

**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE FRENLEME  
ENERJİSİNİN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ VE  
ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE İNCELENMESİ**

**Hakan GÜNEŞER**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Volkan AKDOĞAN**

**Yozgat 2020**





# YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

## TEZ ONAY FORMU

T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans 70111514016 numaralı öğrencisi **Hakan GÜNEŞER**'in hazırladığı “**RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE FRENLEME ENERJİSİNİN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ VE ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE İNCELENMESİ**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 29/01/2020 günü saat 11:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

**Başkan** : Dr.Öğr. Üyesi Yavuz TÜRKAY

**Jüri Üyesi (Danışman)** : Dr.Öğr. Üyesi Volkan AKDOĞAN

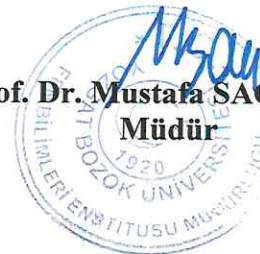
**Jüri Üyesi** : Dr.Öğr. Üyesi Emrah ÇETİN

### ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 14.../02/20 tarih ve 8... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

20.02.2020

Prof. Dr. Mustafa SAÇMACI  
Müdür



**T.C.  
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE FRENLEME  
ENERJİSİNİN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ VE  
ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE İNCELENMESİ**

**Hakan GÜNEŞER**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Volkan AKDOĞAN**

**Yozgat 2020**

# RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE FRENLEME ENERJİSİNİN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ VE ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE İNCELENMESİ

Hakan GÜNEŞER

Yozgat Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

2020; Sayfa: 156

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Volkan AKDOĞAN

## ÖZET

Ulaşım, ülkemizde hızla büyüyen şehir nüfusunun yaşamını devam ettirmek için gerçekleştirdiği yolcu ve mal hareketleridir. Şehirlerimizde bir günde elli milyon düzeyindeki yolculuk gerçekleştirilmektedir, şehirlerarasında kara, demir, deniz ve hava yollarıyla bir günde gerçekleştirilen yolculuk sayısının yaklaşık on beş katıdır. Ülke nüfusunun hızla artmasıyla kent içi ulaşım her geçen gün artmaktadır bu da motorlu taşıtlara olan talebi artırıyor. Gelişen teknoloji ve yükselen refah düzeyi sayesinde dünyamızda elektrik enerjisi tüketimi gün geçtikçe artmakta, bunun yanında dünyamızın enerji kaynakları hızlıca tükenmeye başlamıştır. Bu sebeple, enerji kaynaklarının daha verimli ve tasarruflu kullanımı yolları aranmaya başlanmıştır. Raylı ulaşım sistemlerindeki gelişmeler günümüzde toplu ulaşım sistemlerinin geliőiminde en büyük role sahiptir. Ulaşım hattı uzun olan elektrikli raylı sistem işletmeleri, tükettikleri yüksek güçlerden dolayı elektrik dağıtım şebekesinin en büyük tüketicisi konumundadır. Raylı sistemlerde yapılan enerji optimizasyon çalışmaları, genel elektrik şebekesinde verimli enerjinin kullanımında büyük rol oynamakta, hem daha az maliyetli çalışma sağlanacak hem de çevreye faydalı bir etki sunmaktadır. Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde enerji verimliliği üzerine yapılan en uygun şekilde sokma çalışmalarının başlıca parametrelerinden birisi de rejeneratif frenleme enerjisi ve bu enerjinin geri kazanımıdır. Raylı sistem araçlarının hareketinde kullanılan motorların yapısı gereği, frenleme esnasında ortaya çıkan rejeneratif enerjinin geri kazanımı ile gerek araç içi elektrik ihtiyacı gerek istasyonlardaki enerji ihtiyacında azalmalar meydana gelmiőtir. Şehir içi raylı sistem işletmeciliğinde enerji tasarrufuna etki eden bazı yöntemler incelenmiştir olup, sistemdeki hangi parametrelerin enerji tasarrufunu ne şekilde etkilediği savunulmuőtür. Son olarak, Ankaray Hafif Metrosunda enerji tasarrufu için etkili parametrelerin raylı sistem simülasyon yazılımı ile analiz edilip sonuçları deđerlendirilmiőtir.

