylı sistem fren enerjisinin

iyileştirilmesi ve yönetimi için hali hazırda mevcut olan stratejiler ve teknolojilerin kapsamlı bir görünümünü sunmaktadır.

5.5. Regeneratif Frenleme Enerjisinin Kullanımının İyileştirilmesi

Resim 5.2'de şematik olarak gösterildiği gibi, şimdiki teknolojiler sayesinde regeneratif frenleme, elektrikli kentsel raylı sistem hatlarının enerji tüketimini azaltmak için çok umut verici bir çözüm gibi görünmektedir.

Yaygın olarak dinamik frenleme olarak da bilinen elektrikli frenleme kullanımı, normal işletme esnasında sürtünme frenleme sistemlerinin kullanımını sınırlamayı mümkün kılmakta ve bu da doğaları gereği bakım ve parça aşınmasına maruz kalma bakımından önemli maliyetler içermektedir.



Resim 5.2. Kentsel rayda regeneratif enerji alışverişinin şematik gösterimi

Genellikle regeneratif frenlemede geri kazanılan enerji öncelikle aracın kendine ait yardımcı sistemlerini ve konfor işlevlerini sağlamak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, en çok kullanılan şehir içi raylı sistemler olan DC ile çalışan metro ve LRT hatlarında, eğer trafo merkezleri çeyrek güçte çalışırsa, regenerasyon enerjisi sistem tarafından daima kabul görmez. Aslında özetleyecek olursak sistemin tekrar enerjiyi kabul etmesi, frenleme işleminde yeniden üretilebilecek potansiyel enerji üzerinden hatta geri gönderilen toplam enerjinin oranı olarak tanımlanabilir.

Birçok araştırma ve çalışma, kentsel raylı sistemlerde regeneratif frenlemenin uygulanmasının, sistemin özelliklerine bağlı olarak net enerji tüketimini %10-%42 oranında azaltılabileceğini göstermiştir. Bu araştırmalar ve çalışmalar, tüketilen enerjinin büyük bir bölümünün 3.ray veya katener sistemlerini geri beslenebileceğine işaret etmesine rağmen, ölçümler yalnızca %19'luk bir iyileşme göstermektedir. Gerçekten de güç kaynağı

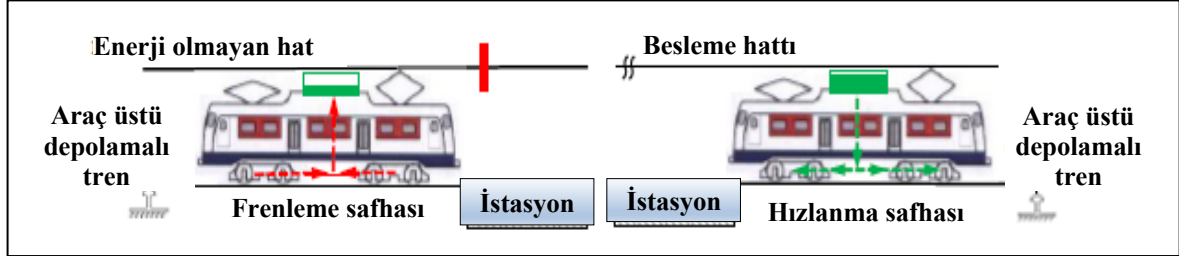
şebekesinin geri kazanılan enerjiyi alma kapasitesi, ilgili parametrelerin belirgin rastlantısallığı nedeniyle tam olarak ifade edilemez. Geri kazanılan enerji miktarı, servis frekansı, tren gücü profili, elektrik şebekesi konfigürasyonu, demiryolu şebekesi, şebeke voltajı, şebeke profili, besleme kesitlerinin uzunluğu ve tren yardımcı güç tüketimlerine bağlı olarak ifade edilebilir. Yenilenmiş enerjinin kullanımını en üst düzeye çıkarmak ve sonuç olarak araç üstü fren direnci kullanımını en aza indirmek için bazı teknikler önerilmiştir. Bunlar, araçlar arasındaki enerji değişimini kolaylaştırarak (örneğin, frenleme enerjisinin olduğu anda enerji talep etmesini sağlayarak), yeniden üretilen enerjiyi elektrik şebekesine geri göndererek ya da daha sonra serbest kullanılmak üzere hat üzerinde uygun yerlere depolayarak geliştirilir.

İlk yaklaşım, daha önce belirtildiği gibi hem sistemin çalışmasıyla ilgili hem bireysel araç seviyesine (Hız ve ivme profilleri ve enerji tasarruflu sürüş stratejileri açısından tren performans kontrolü) hem de trafik kontrolüne (Optimum zamanlanmış sürüş çizelgeleri) dayalıdır.

İkinci seçenek, rejenerasyon enerjisini birincil tedarik şebekesine geri göndermek için çekiş alt istasyonlarını DC/AC invertörlerle (ters, geri döndürülebilir veya aktif trafo merkezleri) donatmaktır. Tersinir bir trafo, şebeke harmonik bastırma özelliğine sahip olan tristör tabanlı doğrultucuları veya aktif ön uçları kullanabilir. Bu seçeneğin en büyük avantajı, primer AC ağının enerjiyi alabilir olması ve sonuç olarak da tüm yeniden üretilen enerjinin potansiyel olarak geri kazanılabilmesidir. Ancak bu önerinin temel dezavantajı, yeni ekipmanların büyük maliyetleri ve mevcut trafo merkezlerinin yerleşimi ile ilgilidir. Buna ek olarak, trafo merkezlerinin tersine çevrilmesinin ekonomik faydaları, enerjiyi kamu şebekesi üzerinden satma imkânı getirecektir.

Bahse konu diğer öneri ile ilgili olarak, kentsel demiryolu sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için enerji depolama sistemleri (ESS) kullanımı olarak düşünülmüştür. Enerji depolama cihazlarının hem araçta hem de trafo merkezindeki veya yol boyunca yüklenmesi, enerji tasarrufu ve konfor gereksinimlerini birleştirerek besleme sistemini daha iyi performansa getirir. ESS'nin depolama teknolojisi ve kontrol şemaları, demiryolu sektörü için yeni olanaklara yol açan hibrid ve elektrikli araçların etkisiyle birlikte sürekli geliştirilmektedir. Dahası, güç elektroniği dönüştürücülerinin hızlı ve olağanüstü gelişimi, ESS'nin kentsel raylı sistemlerde rejeneratif enerjisinin yeniden kullanımı için optimal bir

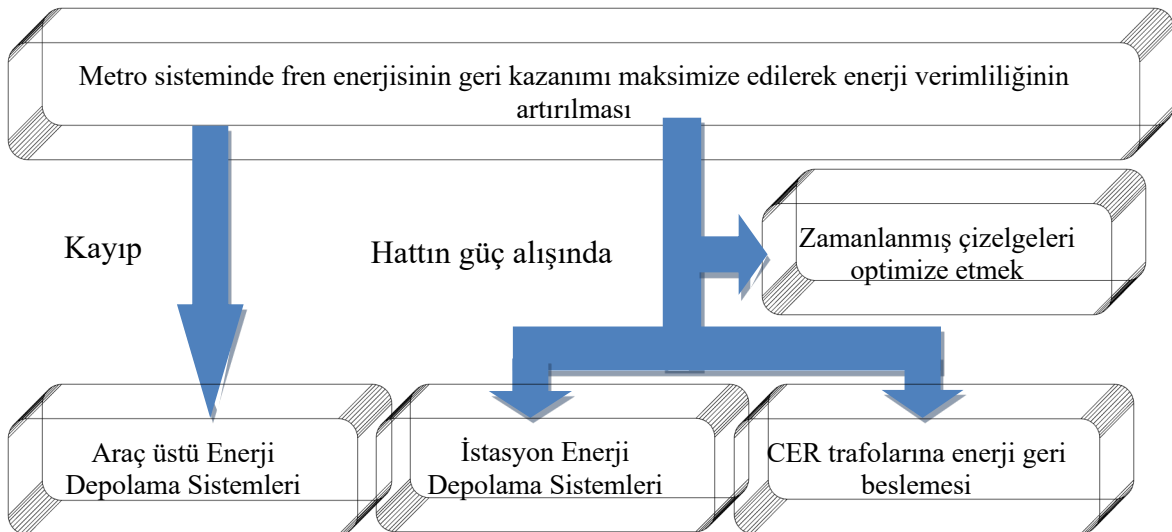
alternatif olmasını kesinlikle sağlamıştır. Günümüzde ESS, daha yüksek değerlerdeki spesifik enerji, daha yüksek spesifik güç değerleri, daha uzun yaşam döngüsü, daha düşük çevresel etki, daha düşük maliyet ve daha iyi dinamik performanslar garanti etmektedir.



Resim 5.3. Kentsel raylı araçlarda yerleşik ESS'nin şematik çalışması

Teknolojik çözümler ne olursa olsun faydaları açısından bakacak olursak sadece toplam enerji tüketiminde değil, gerilim regülasyonu, enerji ve güç kompanzasyonu ve hafif raylı sistem araçlarının harici bir güç kaynağından bağımsız olabilme imkânı sağlamaktadır. Dolayısıyla, raylı sistemlerin; şehir merkezi, meydanlar, tarihi binalar gibi bazı yerlerden geçen hatlarda estetik nedenlerden ötürü veya köprüler, yeraltı bölümleri ve tünellerde olduğu gibi havai telleri takmanın zor olduğu yerlerde uygulama imkânı vermektedir [55].

Şekil 5.1'de gösterilen özet diyagram, daha önce açıklanan stratejiler hakkında bir fikir vermektedir.



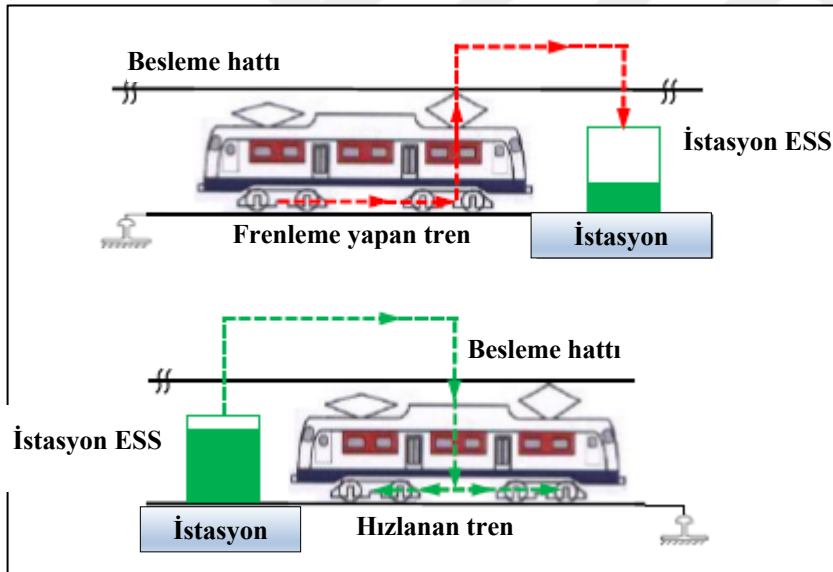
Şekil 5.1. Şebeke geri besleme enerjisini maksimize etmek için kullanılan stratejilerin özet diyagramı

ESS uygulaması ile ilgili olarak iki seçenek mümkündür.

Bunlardan ilki, genellikle araç çatısında yerleşik olan ESS'den oluşan mobil ESS (araç üstü ESS). Her sistem bağımsız olarak çalışmakta ve toplanan enerji doğrudan araçta bulunan depolama sistemine gönderilmektedir. Araç hızlandığında, aracın kalkışı için ESS'den öncelikli olarak enerji kullanılmaktadır. Bu sistem Resim 5.3'de gösterilmiştir.

İkincisi ise, besleme istasyonunda veya yol boyunca yerleştirilen bir veya birkaç ESS'den oluşan sabit ESS (yol kenarı ESS). Bu cihazlar, başka bir araç enerjiyi almadığında aşırı enerjiyi geri kazanmaktadırlar. Bu sistem Resim 5.4'de gösterilmektedir.

Elektrikli demiryolu hattında radikal değişikliklerin önlenmesi için elektrik enerjisinin depolama aygıtları ile geri kazanılması son derece etkili bir çözümdür.



Resim 5.4. Kentsel ray uygulamaları için sabit ESS'nin şematik çalışması

Bu amaçla, son yıllarda gelişmiş elektrokimyasal piller, volanlar ve ultrakapasitörler gibi çeşitli depolama teknolojileri geliştirilmiştir. Bu cihazların tümü farklı performanslara ve ömür tüketim maliyetlerine sahiptir. Yüksek enerji yoğunluğu değerlerine rağmen, pillerin sınırlı yük çevrimi sayısı problemi bulunmaktadır. Bu nedenle, volanlar ve ultra kapasitörler (UC) bu kapsam için en uygun çözüm sayılabilirler, çünkü tipik güç yoğunlukları 5 kW / kg'dan fazla, 106 devirden fazladır. Seri veya paralel olarak yapılandırmak için farklı voltajlara adapte etmek kolaydır. Demiryolu sistemleri

tedarikçileri, işletmecileri ve araştırmacıları ilgili literatürdeki birçok yazı ile bu sistemleri ve uygulamaları vurgulanmaktadır.