**Anahtar Kelimeler:** Rejeneratif Enerji, Ulaşım, Frenleme, Raylı Sistemleri, Raylı Ulaşım Sistemlerinde Frenleme, Raylı Ulaşım Sistemlerinde Frenleme Enerjisinin Geri Kazanımı

# INVESTIGATION OF BRAKING ENERGY IN RAIL TRANSPORT SYSTEMS AND ANALYSIS ON ANKARAY LIGHT METRO

Hakan GÜNEŞER

Yozgat Bozok University  
Graduate School of Naturel and Applied Sciences  
Department of Electrical-Electronics Engineering  
Master's Thesis

2020; Page: 156

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Volkan AKDOĞAN

## ABSTRACT

Transportation includes passenger and goods movements carried out by the rapidly growing urban population in our country in order to maintain daily activities. Fifty million trips in one day in our cities are approximately fifteen times the number of trips between cities, by land, iron, sea and air. With the rapid increase in the country's population, urban transportation is increasing day by day, increasing the demand for motor vehicles. Thanks to the developing technology and the increasing prosperity level, electricity consumption in our world is increasing day by day. Therefore, more efficient and efficient ways of using energy resources have been sought. Developments in rail transportation systems have a major role in the development of public transportation systems. Electric rail systems with long transportation lines are the biggest consumers of the electricity distribution network due to the high power they consume. Energy optimization studies in rail systems play a major role in the use of efficient energy in the general electricity network, providing less costly work and a beneficial impact on the environment. One of the main parameters of the optimization studies on energy efficiency in electric rail transportation systems is regenerative braking energy and its recovery. Due to the nature of the engines used in the movement of the rail system vehicles, there has been a decrease in both the in-vehicle electricity need and the energy need at the stations with the recovery of regenerative energy that occurs during braking. Some methods that affect energy saving in urban rail system management have been examined and it has been advocated which parameters in the system affect energy saving. Finally, in the Ankaray Light Metro, effective parameters for energy saving are analyzed with rail system simulation software and the results are evaluated.

**Keywords:** Transportation, Braking, RailSystems, Braking in Rail Transportation Systems, Braking Energy Recovery in Rail Transportation Systems

## TEŞEKKÜR

Tezimi hazırlama aşamasında bana her tŸrlŸ destek veren danışman hocam Dr. Öğretim Őyesi Sayın Volkan Akdoğan'a ve bugŸne kadar maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan aileme teŐekkŸr ediyorum.

**Hakan GŸNEŐER**  
**Yozgat, 2020**



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
TABLolar LİSTESİ .....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xvi
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ULAŞIM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ.....</b>	<b>3</b>
2.1. Ulaşım Türleri.....	3
2.1.1. Yaya ve Bisiklet.....	3
2.1.2. Bireysel Ulaşım.....	3
2.1.3. Lastik Tekerlekli Toplu Taşıma.....	3
2.1.4. Denizyolu.....	4
2.1.5. Raylı Toplu Taşıma.....	4
2.2. Şehir İçi Raylı Ulaşım Tipleri.....	4
2.2.1. Tramvay.....	5
2.2.2. Hafif Metro.....	6
2.2.3. Metro.....	7
<b>3. ELEKTRİKLİ RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ .....</b>	<b>8</b>
3.1. Raylı Ulaşım Sistemlerinin Genel Yapısı.....	8
3.1.1. Cer Sistemleri ve Yapısı .....	8
3.1.2. Cer Gücü Temin Sistemleri.....	9
3.1.3. Cer Gücü Tipleri.....	9
3.2. Cer Gücü Sistemlerinin Temel Yapısı.....	9
3.2.1. Cer Gücü Dağıtımı.....	9
3.2.2. DC Cer Sistemi.....	10
3.2.3. Redresör Trafosu.....	11
3.2.4. DC Şalt Hücreleri.....	12
3.2.5. OG Sistem.....	12