Araç üstü çözüm sisteminde depolama aygıtını yerleştirmek için arabaların yeniden tasarlanması gerekmektedir. Bu durumda, hareketli uygulamalarda volanların pratik sınırlaması nedeniyle yalnızca bir UC kullanılabilir.

Her durumda, yeni bir teknoloji olduğu için, yukarıda sözü edilen rejeneratif frenleme avantajlarına rağmen, geri kazanılan enerji fren reostalarında atılmak üzere tasarlanmıştır. Bu enerjinin yalnızca küçük bir kısmı yardımcı araç sistemleri tedarik etmek veya besleme hattına geri göndermektedir. Bu alandaki tecrübesizlik, operatörlerin ve yerel yetkililerin, kentsel demiryolunun enerji verimliliğini artırmak için bir önlem olarak enerji depolama sistemlerine yatırım yapma fırsatı kaçırmalarına neden olmaktadır.

Bir sonraki bölümde hem yerleşik hem de sabit uygulamalardaki UC depolama teknolojisi, metro sisteminde ESS için en uygun olan seçenek olarak tanımlanacaktır [55].



6. ULTRA-KAPASİTÖR

6.1. Ultra-Kapasitör Tanımı

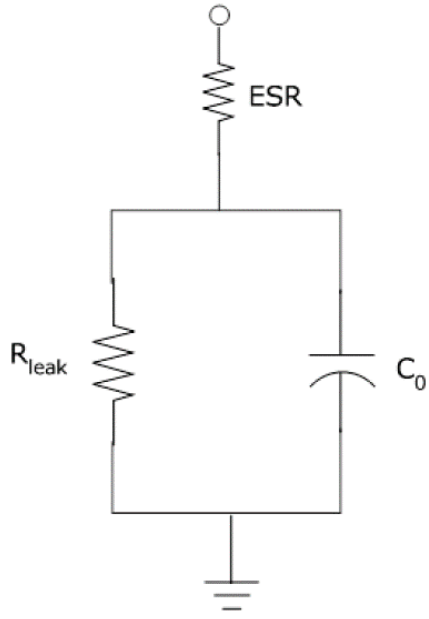
Ultra-kapasitör, enerji seviyesindeki hızlı dalgalanmaları giderebilen bir enerji depolama aygıtıdır. Ultra-kapasitörler, enerji yoğunluğunu önemli ölçüde azaltır, ancak pillerle karşılaştırıldığında daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Piller daha sonra elektrik enerjisi olarak serbest bırakılan enerjiyi depolamak için kimyasal işlemler kullanılmaktadırlar. Ancak ultra-kondansatörler şarj ayırımı ile enerji depolamaktadırlar.

Elektrolitik kondansatörlerin fiziği ilk olarak 1853 yılında Hermann von Helmholtz tarafından ortaya çıkarıldı ve bir kondansatördeki bir iletken ile elektrolit arasındaki etkileşimin elektrostatik ilişkilerle gerçekleştiğini, ancak kimyasal tepkime sürecinde yer almadığını tespit etmiştir. Ultra-kondansatör bu teoriyi esas alır ve orijinal kondansatör tasarımının geliştirilmiş bir versiyonudur [56].

6.2. Ultra-Kapasitör Eşdeğer Modeli

Bir ultrakondansatörün temel eşdeğer devre modeli Şekil 6.1'de gösterilmektedir. a) C_0 , kapasitör b) şarj ve deşarj sırasında oluşan kayıpları temsil eden Eşdeğer Seri Direnç (ESR), c) Kendini deşarj etkisini temsil eden, C_0 ve ESR direncine paralel direnç R_{leak} olarak kullanılacaktır.

Gerçek ultra-kapasitör modeli, temel modelde kullanılan tüm parçaları ve değişken kapasitans gibi bazı ek parçaları içermektedir. Değişken kapasitans, ultrakapasitörün terminalleri boyunca uygulanan gerilimle doğrusal olmayan şekilde değişmektedir. Yük gücü profilinin, ultra kapasitörün hızlı ve yük talebine eşit şekilde yanıt vermesini gerektiren hızlı ve tekrarlayan değişikliklere sahip olduğu doğru bir modele ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, metro hatlarındaki trenlerin yaklaşık olarak sabit bir sürüş döngüsü olduğundan, doğru bir modele gerek yoktur. Çoğu rotada, sürüş başına yalnızca bir hızlanma ve bir yavaşlama oluşmaktadır. Bu nedenle, bu tezde simülasyonlar için Şekil 6.1'de gösterilen temel ultra-kapasitör modeli kullanılacaktır.



Şekil 6.1. Bir ultra-kapasitör eşdeğer devresi [57].

7. UYGULAMA

Son yıllarda toplu taşımada ve özellikle yeni açılmış olan raylı sistem hatlarıyla şehir içi toplu taşıma konusunda gelişmesini sürdüren Ankara şehri bu tez çalışmasında incelenmiştir. Çalışma da ilk olarak Ankara’da ulaşımın genel ve istatistiksel bilgileri verilmiştir. Ayrıca ulaşım türlerinin şehrin bütün ulaşımındaki yüzdelik payına değinilmiş ve metro hatları hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Raylı sistem M2 (Kızılay-Çayyolu) Metro hattının verileri alınarak SimuX uygulanmasıyla geri kazanımlı frenleme enerjisinin analizi gerçekleştirilmiştir. M2 (Kızılay-Çayyolu) Metro hattının seçilmesinin nedeni, diğer yeni açılan hatlara göre sinyalizasyon sisteminin büyük oranda tamamlanması ve ikili set şeklinde kullanıma geçirilmesinden kaynaklanmaktadır.

Simülasyon yazılımı ile Rejeneratif enerjiye etki eden parametreler analiz edilip sonuçları değerlendirilecektir. Sonuç olarak, metropoliten demiryolu sistemlerinde rejeneratif fren enerjisini için bir enerji depolama sistemi olarak ultra-kapasitörlerin kullanımı analiz edilmiştir. Bu tez çalışmasında Ankara Metro sistemi incelenmiş olup, rejeneratif geri kazanımlı enerjisini analiz etmek için ultra-kapasitör modülleri boyutlandırılmış ve ayrıca simülasyon üzerinden bir kontrol sistemi kurulmuştur.

Simülasyon parametrelerinde;

- AW0 yükünde yolcusuz aracın maksimum işletme ağırlığı,
- AW1 yükünde Tüm yolcu oturakları dolu iken (yolcu + sürücü) yük + AW0 yükü
- AW2 yükünde 4 yolcu/m² durumunda ayaktaki yolcu ağırlığı + AW1 yükü
- AW3 yükünde 6 yolcu/m² durumunda ayaktaki yolcu ağırlığı + AW1 yükü
- AW4 yükünde 8 yolcu/m² durumunda ayaktaki yolcu ağırlığı + AW1 yükü olacak şekilde incelenmiştir.

Ankara M2 metrosu CSR araçları ile yapılan simülasyon sonuçları aşağıda özetlenmiş durumda, AW2 ile gösterilen senaryoda aracın “AW2” yükünde olduğu, 90 sn. sıklıkla işletme yapıldığı, aracın maksimum ivmelenmesinin 1.1 m/s² fren ivmesinin de 1.1 m/s²

olduğu varsayılmıştır. Kullanılan aracın yardımcı gücü 65 kW olup simülasyonlarda %50 kullanım oranı varsayılmıştır.

7.1. Enerji Tüketimine Etki Eden Ana Parametrelerin İncelenmesi

Bu bölümde işletme sıklığının, tren ağırlığının, başlangıç ivmesinin trenin performansına, harcadığı elektrik enerjisine ve kullandığı elektrik enerjisine olan etkilerinin öğrenilebilmek için simülasyon programlarınca yapılan analizler hem tablo hem de grafik halinde verilerek incelenecektir.

7.1.1. İşletme sıklığının etkisi

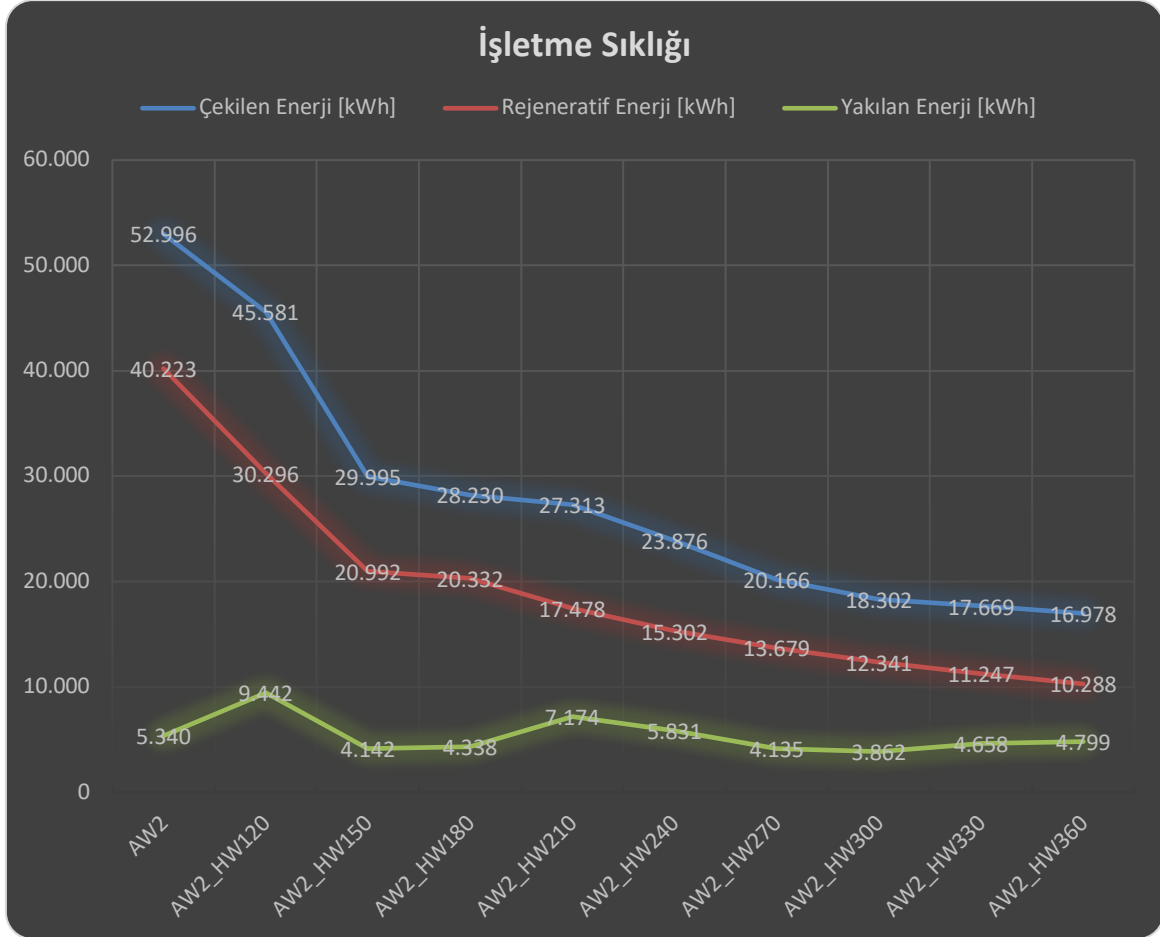
İşletme sıklığının etkisi hattaki geri kazanım oranını ve dolayısı ile enerji tüketimini etkiler. İşletme sefer aralıklarının küçük olması, tanımlanmış bir güç bölgesinde daha çok aracın aynı anda var olması ve dolayısı ile ivmelenen, frenleyen trenlerin eş zamanlı bulunma olasılığının artması demektir.