3.2.6. 34,5 / 0,4 kav Dağıtım Trafosu .....	13
3.2.7. 6.3 / 0,4 kav Transfer Trafosu.....	13
3.2.8. AG ve Yedek Güç Sistemi .....	13
3.2.9. 400 / 231 VAC Yardımcı Güç Panoları.....	13
3.3. Kesintisiz Güç Kaynağı .....	13
3.3.1. Kesintisiz Doğru Akım Güç Kaynağı.....	13
3.4. Cer Gücü Şebekesi .....	13
3.4.1. Cer Gücü Temin Sistemlerinde Elektriksel Bağlantılar.....	14
3.4.2. Hat Direnci/Empedansı.....	15
3.4.3. Birim Uzunluk Başına Direnç.....	16
3.5. Cer Hatlarında Gerilimin Düzenlenmesi.....	17
3.5.1. Temel Kabuller.....	17
3.5.2. Gerilim Düşümü Hesabı.....	18
3.5.3. Tek Uçlu Besleme.....	19
3.5.4. Çift Uçlu Besleme.....	21
3.6. Cer Gücü Temin Sistemi Kontrolü.....	23
3.6.1. Gelişim ve Fonksiyon .....	23
3.6.2. Yerel Kontrol Ünitesi ve Uzaktan Kontrol Hatları.....	24
3.6.3 Denetim Kontrolü ve Veri Toplama.....	24
3.7. Denetim Kontrolü ve Veri Toplama Sistemi Bileşenleri.....	25
3.7.1. Uzak Terminal Birimleri .....	25
3.7.2. Güç Kaynağı Modülü.....	26
3.7.3. Merkezi İşleme Ünitesi.....	26
3.7.4. Haberleşme İşlemcisi Modülü.....	27
3.7.5. Giriş ve Çıkış Modülleri.....	27
3.7.6. Dijital Giriş Modülü.....	27
3.7.7. Dijital Çıkış Modülü .....	27
3.7.8. Analog Giriş Modülü.....	27
3.8. Ana Terminal Birimi.....	28
3.8.1. Bilgisayar Terminalleri.....	28
3.8.2. Yazıcılar.....	28
3.8.3. İletişim Sistemi.....	28

3.8.4. İletişim Ağı.....	28
3.8.5. LAN.....	28
3.8.6. WAN.....	29
3.8.7. İletişim Ortamları.....	29
3.8.8 Modülasyon.....	29
3.8.9.Modemler.....	29
3.9. Kontrol Üniteleri.....	30
3.9.1. Programlanabilir Lojik Denetleyiciler.....	30
3.9.2. Elektrik Güç Dağıtım Panoları.....	31
3.9.3. Saha Elemanları.....	31
3.9.4.Yardımcı Güç Sistemleri.....	31
3.9.5. Evirici Ünitesi.....	33
3.9.6. Üç Fazlı Transformatör Ünitesi ve Filtre Devresi.....	34
3.9.7 Batarya Şarj Ünitesi.....	35
3.9.8. Faydalı Frenleme ve Enerji Geri Kazanımı .....	36
<b>4. RAYLI SİSTEMLERDE FRENLEME .....</b>	<b>43</b>
4.1. Elektrikli Raylı Sistemlerde Kullanılan Gerilim Seviyeleri .....	43
4.2. Raylı Ulaşım Sistemlerinin Elektriksel Besleme Sistemleri .....	44
4.2.1. Araç İçi Elektriksel Yapı.....	45
4.2.2. Cer-Tahrik Sistemleri .....	45
4.2.3. Yardımcı Tesisler.....	50
4.3. Raylı Sistemlerde Frenleme Çeşitleri .....	51
4.3.1. Mekanik Frenleme Sistemleri.....	52
4.3.2. Elektriksel Frenleme Sistemleri .....	54
4.3.3. Dinamik Frenleme .....	55
4.3.4. Rejenerative Frenleme .....	55
4.4. Rejenerative Frenleme Geri Kazanım Yöntemleri .....	56
4.4.1. Rejeneratif Enerjinin Yardımcı Cer Gücü Olarak Kullanılması.....	57
4.4.2. Rejeneratif Enerjinin Hatta Geri Verilmesi.....	58
4.4.3 Rejeneratif Enerjinin Depolanması.....	61
4.5. Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliğine Yönelik Diğer Yöntemler .....	62
4.5.1. Besleme geriliminin 1500VDC seçilmesi.....	62