Bu çalışmada, AW2 (added weight) yükünde, HW (Headway) yani seferler arasındaki zaman 90 saniyeden başlayarak, 360 saniyeye kadar, 6'lı tren seti için toplam 10 farklı sefer aralığı için SimuX yardımı ile simülasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.1' de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. 6'lı tren seti için değişik sefer aralıklarındaki talep ettiği enerji ve bu enerjinin rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı

İsim	Çekilen Enerji [kWh]	Rejeneratif Enerji [kWh]	Yakılan Enerji [kWh]	Km başına araç düşen enerji [kWh/vhc/km]	Alıcılık Oranı [%]	Geri Kazanma Oranı [%]
AW2 HW90	52.996	40.223	5.340	3,25	87	40
AW2 HW120	45.581	30.296	9.442	3,72	69	31
AW2 HW150	29.995	20.992	4.142	2,99	80	36
AW2 HW180	28.230	20.332	4.338	3,44	79	36
AW2 HW210	27.313	17.478	7.174	3,88	59	27
AW2 HW240	23.876	15.302	5.831	3,87	62	28
AW2 HW270	20.166	13.679	4.135	3,66	70	32
AW2 HW300	18.302	12.341	3.862	3,69	69	32
AW2 HW330	17.669	11.247	4.658	3,91	59	27
AW2 HW360	16.978	10.288	4.799	4,09	53	24

Simülasyon sonuçlarında da görüldüğü üzere sefer aralıkları arttıkça trenler arasındaki mesafe arttığından dolayı enerjinin geri alınması düşmektedir. Dolayısı ile rejeneratif enerjinin geri kazanılma oranı da azalmaktadır. Çizelgeye baktığımız da 90, 120, 150 ve 180 saniye sefer aralıklarında rejeneratif enerji geri kazanımı için en ideal işletme senaryosu olduğu sonucu çıkmaktadır.



Şekil 7.1. Tren işletme sıklığına göre rejeneratif enerji

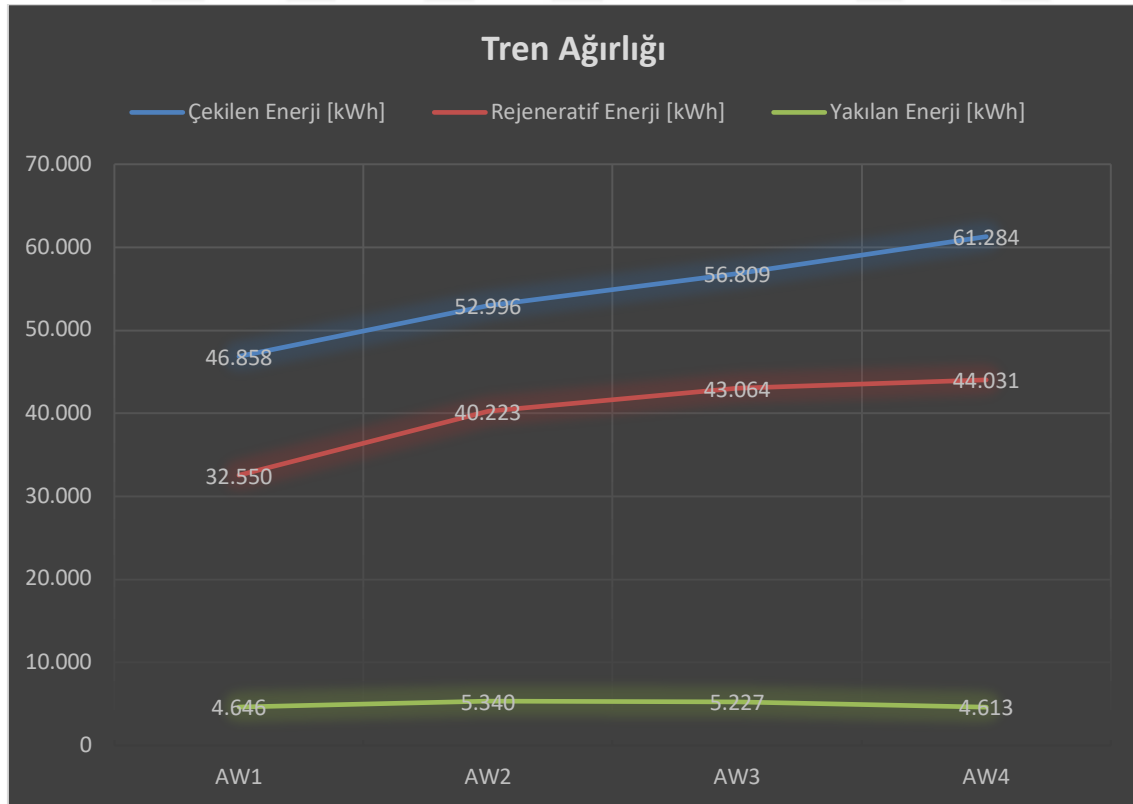
7.1.2. Tren ağırlığının etkisi

Trenin yolcu ağırlığının artırılması ile farklı ağırlıklarda enerji tüketimine etkisini incelenecektir. 6'lı tren setinin bir sefer süresinde, trenin AW1 yükündeki ağırlığından başlayarak, AW2, AW3, AW4 yüklerinde ki enerji tüketimi ilişkisi incelenmiştir. Bir kişinin ağırlığı 70 kg alınmıştır. Bu çalışma simülasyon programı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.2' de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 7.2' de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Farklı tren ağırlıkları için enerji tüketimi

İsim	Çekilen Enerji [kWh]	Rejeneratif Enerji [kWh]	Yakılan Enerji [kWh]	Km başına araç düşen enerji [kWh/vhc/km]	Alıcılık Oranı [%]	Geri Kazanma Oranı [%]
AW1	46.858	32.550	4.646	2,88	86	37
AW2	52.996	40.223	5.340	3,25	87	40
AW3	56.809	43.064	5.227	3,49	88	40
AW4	61.284	44.031	4.613	3,77	90	39

Sonuçlar incelendiğinde farklı tren ağırlıklarının rejeneratif enerji üzerindeki etkisi AW1 yükünde yani trenin boş ağırlığı altında iken geri kazanım oranının biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak tren boş ağırlığındayken hattan alınan enerji ve üretilen rejeneratif enerji değerinin AW2, AW3 ve AW4 yüklerine göre daha az olduğundan Şekil 7.2’de görülen grafikte de görüldüğü üzere rejeneratif enerji açısından doğrusal artış olmuştur. Ardından diğer yüklerde eğriler düzleşmektedir.



Şekil 7.2. Farklı yolcu ağırlıklarına göre rejeneratif enerji

7.1.3. Hızlanma ivmesinin etkisi

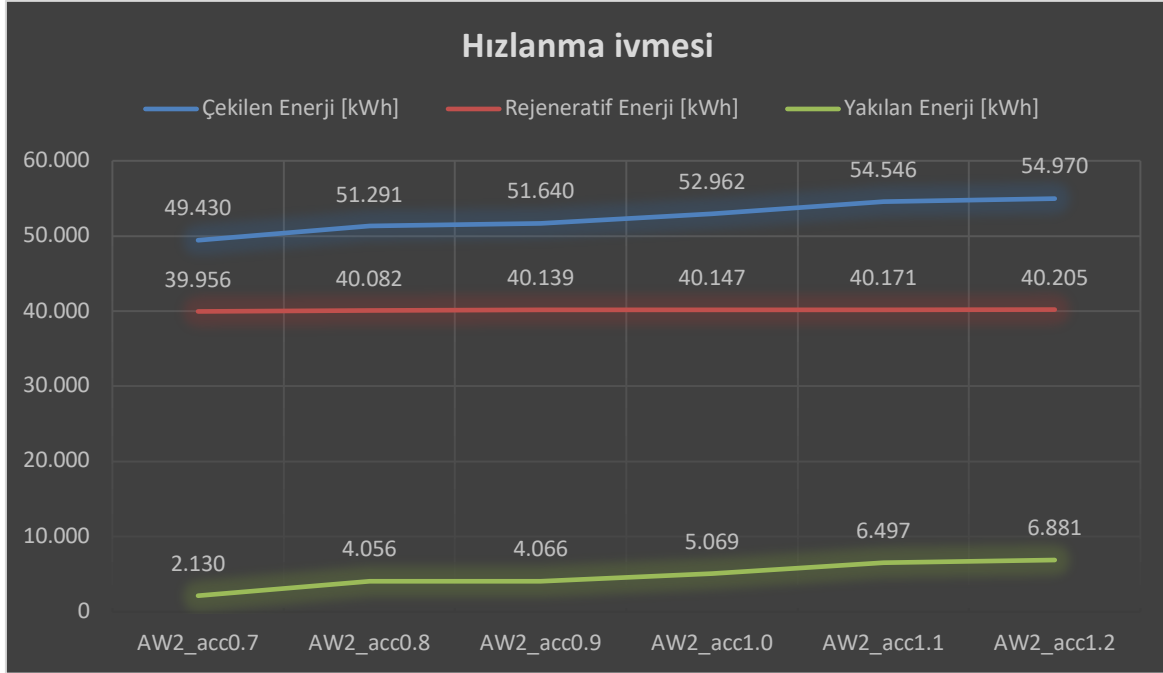
Hızlanma ivmesi, aracın kalkış anında uyguladığı ivmedir. Bu çalışmada hızlanma ivmesine ait değerin, enerji tüketimine ve trenlerin geliş ve gidiş yönlerindeki toplam yolculuk süresi olan tur süresine etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada, 6'lı tren seti için sabit bir sefer aralığında hatta kullanılan araçların en küçük hızlanma ivmesi 0.7 m/s^2 'den başlayarak, 0.1 m/s^2 'lik aralıklarla, en büyük hızlanma ivmesi olan 1.2 m/s^2 değerlerini arasındaki değerleri simuX yardımı ile simülasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.3' de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 7.3' de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Farklı hızlanma ivmeleri için enerji tüketimi

İsim	Çekilen Enerji [kWh]	Rejeneratif Enerji [kWh]	Yakılan Enerji [kWh]	Km başına araç düşen enerji [kWh/vhc/km]	Alıcılık Oranı [%]	Geri Kazanma Oranı [%]
AW2_acc0.7	49.430	39.956	2.130	3,05	95	43
AW2_acc0.8	51.291	40.082	4.056	3,16	90	41
AW2_acc0.9	51.640	40.139	4.066	3,18	90	41
AW2_acc1.0	52.962	40.147	5.069	3,26	87	40
AW2_acc1.1	54.546	40.171	6.497	3,35	84	38
AW2_acc1.2	54.970	40.205	6.881	3,38	83	38

Sonuçlar incelendiğinde artan ivme ile enerji tüketiminin arttığı, yolculuk süresinin ise azaldığı görülmektedir. Ancak farklı hızlanma ivmeleri için enerjinin geri alınmasında fazla değişiklik söz konusu olmamıştır. Dolayısı ile rejeneratif enerjinin geri kazanılma oranı da yüksek seviyelerde olup hafif farklılıklarla değiştiği görülmektedir.



Şekil 7.3. Farklı hızlanma ivme değerlerine göre rejeneratif enerji

Şekil 7.3 incelendiği zaman artan ivme ile enerji tüketiminin arttığı görülmektedir. Rejeneratif enerjinin bütün ivme değerlerinde fazla farklılıklar göstermediğinden dolayı eğriler düzgündür. Bunun sebebi araçların ürettiği cer kuvvetidir. Yakılan enerji eğrisine bakıldığında 0.7 m/s^2 ivme değerinden sonra eğriler artarak devam etmekte olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ivmelenme arttıkça hattan çekilen gücün fazla olması ancak rejeneratif gücün sabit kalmasından dolayıdır.

7.1.4. Frenleme ivmesinin etkisi

Frenleme ivmesinin değeri de yine hattan çekilen enerji ile doğrudan bağlıdır. Frenleme ivmesinin azaltılması, enerji geri kazanım oranına etki etmektedir. Daha düşük frenleme ivmesi daha yüksek geri kazanım oranı vermektedir. Ayrıca bir aracın km başına tüketilen enerji frenleme ivme oranı ile birlikte azalmaktadır. Ancak, bu kazançlara karşılık bir kayıp oluşmaktadır. Bu kayıp düşük frenleme ivmeleri için trenlerin sefer aralıkları değerini de etkilemektedir.

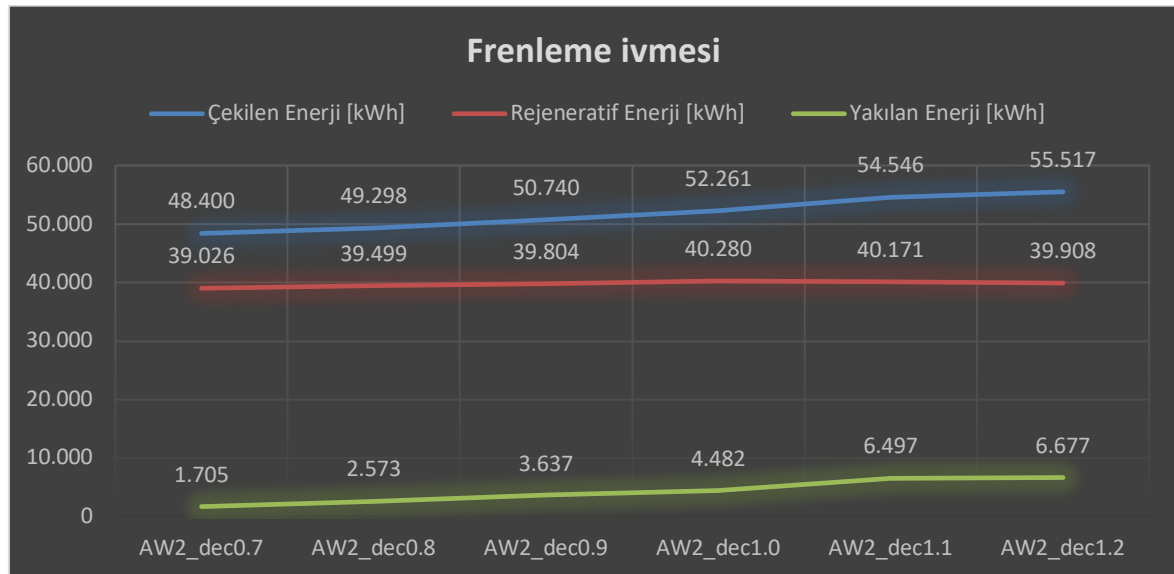
Bu çalışmada, 6'lı tren seti için sabit bir sefer aralığında hatta kullanılan araçların en büyük frenleme ivmesi 1.2 m/s^2 ve en küçük hızlanma ivmesi 0.7 m/s^2 arasındaki değerleri

değiştirerek yine simuX yardımı ile simülasyon testleri yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.4’ de özetlenmiş ve grafik olarak da Şekil 7.4’ da verilmiştir.

Çizelge 7.4. Farklı frenleme ivmeleri için enerji tüketimi

İsim	Çekilen Enerji [kWh]	Rejeneratif Enerji [kWh]	Yakılan Enerji [kWh]	Km başına araç düşen enerji [kWh/vhc/km]	Alıcılık Oranı [%]	Geri Kazanma Oranı [%]
AW2_dec0.7	48.400	39.026	1.705	2,98	96	44
AW2_dec0.8	49.298	39.499	2.573	3,04	93	43
AW2_dec0.9	50.740	39.804	3.637	3,12	91	42
AW2_dec1.0	52.261	40.280	4.482	3,21	89	41
AW2_dec1.1	54.546	40.171	6.497	3,35	84	38
AW2_dec1.2	55.517	39.908	6.677	3,41	83	37

Sonuçlar incelendiğinde farklı frenleme ivmeleri için enerjinin geri alınmasında 1.1 m/s² değerine kadar fazla değişiklik söz konusu olmamıştır. Dolayısı ile rejeneratif enerjinin geri kazanılma oranı da 1.1 m/s² frenleme ivmesi değerine kadar yüksek seviyelerde olup hafif farklılıklarla değiştiği görülmektedir.



Şekil 7.4. Farklı frenleme ivmelenme değerlerine göre rejeneratif enerji

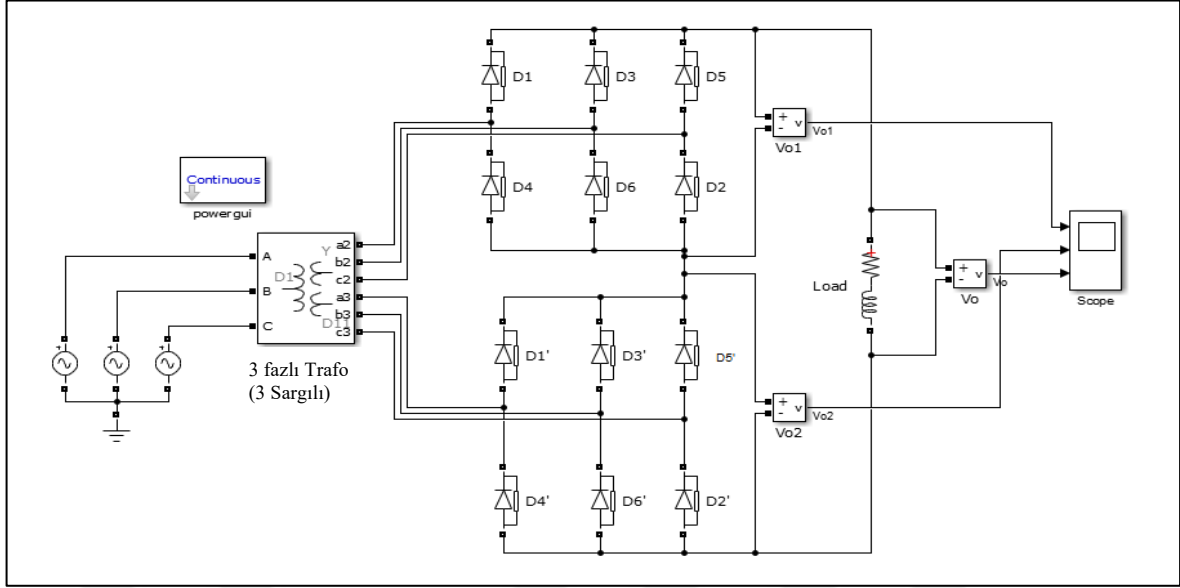
Şekil 7.4 incelendiği zaman artan frenleme ivmesi ile enerji tüketiminin arttığı görülmektedir. Regeneratif enerji, 1.1 m/s^2 frenlenme ivmesi değerine kadar hafif artış göstermiş olup, 1.1 m/s^2 frenleme ivme değerinden sonra azalışa geçtiği görülmektedir. Yine de bütün ivme değerlerinde fazla farklılıklar göstermediğinden dolayı eğriler düzgündür. Hızlanma ivmesinde olduğu gibi yine bunun sebebi araçların ürettiği cer kuvvetidir. Yakılan enerji eğrisine bakıldığında 0.7 m/s^2 ivme değerinden sonra eğriler artarak devam etmekte olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ivmelenme arttıkça hattan çekilen gücün fazla olması ancak regeneratif gücün sabit kalmasından dolayıdır.

7.2. DC Merkezi Tasarım

Bir DC demiryolu tasarlamadan önce, DC trafo merkezi konfigüre edilmeli ve tasarlanmalıdır. Santraller AC gerilimle beslenir. Trafo altındaki transformatörleri kullanarak gerilim demiryolunun gerektirdiği şekilde azaltılır; ayrıca AC, doğrultucular kullanarak DC'ye dönüştürülür. Mevcut sistemlerden 24, 12 ve 6 darbeli doğrultucu olmak üzere 3 farklı doğrultucu kullanılmaktadır. DC demiryolu için kullanmak için 24-darbeli doğrultucu çok pahalı olduğundan DC demiryolu sistemleri için kullanılamayıp daha ziyade 6-darbeli doğrultucu da düzgün DC vermeyip istenilen düzeyde dalgalanma yarattığından mevcut çalışmada da 12 darbe doğrultucu sistemleri kullanılmıştır.

7.3. AC-DC 12 Darbe Trafosu Doğrultucu Modellemesi

12-darbeli doğrultucu, tüm DC yüklerine gereken DC gücü sağlayan değişken frekanslı bir AC veri yoluna bağlı sistemlerdir. Bu konvertör, yüksek güvenilirlik ve düşük giriş akım harmonikleri ile bilinmektedir. 12-darbeli doğrultucunun yapısını gösteren Şekil 7.5'de gösterildiği gibi, dönüştürücüsü 2 köprü doğrultucularından oluşmaktadır. Böylece her köprü 6 diyot içermektedir. 12-darbeli doğrultucu Y olarak bağlı bulunduğu trafonun primerine bağlanmıştır: Y: Δ harmonik akımlarını düşüren ve güç faktörünü (PF) geliştiren sekonder tarafta bir faz kaymasına neden olan Δ bağlı trafo kullanılmıştır.



Şekil 7.5. 12-Darbeli doğrultucu

12-Darbe doğrultucudan çıkan dc gerilim kapasitör üzerinden, ortalama çıkış gerilimi ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanacaktır.

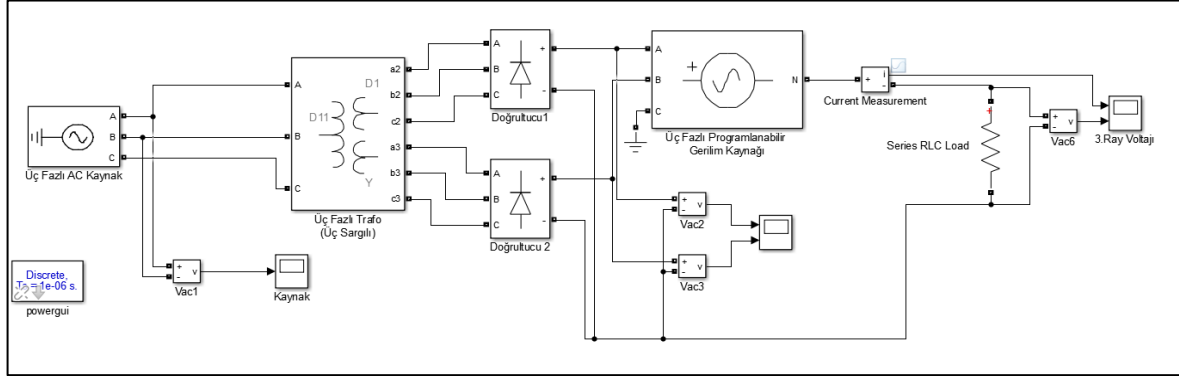
$$V_{dc} = 3 \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{peak,line-neutral} = \frac{3}{\pi} V_{peak,line-line} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{rms,line-line} \quad (7.1)$$

Teorik olarak, trafo merkezindeki jeneratörün gereği, 50 Hz frekansta 589 V rms hattan hat gerilimine kadar besleme yapmaktır. Dolayısıyla; 12-Darbe Doğrultucudan DC kondansatör üzerindeki DC çıkış gerilimi aşağıda gösterildiği gibi belirlenebilir.

$$V_{dc} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{rms,line-line} = V_{dc} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} (589) = 795,4 \text{ V}$$

7.4. Matlab/Simulink’de Trafo Merkezinin Genel Tasarımı

Matlab/Simulink bilgisayar programını kullanarak bir trafo, Şekil 7.6’da gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Trafodan AC güç elde dileyebilmesi için üç fazlı AC kaynak gereklidir. Ek olarak; Δ : Δ : Y harmoni akımını azaltmak ve güç faktörünü arttırmak için ve sekonder sargılar üzerinde bir faz kayması üretmek için Y bağlı transformatöre ihtiyaç vardır. Ayrıca iki tam köprü doğrultucu içeren AC-DC 12 darbe kontrolsüz tam köprü doğrultucu, DC çıkış gerilimi olarak 12 darbe üretmek için fazlar arası trafo ile paralel bağlanmıştır.



Şekil 7.6. Uygulama çalışmasının yapıldığı trafo merkezinin Matlab/Simulink modeli

Çizelge 7.5’de ve Çizelge 7.6’da istasyon modelinde kullanılan tüm parametreleri gösterilmektedir. Bazı değerler varsayılan seçilmiştir. Çünkü başka bir değer için test edildiğinde ve çok fazla değişiklik yapılması gerektiği görülmüştür.