4.5.2. Verimli sürüş yöntemleri .....	62
4.5.3. Cer gücü ihtiyaçlarında optimizasyon.....	63
4.5.4. İç ihtiyaç hatlarında optimizasyon.....	63
4.6. Frenleme Enerjisi Potansiyelini Belirlemeye Yönelik Çalışmaları.....	63
4.6.1. LRT. Aracı Tahrik Sisteminin İncelenmesi.....	63
4.6.2. Tahrik Sistemi.....	64
4.6.3. İvmelenme Madunda Kısıcının Çalışma İlkesi.....	66
4.6.4. Frenleme Madunda Kısıcının Çalışma İlkesi.....	69
4.7. Kontrol ve Denetleme Sistemleri.....	71
4.7.1. Kontrol Prensipleri.....	71
4.7.2. İvmelendirme Kontrolü.....	73
4.7.3. Yavaşlatma İvme Kontrolü .....	74
4.7.4. Armatür Akım Kontrolü.....	76
4.7.5 Motor Gerilimi Kontrolü Uyarma Alanı Kontrol.....	77
4.7.6 İvmelendirme ve Frenleme Durumunda.....	77
4.7.7 Uyarma Alan Akımının Kontrolü.....	78
4.8. Faydalı Frenleme Enerjisi Ölçüm Yöntemi .....	79
<b>5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....</b>	<b>80</b>
5.1. Enerji Depolamanın Nedenleri.....	81
5.2. Mevcut Enerji Depolama Teknolojileri.....	81
5.2.1. Hidrolik Güç Depolanması.....	83
5.2.2. Basıncılı Hava ile Enerji Depolama Sistemleri.....	85
5.2.3. Bataryalar .....	87
5.2.4. Yakıt Hücreleri.....	89
5.2.5. Süper İletken Manyetik Enerji Depolayıcıları.....	89
5.2.6. Metal Film ve Alüminyum Elektrolitik Kondansatörler.....	90
5.3. Süperkapasitörler.....	91
5.4. Volanlar (Fly Wheel) .....	92
5.4.1 Volanların Fiziksel Prensipleri.....	94
5.4.2. Volan Tipleri.....	95
5.4.3. Klasik ve Yeni Tip Volanların Karşılaştırılmaları.....	95
5.4.4. Volanların Genel Üstünlükleri ve Kullanım Yerleri.....	98

5.5. Enerji Depolama Sistemlerinin Değerlendirilmesi.....	99
5.6. Enerji Depolama Sistemlerinin Demiryolu Uygulamaları İçin İncelenmesi	100
5.7. Raylı Sistemlerde Örnek Bir Volan Uygulaması.....	106
5.8. Tren Üstü Enerji Depolama.....	106
5.8.1. Gerilim Düşümünün Azaltılması.....	107
5.8.2. Trafo Merkezlerinden Talep Edilen Tepe Güç Değerinin Düşürülmesi	108
5.8.3. Katanersiz Çalışma Olanasının Elde Edilmesi.....	108
5.9. İstasyon Tipi Enerji Depolama .....	108
5.9.1. Araç Üstü ve İstasyon Tipi Enerji Depolama Sisteminin Karşılaştırılması.....	110
<b>6.ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE SİMÜLASYON YOLU İLEİNCELENMESİ...111</b>	
6.1. Test Hatları ve Simülasyonu .....	111
6.1.1. Test Treni 1 Ankaray Hafif Metro Hattı Özellikleri.....	111
6.1.2. Test Treni 2 Treni Özellikleri.....	111
6.2. Raylı Sistem Simülasyon Programı: Simux.....	112
6.3. LRT Araçlarının Enerji Tüketimine Etki Eden Bazı Parametrelerin İncelenmesi.....	113
6.3.1. İşletme sıklığının enerji tüketimine etkisi.....	113
6.3.2. Tren ağırlığının enerji tüketimindeki etkisi.....	115
6.3.3. Maksimum hızlanma ivmesinin enerji tüketimine etkisi.....	116
6.4. Test-2 Aracı İçin Değerlendirme.....	117
<b>SONUÇ .....</b>	<b>119</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>121</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>131</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>156</b>

## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1 :</b> EN-50 Göre Demiryolu Elektrifikasyonu	
Gerilim Seviyeleri [71].....	15
<b>Tablo 3.2 :</b> 20°C’de Hat Empedansının Ray Tiplerine Göre	
Değerleri [36].....	16
<b>Tablo 3.3 :</b> 20°C’de, Aşınma Oranına Göre Birim Uzunluk	
Başına Ray Direnci [10].....	17
<b>Tablo 3.4 :</b> DC Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Depolama	
Sistemleri ve Faydalı Frenleme Enerji Kazanımı [26].....	39
<b>Tablo 4.1 :</b> EN-50163’de Belirtilen Besleme Gerilimleri	
[60].....	43
<b>Tablo 4.2 :</b> Rejeneratif Enerjinin Kullanımı [18].....	57
<b>Tablo 5.1 :</b> Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması [7].....	99
<b>Tablo 6.1 :</b> Farklı TAS (Trenler arası süre) deki talep ettiği	
enerji ve rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı.....	114
<b>Tablo 6.2 :</b> Farklı Tren Ağırlıkları için enerji tüketimi.....	115
<b>Tablo 6.3 :</b> Kişi Başına Düşen Enerji Sarfıyatı .....	116
<b>Tablo 6.4:</b> Maksimum Hızlanma İvmesine Göre Değişen	
Rejeneratif Enerji.....	117

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Tramvay Örneği [19].....	6
Şekil 2.2 : Hafif Metro Örneği [21].....	6
Şekil 2.3 : Metro [23] . .....	7
Şekil 3.1 : Doğru Akım Cer Besleme Sistemi Prensi Şeması [36].....	11
Şekil 3.2 : Redresör [38].....	12
Şekil 3.3 : Cer Gücü Sistemi Prensi Şeması [36] .....	15
Şekil 3.4 : Cer Gücü Kontak Hattında Gerilim [86].. ..	18
Şekil 3.5 : Tek Uç Beslemeli Hattın Gerilim Düşümü Gösterimi [22].....	20
Şekil 3.6 : Çift Uç Beslemeli Hattın Gerilim Düşümü Gösterimi [22].....	22
Şekil 3.7 : Genel SCADA Sisteminin Gösterimi [24].....	25
Şekil 3.8 : Güç Kaynağı Modülü [65].....	26
Şekil 3.9 : Merkezi İşlem Ünitesi Gösterimi [15].....	26
Şekil 3.10 : Haberleşme İşlemcisi Modülü Gösterimi [15].....	27
Şekil 3.11: Ankaray Hafif Metro'ya ait yardımcı güç ünitesi.....	32
Şekil 3.12 : Üç Fazlı Evirici Köprü Devresi Gösterimi [20].....	33
Şekil 3.13 : Yardımcı Güç Ünitesi Açık Devresinin Gösterimi [62].....	35
Şekil 3.14 : Batarya Şarj Ünitesinin Gösterimi [25].....	36
Şekil 3.15 : Bir Yolcu Treninde Kullanılan Enerjinin Dağılımının Şematik Gösterimi [72].....	37
Şekil 3.16 : Değişik Tip Demiryolu Sistemlerinde Enerji Tüketim Dağılımı [8].....	38
Şekil 3.17 : DC Raylı Sistem Araçların Bir Hızlanma Frenleme Periyodunda Sahip Oldukları Güç Moment Hız Değişimlerinin Gösterimi [7].....	41
Şekil 4.1 : Raylı sistemlerde Enerji İletimi [63].....	44
Şekil 4.2 : Üçüncü Ray Sistemi [28] ... ..	46
Şekil 4.3 : Kataner Sistemi [31] .....	47
Şekil 4.4 : Rijit Kataner Sistemi [84] .....	47
Şekil 4.5 : 750 Doğru Akım Araca Ait Tahrik Sistemi Blok Şeması [32] .....	49
Şekil 4.6 : Yardımcı Güç Sistem Şemasının Gösterimi [55].....	51
Şekil 4.7 : Frenleme Çeşitleri [31] .....	52
Şekil 4.8 : Pedal Frenleme [61] .....	53