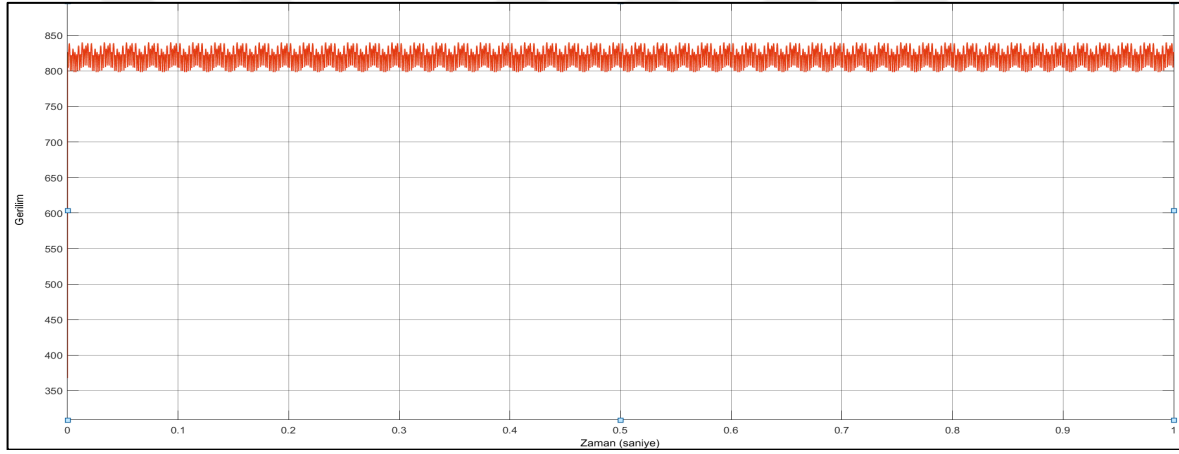
Çizelge 7.5. Üç faz enerji kaynağı parametreleri

Parametreler	Veri	Verinin Kaynağı
Faz-faz gerilimi rms voltaj (kV)	11	Ankara Metrosu Verisi
Frekans (Hz)	50	Standart Değer
3 faz kısa devre voltajı (MVA)	100	Matlab varsayılan değeri
Baz voltajı (kVrms ph-ph)	11	Matlab varsayılan değeri
X/R oranı	7	Matlab varsayılan değeri

Çizelge 7.6. Üç faz trafo merkezi parametreleri

Parametreler	Veri	Verinin Kaynağı
Nominal Güç [MPn (VA)]	2.75	Ankara Metrosu Verisi
Frekans (Hz)	50	Standart Değer
1. sargı parametreleri [V1 kPh-Ph (Vrms), R1(pu), L1(pu)]	[11, 0.002, 0.08]	Ankara Metrosu Verisi
2. sargı parametreleri [V2 Ph-Ph (Vrms), R2(pu), L2(pu)]	[589, 0.002, 0.08]	Hesaplanan değer
3. sargı parametreleri [V3 Ph-Ph (Vrms), R3(pu), L3(pu)]	[589, 0.002, 0.08]	Hesaplanan değer
Mıknatıslanma direnci Rm (pu)	500	Matlab varsayılan değeri
Mıknatıslanma endüktansı Lm (pu)	500	Matlab varsayılan değeri

Aşağıdaki resim 2200 kW'lık saf bir DC direnç yüküne bağlı bir trafo doğrultucusunun tasarım modelini simüle eden sonuçları göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, 3. demiryolu ile toprak arasındaki gerilimin 675V civarında olduğu açıktır; 3. ray ve toprak arasındaki DC çıkış gerilimi yaklaşık 120 V'dir, iki gerilim değerini ekleyerek, minimum 795V'luk kombine bir gerilim değeri elde edilir; bu değer, trafo merkezinden (750 V DC) gelen tipik DC çıkış geriliminden transformatör olarak doğrultucu boyunca gerilim düşmesine neden olur. Yükün çektiği akımın teorik değeri $2200/750 = 2.93$ kA olacaktır. 3.Rayda elde edilen minimum 795 Volt değerinden ise $2200/795 = 2.76$ kA civarında olduğu hesaplanmıştır. Metro hattında tren üzerindeki monitörden trenin çektiği akım ve hat voltajı izlenmiş olup, 700 V ile 895 V arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.7. Bir CER trafosunun DC simülasyon sonucu

7.5. Tren Modellemesi

Tren setlerinin dört olası kompozisyonu bulunmaktadır. A aracı motorlara sahip tren seti, B aracını ise römork olarak adlandırılmaktadır. Bu dört olası kombinasyon Çizelge 7.7'de ifade edilmiştir.

Çizelge 7.7. Tren setlerinin gösterimi

A	Bir tren aracı
B	Bir römork aracı
ABA	Bir römork ile iki araç (Tek set)
ABA ABA	İki ünite (İkili set)

Çizelge 7.8. Tren setleri kombinasyonlarının özellikleri

	Yolcuların Sayısı			Toplam Tahmini Kütle		
	Koltuk	Ayakta	Toplam	Yolculu	Boş	Toplam
A	42	294	336	23.506	41.257,3	64.777,3
B	42	315	357	24.976	37.903,3	62.893,3
ABA	126	903	1029	72.030	120.417,9	192.447,9
ABA ABA	252	1806	2058	144.060	240.835,8	384.895,8

VDV 152 standardına istinaden, BOStrab'a uygun olan toplu taşıt araçlarının yapısı gereği, yolcu konforunu göz önünde bulundurularak, koltuk önünde 300mm bacak koyulabilecek boşluk bırakılarak kişi sayısı belirlenmiştir ve her kişi 70 kg ağırlığında olacak şekilde değerler sunulmuştur.

Çizelge 7.9. Mekanik parametreler

Nominal Hız	72
Maksimum Hız	88
Boji tipi	Demir tekerde çarkta her araç için 2 aks olmak üzere 2 boji, diferansiyel aksı başına 1 motor
Aktarma Oranı	Redüktör + Diferansiyel (1/GR)
M2 Hattı Maksimum Eğim	%1

Çizelge 7.10. Teker dönme ataleti

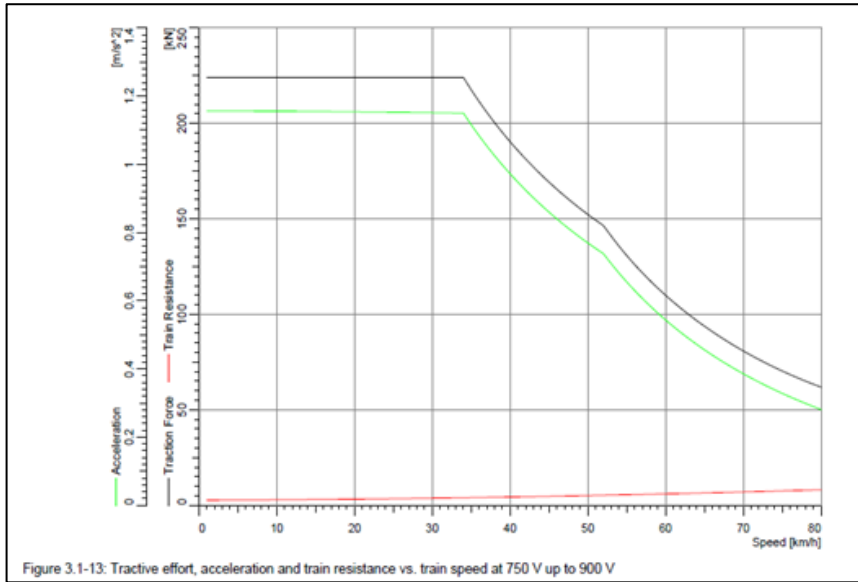
Teker Genişliği	135 mm
Yükseklik-Genişliğe Oranı	60 mm / 135 mm = %45
Kütle	301 kg
Yuvarlanma yüzeyinin yanak kalınlığına oranı	135/60 = 2.25

Çizelge 7.11. Çekiş motoru parametreleri

Motor Tipi	AC Series
Model	Siemens EN-JS1030
Güç	190 kW
Nominal Akım	261 amper
Nominal Voltaj	543 Voltaj

7.6. CRRC Treninin Mekanik Çalışması

Bu çalışma için "ABAABA" yapılandırması seçilmiştir. Bu yapılandırmada altı adet araç vardır ve bunlardan ikisi römork aracından oluşmaktadır. Her bojide iki dingil vardır ve her dingil iki teker bağlanmıştır. Bu nedenle, her araç sekiz teker ve dört motora sahiptir. Bu nedenle, bu konfigürasyonda, 16 motor ve 48 teker vardır. Şekil 7.7'de 750-900 V arasında trenin hız değerlerine karşılık gelen çekiş gücü, ivme ve tren direnci görülmektedir.



Şekil 7.8. CRRC aracı AW3 yükünde tren çekiş gücü eğrisi

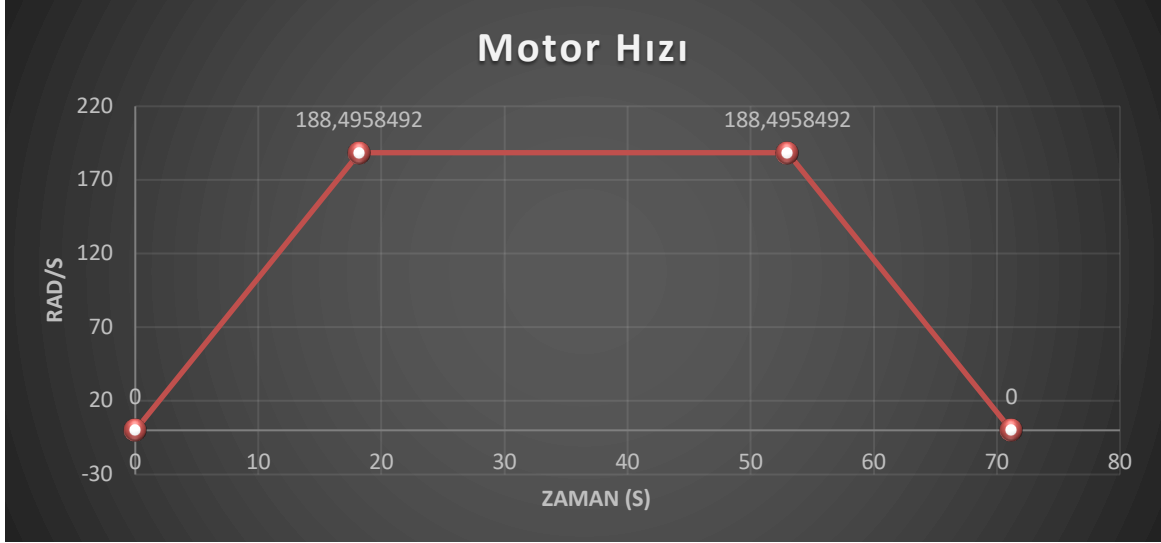
Eşitlik 6.2’de açısal-doğrusal hız formülü verilmiştir.

$$V \text{ (m/s)} = r \text{ (m)} \times \omega \text{ (rad/s)} \quad (7.2)$$

Eşitlik 6.3’de doğrusal hız formüllerinin rpm birimi üzerinden verilmiştir.

$$V \text{ (m/s)} = r \times \text{rpm (açısal hız)} \times 0.10472 \quad (7.3)$$

Motorun nominal rpm’i olan 1800 değeri alınmış ve nominal hız olan 72 km/h’a göre hesaplamalar yapılarak Şekil 7.8’de ki hız zaman grafiği basitleştirilerek elde edilmiştir.



Şekil 7.9. CRRC treni motor hızı

Şekil 7.9’da görüldüğü gibi, trenlerin sürüş grafiği üç moddan oluşmaktadır. Bunlar hızlanma, sabit hız ve yavaşlama yani frenleme durumlarıdır. Bu bölümde, her mod için tork ve güç hesaplanacaktır. Hesaplama bölümünde, bazı değişkenler sabit olacaktır. Bir 6’lı araç setinde toplam 48 teker arasından 32’i motorlara bağlanmış durumdadır. Geri kalanlar T aracında bulunmaktadır. Bu nedenle teker başına kuvvet almak için çekme kuvveti 32 ile bölünmelidir.

$$F_t = \frac{F_{TR}}{32} \quad (7.4)$$

Tekerlekteki tork, tekerin çekiş gücü ve yarıçapının çarpımına eşittir.

$$T_t = F_t \cdot r_{tire} \quad (7.5)$$

Her motor iki tekerleğe bağlanmıştır. Motor miline dağılan toplam tork değeri hesaplanacaktır.

$$T_m = \frac{2 \cdot T_t}{\eta \cdot GR} \quad (7.6)$$

Tekerlerin doğrusal hızlanması, dönüş hızlanması ve yavaşlaması Çizelge 7.8, Çizelge 7.9, Çizelge 7.10, Çizelge 7.11 ve Çizelge 7.12’de verilen parametrelerden hesaplanacaktır.

Çoğu metro hattındaki maksimum metro hızı yaklaşık 72 km / saattir. Bu nedenle maksimum hız 88 km/s yerine 72 km/s olarak alınacaktır. Tekerlerin doğrusal ivme süresi eşitlik 7.7'de verilmiştir.

$$a_{\text{tire}} = \frac{dV(t)}{dt} = 1.15 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (7.7)$$

Eşitlik 7.8'den elde edilen değerlerle tekerlerin dönme ivmesi verilmiştir.

$$\alpha_{\text{tire}} = \frac{dw(t)}{dt} = \frac{d\left(\frac{V(t)}{r_{\text{tire}}}\right)}{dt} = \frac{a}{r_{\text{tire}}} \quad (7.8)$$

$$\alpha_{\text{tire}} = \frac{1.15}{0.84} = 1.36 \text{ (rad/s}^2\text{)}$$

$$\alpha_{\text{tire}} = 12,98 \text{ (rpm/s)}$$

Eşitlik 7.9'da motor ivmesi hesaplanmıştır.

$$\alpha_{\text{motor}} = \alpha_{\text{tire}} \cdot GR = 12,98 \times 6,32 = 82.079 \text{ (rpm/s)} \quad (7.9)$$

Tekerlerin frenleme ivmesinde de aynı hesaplamalar geçerli olduğu gösterilmiştir.

$$\alpha_{\text{motor}} = \alpha_{\text{tire}} \cdot GR = -12,98 \times 6,32 = -82.079 \text{ (rpm/s)}$$

Çizelge 7.12. CRRC trenin parametreleri

Bir aracın uzunluğu	22,784 metre
Bir aracın genişliği	3,150 metre
Tren setinin Cephe yüzeyi	7,95 m ²
Teker yarıçapı	760 mm- 840 mm
Hava yoğunluğu ρ	1.080 kg/m ³
Aerodinamik sürüklenme katsayısı (C_D)	0.35
% Eğim	%4
GR	6,32
Dişli Verimi (transmisyon verimliliği)	%98

Çizelge 7.12. (devam) CRRC trenin parametreleri

Metro aracı Kombinasyonu	ABA ABA
Metro aracı ağırlığı	384.895,8 kg
Motorların sayısı	16
Hat voltajı	750 VDC
Motor verimliliği	%94
Jeneratör verimliliği	%82
Yuvarlanma Direnci (C_0)	0.008
C_1	8×10^{-4}
Yerçekimi ivmesi	9.8 m/s^2

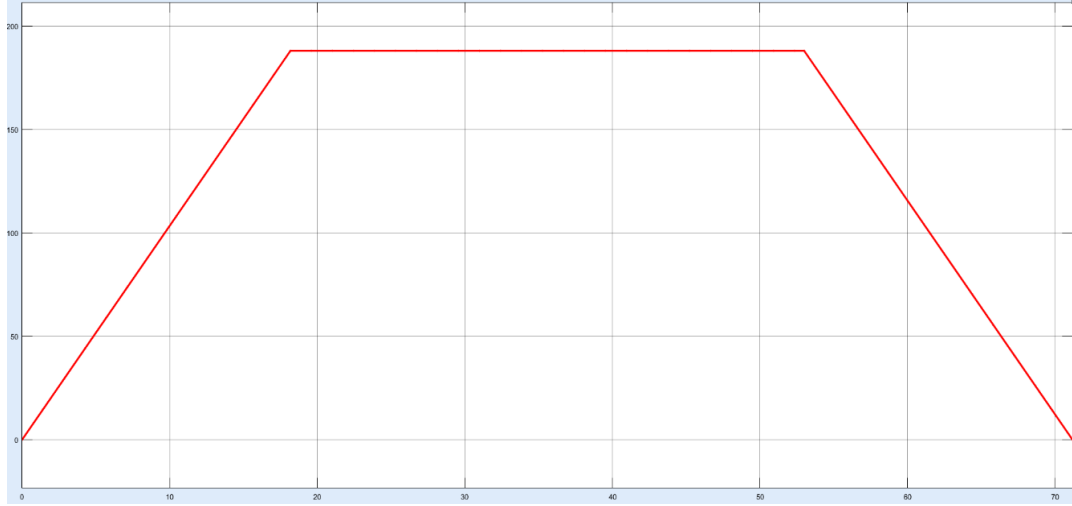
7.7. Trenin Güç ve Tork Hesabı

Şekil 7.8’de kolay anlaşılır hız zaman grafiği üzerinden güç ve tork kuvveti hesaplanacaktır. Bir Matlab / Simulink modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modele göre yük gücü ve tork kuvveti grafiklerde gösterilmiştir.

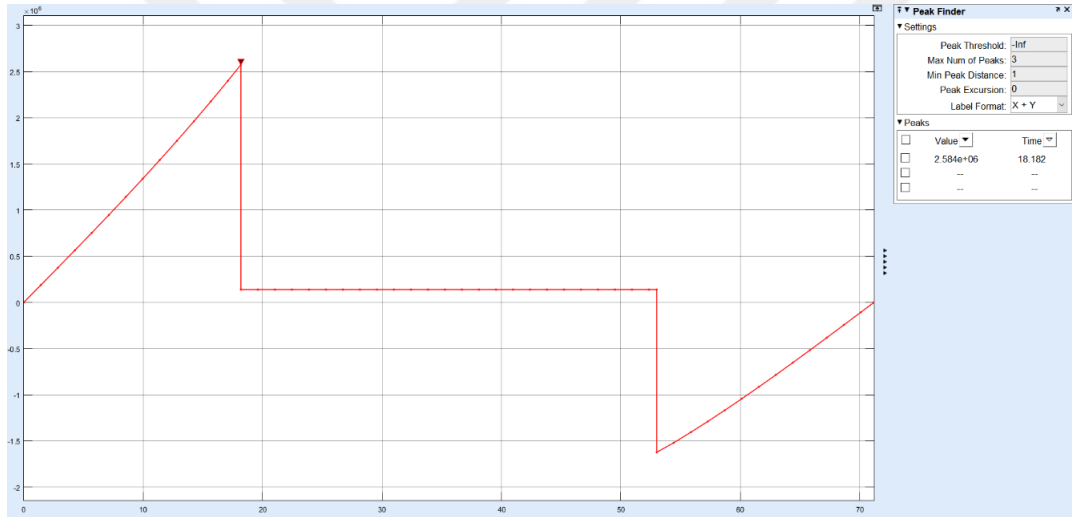
Sinyal oluşturuç bloğu Şekil 7.8’de ki makine hızını üretmek için kullanılmıştır. Simülasyon bloğundan motor yük momenti Şekil 7.9’da gösterilmektedir. Trenin %1 eğimle, AW3 yükünde olduğu varsayılmıştır. Hızlanma periyodundaki tork, 1.27 kN.m’den başlar ve sürücü çevrim süresinin sonunda 13.74 kN.m’ye ulaşmaktadır. Yavaşlama periyodunda, tork başlangıçta -8.63 kN.m ve sonun ise -9.32 kN.m’ye ulaştığı gösterilmiştir. Bu iki durumda tork değerleri Çizelge 6.13’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.13. Motorun toplam tork ortalaması

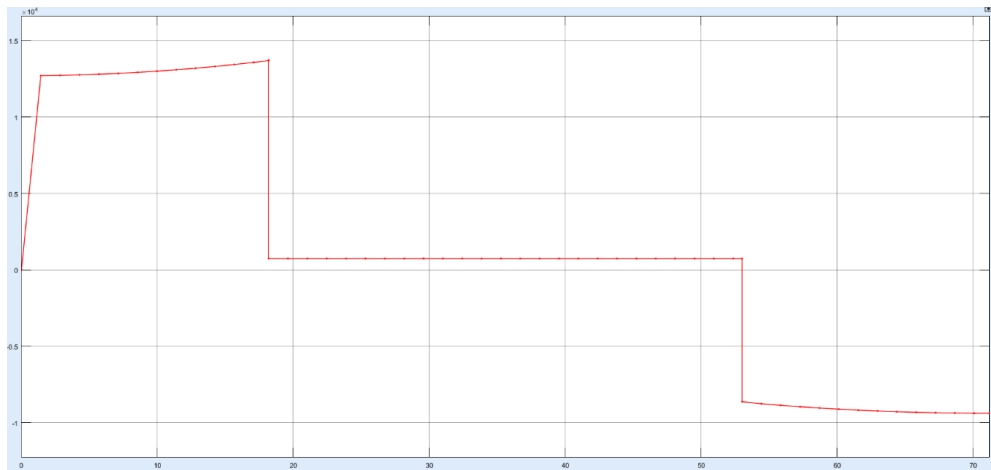
Mod	T_{TM} kN.m
Maksimum	13.74
Minimum	-9.32



Şekil 7.10. Hesaplanan motor hızı



Şekil 7.11. Motorun güç profili



Şekil 7.12. Motorun toplam torku

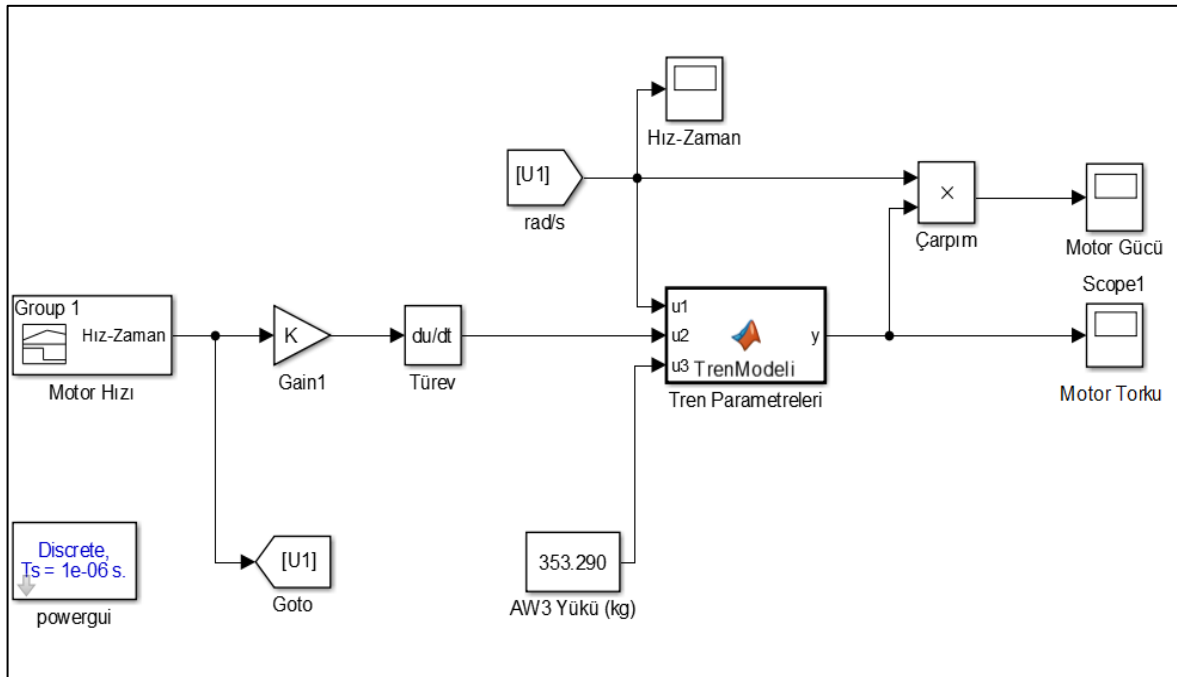
Anlık hız ve torkun çarpımı olan motor toplam gücü Şekil 7.12'de gösterilmektedir. Üç değerinde ortalama güç eşitlik 6.10'dan hesaplanmıştır ve Çizelge 7.14'de gösterilmiştir.

$$\overline{P_{TR}} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} P_{TR}(t) dt \quad (7.10)$$

Çizelge 7.14. Ortalama motor gücü

Mod	Güç MW
Maksimum Hız	2.584
Sabit hız	0.139
Yavaşlama Hızı	-1.609

Sonuç olarak, Ankara metro tren seti modeli CRRC araçları için tanıtılmıştır. Hareketli bir aracı etkileyen kuvvetler kısaca anlatılmıştır ve CRRC tren seti için hesaplanmıştır. Daha sonra, hesaplanan kuvvetlerden talep edilen güç ve tork kuvvetleri hesaplanarak açıklanmış ve CRRC tren seti için bu görevi yapmak için bir Matlab / Simulink modeli geliştirilmiştir. Güç ve tork hesaplaması altı araçlık bir kompozisyon için yapılmıştır.



Şekil 7.13. CRRC aracı Matlab/Simulink modeli

7.8. Ultra-Kapasitörlü Bank Tasarımı İçin Kriterler

Ultra-kapasitör bank boyutlandırmada ilk adım, sistem gereksinimlerini tanımlamak ve daha sonra toplam enerjiyi belirlemektir. Aşağıdaki adımlar izlenmelidir [58].

1- Kullanılan sistemi tasarlanırken maksimum ultra-kapasitör bank voltajı belirlenir. Ultra-kapasitör bankının voltaj değişimi, maksimum voltajının %50 ila %100'ü arasında tutulacaktır. Dolayısıyla mevcut enerji, eşitlik 7.11'e göre depolanan toplam enerjinin %75'i olarak alınacaktır. Ardından, Eşitlik 7.11'e göre toplam kapasitans için hesaplanacaktır.

$$E_{\text{Toplam}} = \frac{1}{2} C_{\text{Toplam}} (V_{\text{max,Toplam}}^2 - V_{\text{min,Toplam}}^2) \quad (7.11)$$

- 2- Toplam C'nin %10-20'i, toplam kapasiteye, I^2R 'lik kayıpları telafi etmek için bir emniyet payı olarak eklenecektir.
- 3- Sonraki adım, maksimum hücre voltajı dikkate alınarak seri halinde hücrelerin sayısını hesaplanacaktır.
- 4- Hücre düzeyinde kapasitans hesaplanacaktır.
- 5- Son olarak, paralel hücrelerin sayısı, toplam kapasitansın hücre düzeyi kapasitesine bölünmesiyle hesaplanacaktır.

Yukarıdaki yöntem 7.9 bölümünde boyutlandırma için kullanılacaktır.

7.9. Ultra-Kapasitörlü Bank Boyutlandırma

Alınan sonuçlara göre metro sistemi için ultra-kapasitör banklarının boyutlandırması hesaplanacaktır. Yapılan tasarım Maxwell 125 Volt modülleri ile yapılacaktır. Maxwell 125 Voltluk ürünleri metro sistemleri içinde geliştirdiği için bu modüller seçilmiştir [59].

7.9.1. Rejeneratif enerjiyi kullanmak için ultra-kapasitör boyutlandırması

Nominal yük ile metro tren setinin güç profili Çizelge 7.14'de gösterilmiştir. Ortalama güç olarak 1.625 MW olan sabit hız gücü olarak kabul edilmiştir. Anlık güç talebi ortalama

güçten daha büyük olduğunda ultra-kapasitör boşalmaktadır. Anlık güç talebi ortalama güçten daha düşük olduğunda ultra-kapasitör şarj olmaktadır. Hızlanma enerjisi sağlayan ultra-kapasitör bankının boşalma enerjisi Eşitlik 7.12'den hesaplanmaktadır.

$$E_{DCH} = \frac{1}{\eta_M} \int_{T_1}^{T_2} (P_{max} - P_{AV}) .dt \quad (7.12)$$

Motor yük momenti ve güç profilleri hesaplanırken motor ve şanzıman verimi dikkate alınmıştır. Eşitlik 7.12'de, yüzde 100 verimlilik varsayılmıştır. Çizelge 7.14'den anlık güç, $T_1 = 1.04$ s'de 0.193 MW'a ulaşmaktadır. $T_2 = 18.182$ s'de ise anlık güç maksimum 2.584 MW'a ulaşmaktadır. Dolayısıyla, Eşitlik 7.12'den, ivme enerjisi hesaplanmıştır.

$$E_{DCH} = \frac{1}{\eta_M} \int_{1.04}^{18.182} \left(\frac{2.584 - 0.139}{18.182 - 1.04} \right) .t .dt = 23,50$$

Rejeneratif fren enerjisi ultra-kapasitör bankını şarj ettiği durum için E_{CH} olarak gösterilmiştir. T_3 anlık gücün $1,625$ MW altına düştüğü zamandır, T_4 ise sıfıra ulaştığı zamandır. T_3 ile T_4 arasındaki süre 18.182 saniyedir ve şarj enerjisini hesaplamak için Eşitlik 6.13 kullanılmıştır.

$$E_{CH} = \eta_G \int_{T_3}^{T_4} (P_{AV} - P_{min}) .dt \quad (7.13)$$

$$E_{CH} = \int_0^{18.182} \left(\frac{-1.47}{18.182} \right) .t .dt = -13,36 \text{ MJ}$$

Ultra-kapasitörlerin $17,142$ saniyelik hızlanma süresi içinde 23.5 MJ'lik ivme tepe enerjisini karşılaması gerekmektedir. Ultra-kapasitör bankı için maksimum voltaj 750 V gerilimi seçilmiştir. Eşitlik 7.14'den toplam kapasite hesabı yapılmıştır.

$$C_{Toplam} = \frac{8E_{toplam}}{3 V_{max,toplam}^2} = 430 \text{ F} \quad (7.14)$$

I^2R kayıplarını telafi etmek için yüzde on kapasitans eklenmiştir. Dolayısıyla Toplam C_{toplam} 473 F'a eşittir. Maxwell 125 V modülünün veri sayfasında, minimum kapasitans değeri olan 63 F, boyutlandırma hesaplaması için seçilmiştir. Maksimum gerilim 750 V olduğundan, seri olarak 10.5 F kapasiteye sahip beş modül koyulmuştur. 473 F'nin 10.5

F'ye bölünmesi, paralel olarak yerleştirilmesi gereken altı modül paketinin 45'ini verir. Bu nedenle gereken toplam modül sayısı, $(473/10.5) * 6 = 270$ olarak hesaplanmıştır. Boyutlandırma sonuçları Çizelge 7.15'de gösterilmiştir. Bir Maxwell 125 V ultra-kapasitörünün fan dahil ağırlığı 63,4 kg olduğu tespit edilmiştir. Hesaplanan bank boyutlandırmasının kütlesi, trenin kütlesinin yüzde 4,84'ünü oluşturduğu görülmüştür. Sadece bir tren için 270 modülün maliyeti oldukça yüksek olacaktır. Bu nedenle tüm ivme enerjisinin kullanılması, ultra-kapasitör uygulamasının boyutlarından dolayı araç üstü kullanımına uygun değildir.

Çizelge 7.15. Hızlanma enerjisini sağlamak için bir tren için ultra-kapasitör boyutlandırma

Ultra-kapasitör	Maxwell 125 V modülleri
Nominal Gerilim	750 V DC
Modül Sayısı	270
Enerji Depolama	112 MJ
Maksimum Güç	2.94 MW
Modüllerin kütlesi	17.12 ton
Trenin Kütlesi	353.3 ton
Kapasitans	473 F

Kullanılan ultra-kapasitörün 10 yıl DC ömrü olduğu düşünüldüğünde ve bu ömür içerisinde görev döngüsünün Ankara metrosunun 4 dakikalık işletim sıklığına uygun olduğundan araç üstü kullanımına uygun olmasa da hat veya istasyonlar üzerine konumlandırılması karlı bir yatırım olacaktır.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuç

Bir raylı taşıma sisteminde enerji tüketimi birçok farklı parametreye bağlıdır. Tezin ilk bölümlerinde uygulamada kullanılan değişik tasarruflu işletme yöntemleri üzerine simülasyon testlerine ait sonuçlar verilmiştir. Uygulamada elde edilen sonuçlar neticesinde; tren işletme sıklığının arttırılması, trenlerin yük değerlerinin arttırılması, trenlerin hızlanma değerlerinin arttırılması ve son olarak frenleme ivmesinin azaltılması gibi algoritmalar uygulanmıştır. Bu yöntemler ile hattın çekilen enerji, elde edilen rejeneratif enerji, yakılan enerji miktarları, araç başına km'de harcanan enerji, enerjinin geri kazanım oranı ve hattın enerjinin geri alınma oranları üzerine etkileri araştırılmıştır.

Sık tren işletmeciliğinin hem yolcu konforuna hem de enerji tüketimi üzerine olumlu etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda düşük hızlanma ivmelerinde ve düşük frenleme ivmelerinde enerji geri kazanım oranının yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle, trenler arası sefer aralıklarının azaldığı durumlarda ve diğer uygulama senaryolarında, yakılan enerjinin fazla olduğu görülmüştür ve bu durumlarda ultra-kapasitör uygulamaları ile enerji tüketiminin azaltılmasında önemli rol oynayacağı gösterilmiştir.

Otomatik sürüş modunda bu çalışmada sabit olarak alınan, tren ağırlığı ve tren işletme sıklığı dinamik olarak değişmektedir. Gerçek sistemlerde optimum boşta gitme noktalarının gerçek zamanlı olarak hesap edilmesi gerekmektedir.

Uygulama çalışmasında Ankara metro hatlarında kullanılan trafo merkezinin Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Bu simülasyon modelinin sonuçlarına göre hat üzerinde bulunan DC gerilim ve akım değerlerinin gerçekte kullanılan değerlerle aynı olduğu gösterilmiştir.

Aynı şekilde Ankara metrolarında kullanılan CRRC araçlarının parametrelerinden bir Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Elde edilen değerler ve grafiklerle aracın çektiği güç ve tork değerleri gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu değerler ile ultra-kapasitör bank boyutlandırmasının araç üstü uygulamalara uygun olmayacağı söylenmiştir. Bu

yüzden ultra-kapasitör uygulamasının boyutlarından dolayı hat üzerine konumlandırılarak uygulanması daha fazla verim sağlayacaktır.

8.2. Öneriler

Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanılabilmesi için hatta ivmelenme modunda bir vasitanın olması gerekmektedir. Bu çalışmada hatta devamlı bir ivmelenme modunda araç olduğu düşünülmüştür. Ancak bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Transformatör merkezlerindeki ekipmanlar tam kontrollü doğrultucu tipinde olursa çift yönlü iletme izin vermektedirler. Böylece hatta enerji çekecek başka vasita olmasa da frenleme enerjisi şehir şebekesine verilecektir.

Depolama elemanlarının pahalı oluşu, ömürlerinin 10 yıl veya 1 milyon görev döngüsüne sahip olması gibi dezavantajları olsa da ilerleyen zamanlar da teknolojinin gelişmesiyle avantajlı duruma geleceklerdir. Bu yüzden depolama elemanlarının geliştirilmesi için çalışmaları yapılmalıdır.

Yolcu yoğunluğuna göre günün değişik saatlerinde uygulanacak farklı otomatik sürüş prosedürleri ile trenlerin sefer aralığı rejeneratif enerji verimliliğine göre optimize edilerek işletmede önemli derecede enerji verimliliği sağlayacaktır.

Bu çalışma da önerilen yöntemle yapılacak bir optimizasyon çalışmasının sonuçlarının gerçek hatlara da uygulanabileceği görülmüştür. Manuel sürüslü sistemlerde bunu gerçekleştirmenin en basit yolunun, bir sürücü bilgilendirme sistemi ile sürücülerin uyarılması ve trenlerin saptanan noktalarda boşta gitmelerinin sağlanması olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Elektrik Üretim Anonim Şirketi. (2013). *Elektrik Üretim Anonim Şirketi Sektör Raporu*. Ankara: Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 1-13.
2. İnternet: Energy Efficiency Technologies for Railways, URL: <http://www.railway-energy.org/tfee/index.php>, Son Erişim Tarihi 07.10.2018.
3. International Metropolitan Railways Committee. (1997). *Public Transport: The environment and economic efficiency*. International Congress, Stuttgart, 1-6.
4. Albrecht, T. (2004). Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control, *Computers in Railways*, 1-9.
5. Cirit, F. (2014). *Sürdürülebilir Kentiçi Ulaşım Politikaları ve Toplu Taşıma Sistemlerinin Karşılaştırılması*, Ankara: T.C Kalkınma Bakanlığı, 18-20.
6. İnternet: Raylı Sistem, URL: <https://www.ego.gov.tr/tr/sayfa/1075/rayli-sistem>, Son Erişim Tarihi 07.5.2019.
7. Fröhlich, M., Klohr M., Pagiela, St. (2008, May). *Energy storage system with UltraCaps on board of railway vehicles*. World Congress of Railway Research, Seoul, Korea.
8. Fröhlich, M. (2010). *Bombardier MITRAC Energy Saver Presentation*. Local-Renewables Conference, Freiburg, Germany.
9. Novales, M. (2011). Light Rail Systems Free of Overhead Wires. *Transportation Research Record*, 2219(1), 30-37.
10. Gemici, S.S. (2006). *Elektrikli ulaşım sistemlerinde enerji depolama yöntemlerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 12-16.
11. Brenna, M., Foiadelli, F., Tironi, E., Zaninelli, D. (2007, May). *Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems*. In 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 69-73. IEEE.
12. Bae, C. H., Jang, D. U., Kim, Y. G., Chang, S. K., Mok, J. K. (2007, October). *Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations*. In 2007 7th International Conference on Power Electronics, Daegu, South Korea, 801-805. IEEE.
13. Park, C. H., Jang, S. J., Lee, B. K., Won, C. Y., Lee, H. M. (2007, October). *Design and control algorithm research of active regenerative bidirectional DC/DC converter used in electric railway*. In 2007 7th International Conference on Power Electronics, Daegu, South Korea, 790-794. IEEE.

14. Latkovskis, L., Grigans, L. (2008, September). *Estimation of the untapped regenerative braking energy in urban electric transportation network*. In 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, Poland, 2066-2070. IEEE.
15. Szenasy, I. (2008, September). *Improvement the energy storage with ultracapacitor in metro railcar by modeling and simulation*. In 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 1-5. IEEE.
16. Hu, J., Zhao, Y., Liu, X. (2008, September). *The design of regeneration braking system in light rail vehicle using energy-storage Ultra-capacitor*. In 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 1-5. IEEE.
17. Ustaoglu, O. (2009). *İstanbul Metrosu'nda rejeneratif enerjinin geri kazanımı için bir çizelgeleme çalışması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 15-16.
18. Nasri, A., Moghadam, M. F., Mokhtari, H. (2010, June). *Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems*. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion 2010, Pisa, Italy, 1218-1221. IEEE.
19. Grbovic, P. J., Delarue, P., Le Moigne, P., Bartholomeus, P. (2010). Modeling and control of the ultracapacitor-based regenerative controlled electric drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(8), 3471-3484. IEEE.
20. Tseng, K. H., Shiao, Y. F. (2012, July). *The analysis of regenerative braking power for Taipei rapid transit systems electrical multiple units*. In 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xian, China, 1947-1951. IEEE.
21. Dominguez, M., Fernandez, A., Cucala, A. P., Blanquer, J. (2010). *Efficient design of automatic train operation speed profiles with on board energy storage devices*. WIT Transactions on the Built Environment, Madrid, Spain, 509-520.
22. Killer, A., Armstorfer, A., Diez, A. E., Biechl, H. (2012, August). *Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems*. In 2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium, Bogota, Colombia, 1-6. IEEE.
23. Shen, X., Chen, S., Li, G., Zhang, Y., Jiang, X., Lie, T. T. (2013). Configure methodology of onboard supercapacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(4), 1678-1686.
24. Fazel, S. S. (2014). Energy-efficient emplacement of reversible DC traction power substations in urban rail transport through regenerative energy recovery. *International Journal of Railway Research*, 1(2), 11-22.
25. Moghbeli, H., Hajisadeghian, H., Asadi, M. (2016, February). *Design and simulation of hybrid electrical energy storage (HEES) for Esfahan urban railway to store regenerative braking energy*. In 2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference, Tehran, Iran, 93-98. IEEE.

26. Baştürk G. (2014). *Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri ve Dünya Örnekleri*, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ankara.
27. Baran, S. (2009). *Şehir içi raylı sistem işletiminde rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı ve analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 60-65.
28. Pham, K. D., Thomas, R. S., Stinger, W. E. (2003, April). *Operational and safety considerations in designing a light rail dc traction electrification system*. In Proceedings of the 2003 IEEE/The American Society of Mechanical Engineers Joint Railroad Conference, Chicago, IL, USA, 171-189. IEEE.
29. Açıkbaş, S. (2008). *Çok hatlı çok araçlı raylı sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik sürüş kontrolü*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
30. Goddard, E. (2008, November). Overview of signaling and train control systems. *The IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, 314-322.
31. Popa, G., Mihailescu, M., Arsene, S. (2012, October). *Contact line oscillations induced by the pantograph coupling*. In 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy, 1-6. IEEE.
32. İnternet: Study of Various Technical Systems Incorporated in a Metro Rail System, URL: <http://www.ijser.org>, Son Erişim Tarihi 07.1.2019.
33. Kara, A., Mardikyan, K., Baran, S. (2013). Analysis of regenerative braking and energy storage systems in urban rail transportation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, (16), 2.
34. Hasegawa I., Uchida S. (1999). Braking Systems (çev. K. Wako). *Railway Technology Today* 7. (Orjinal makalenin yayım tarihi, 1999).
35. De Fer. (2008). *High speed rail*. Fast track to sustainable mobility, UIC, Paris.
36. Perticaroli, F. (2001). *Electric systems for transportation*. Master of Science Thesis, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, Italy.
37. López-López, Á. J., Pecharromán, R. R., Fernández-Cardador, A., Cucala, A. P. (2014). Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 85-100.
38. Seo, S. I., Kim, J. S., Cho, S. H. (2008). Development of a hybrid composite bodyshell for tilting trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 222(1), 1-13.
39. Kim, J. S., Lee, S. J., Shin, K. B. (2007). Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody. *Composite Structures*, 78(4), 468-476.

40. Xue, X., Ingleton, S., Roberts, J., Robinson, M. (2011). Qualitative comparison of the characteristics of articulated and non-articulated trains and their effects on impact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(1), 24-37.
41. Goodall, R. M., Kortüm, W. (2002). Mechatronic developments for railway vehicles of the future. *Control Engineering Practice*, 10(8), 887-898.
42. Tabares, A., Gómez, N., Nieto, C., Giraldo, M. (2013). Critical Sources of Aerodynamic Resistance in a Medium Distance Urban Train: a CFD approach. *Revista Guillermo de Ockham*, 11(1), 111-124.
43. Ikeda, M., Mitsumoji, T., Sueki, T., Takaishi, T. (2010). Aerodynamic noise reduction in pantographs by shape-smoothing of the panhead and its support and by use of porous material in surface coverings. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 51(4), 220-226.
44. Andersson, E., Kottenhoff, K., Nelldal, B. L. (2001). *Extra Wide-body Passenger Trains in Sweden—background and introduction*. In Proceedings of the World Congress of Railway Research, Stockholm, Sweden, 99.
45. Hillmansen S. (2009). *Sustainable traction drives*. IET seminar digest, London, UK, 255-265.
46. Eckel, H. G., Bakran, M. M., Krafft, E. U., Nagel, A. (2005, September). *A new family of modular IGBT converters for traction applications*. In 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany, 10. IEEE.
47. Ladoux, P., Mermet, M., Casarin, J., Fabre, J. (2012, October). *Outlook for SiC devices in traction converters*. In 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy, 1-6. IEEE.
48. Frenzke, T., Piepenbreier, B. (2004, June). *Position-sensorless control of direct drive permanent magnet synchronous motors for railway traction*. In 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 1372-1377. IEEE.
49. Hata, H., Kamijo, H., Nagashima, K., Ikeda, K. (2010, October) *Development of superconducting transformer for railway traction*. Paper presented Proceedings International Conference Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy, 19-21.
50. Hillmansen, S., Roberts, C. (2007). Energy storage devices in hybrid railway vehicles: a kinematic analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(1), 135-143.
51. Ogawa, K., Yamamoto, T., Hasegawa, H., Furuya, T. (2009, September). *Development of the fuel-cell/battery hybrid railway vehicle*. In 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, USA, 1730-1735. IEEE.
52. Kokken, K. (2003). *The reduction of energy consumption in EMU-trains of NS*. In 6th World Congress on Railway Research, Edinburgh, England.

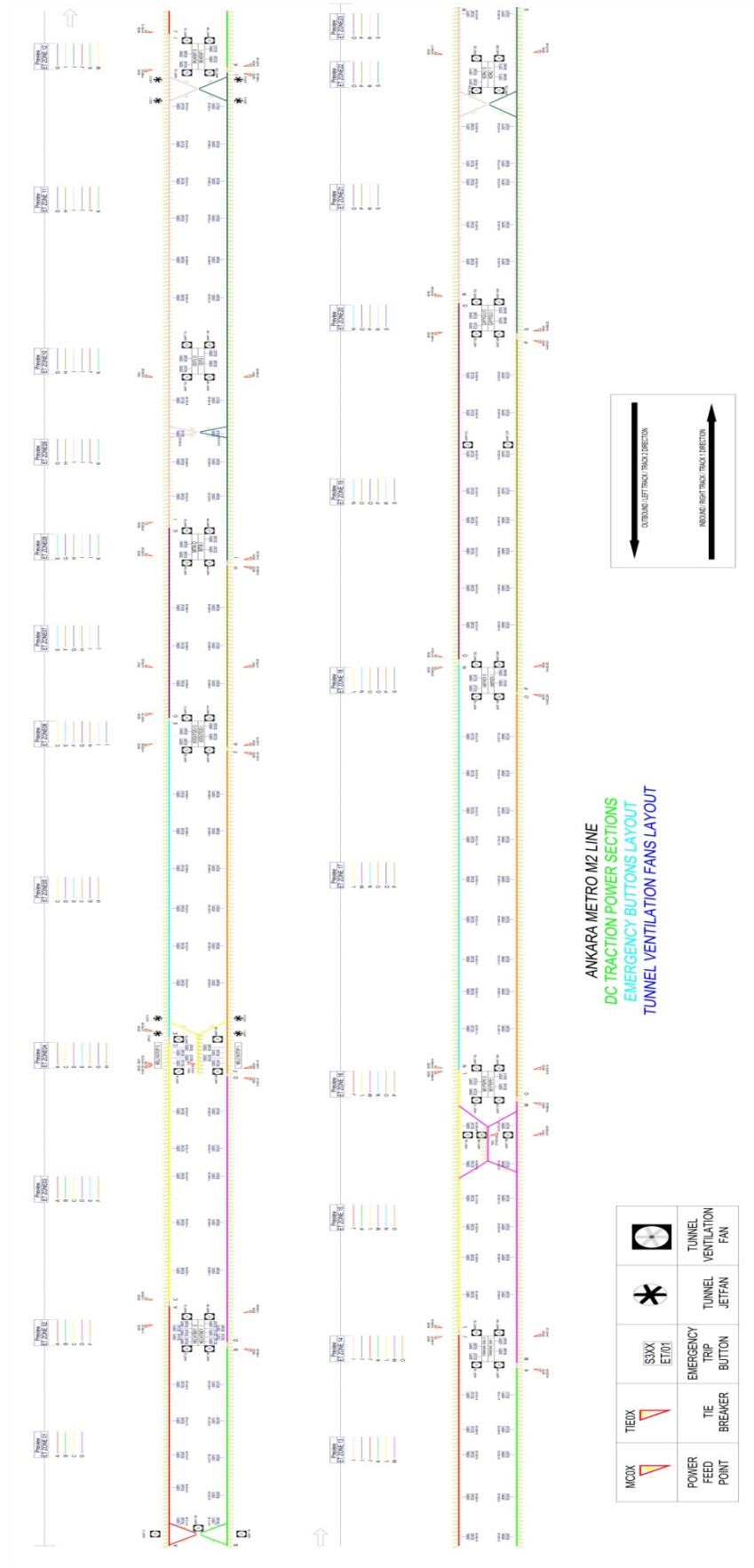
53. Amri, H., Hofstädter, R. N., Kozek, M. (2011, June). *Energy efficient design and simulation of a demand-controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle*. In 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, Vienna, Austria, 7-12. IEEE.
54. Beusen, B., Degraeuwe, B., Debeuf, P. (2013). Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 50-54.
55. Ciccarelli, F. (2014). *Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems*. Master of Science Thesis, University of Naples, Naples, Italy.
56. Johansson, P., Andersson, B. (2008). *Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling*. Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
57. Seim, L. H. (2012). *Modeling, control and experimental testing of a supercapacitor/battery hybrid system: passive and semi-active topologies*, Master of science thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway.
58. Barrero, R., Van Mierlo, J., Tackoen, X. (2008). Enhanced energy storage systems for improved on-board light rail vehicle efficiency. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 3, 26-36.
59. İnternet: Datasheet 125V Heavy Transportation Modules, URL: https://www.maxwell.com/images/documents/125V_Module_datasheet.pdf, Son Erişim Tarihi 15.06.2019.





EKLER

EK-1. Ankara metrosu M2 hattı DC cer gücü bölümü



EK-2. Tren parametreleri Matlab/Simulink kodları

```

function y = TrenModeli(u1, u2, u3)

V = 1/6.32*1.15*u1;
% u2=V'in türevi
% u3=AW3 yükü

A=7.95;
g=9.81;
Co=0.008;
C1=8e-4;
GR=6.32;
r=1.15;
q=1.080;
Cd=0.35;
Emg=0.9212; % Motor veriminin ile transmisyon verimliliğine çarpımıdır
Ejg=0.8036; % Jeneratör veriminin ile transmisyon verimliliğine çarpımıdır

m=1.1*u3;
% 1.1 m/s ivme ile trenin hareketi düşünülmüştür.
Fa=m*u2; % İvmelenme Kuvveti
% İvmelenme kuvveti, doğrusal ivme ve dönme ivme kuvvetlerinden oluşmaktadır.
% M aracın AW3 yükünde toplam ağırlığıdır.
Fad=0.5*Cd*q*A*(V^2); % Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti
% 0.2<Cd<0.4 değeri aralığında olup tam ortalaması üzerinden alınmıştır
Froll=u3*g*(Co+C1*(V^2)); % Tekerlerin yuvarlanma direncinin kuvveti
% Yuvarlanma direnci tekerlerin rayla temas yüzeyindeki sürtünmesiyle oluşmaktadır.
% C0 yuvarlanma direnci katsayısı olup, C1<Co (s^2/m^2)'dir.
Fg=u3*g*0.01047178 % Yerçekimi Kuvveti
% Ağırlık, yer çekimi gücü ve %1 eğim ortalamasıyla hareket eden trenlerin tan'ıdır.

Ft=Fg+Fad+Froll+Fa;
Tct=Ft*r;
% Tct = toplam çekiş torku
% Ft = toplam çekiş gücü

if u2>0 ;
Mtt=(Tct/GR)/Emg;
%Mtt = Motorun toplam torku
else
Mtt=(Tct/GR)*Ejg;
end
y = Mtt;

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı,adı : MERT, Abdullah Talha
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.10.1988, Çankaya
Medeni hali : Bekar
e-mail : a.talha.mert@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik- Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi / Elektrik- Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	Hacı Ömer Tarman Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013 - Halen	EGO Genel Müdürlüğü Raylı Sistemler Dairesi Başkanlığı	Elektrik-Elektronik Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce
Almanca

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzmek, Müzik dinlemek, Sinema, Seyahat, Kayak



GAZİ GELECEKTİR..