<b>Şekil 4.9</b> : Aks Monteli Disk Frenleme Gösteri [61].....	53
<b>Şekil 4.10</b> : Tekerlek Monteli Disk Frenleme [61].....	54
<b>Şekil 4.11</b> : Cer Yani Çekiş Gücü Modu Modülü Gösterimi [18].....	55
<b>Şekil 4.12</b> : Dinamik Frenleme Modülünün Gösterimi[43] .....	56
<b>Şekil 4.13</b> : Rejeneratif Frenleme Sistemlerinin Şematik Gösterimi[43].....	56
<b>Şekil 4.14</b> : Rejeneratif Enerjinin Yardımcı CER Gücü Olarak Kullanılması [39] .....	57
<b>Şekil 4.15</b> : PC Ekran Görüntüsü .....	58
<b>Şekil 4.16</b> : Trenin Normal Seyir Hali Gerilim Değeri.....	59
<b>Şekil 4.17</b> : Diğer Araçların Frenleme Esnasındaki Gerilim ve Akım Seviyesi .....	59
<b>Şekil 4.18</b> : Ölçü Aleti Ekran Görüntüsü .....	60
<b>Şekil 4.19</b> : Enerjinin Hatta Geri Verilmesinin Şematik Gösterimi[18] .....	61
<b>Şekil 4.20</b> : Rejeneratif Frenlemede Enerji Depolama Sistemi Kullanımı [70].....	61
<b>Şekil 4.21</b> : Tahrik Sistemi Blok Şemasının Gösterimi [24].....	64
<b>Şekil 4.22</b> : LRV Aracı Motor Modülü İvmelendirme ve Frenleme Devresinin Modül Gösterimi [26].....	66
<b>Şekil 4.23</b> : İvmelenme Modunda Kıyıcı Eşdeğer Devresinin Modül Gösterimi [87] .....	67
<b>Şekil 4.24</b> : İvmeleme Modunda Akım Yolunun Gösterimi [3].....	68
<b>Şekil 4.25</b> : Serbest Geçiş Aralığında Akım Yolu Grafiği Gösterimi[3] .....	68
<b>Şekil 4.26</b> : C Konağı Kapalıyken IA Şarj akımı, (b) C Konağı Açıkken Faydalı Frenleme Akım Gösterimi [7].....	69
<b>Şekil 4.27</b> : Frenlemede Kıyıcı Devresi [59].....	70
<b>Şekil 4.28</b> : Kıyıcının Frenlemede İzlediği Akım Yolu Gösterimi [5].....	70
<b>Şekil 4.29</b> : GTO Tıkamadayken Akım Yolu Gösterimi [8].....	71
<b>Şekil 4.30</b> : Tahrik Sisteminin Kontrol Devresi [86] .....	72
<b>Şekil 4.31</b> : İvmelendirme Kontrolü [28] .....	74
<b>Şekil 4.32</b> : Yavaşlama İvmesi Kontrolü [29].....	75
<b>Şekil 4.33</b> : Armatür Akım Kontrolü [31].....	76
<b>Şekil 4.34</b> : Uyarma Alanı Güç ve Frenleme Modu Kontrolü [55].....	78
<b>Şekil 4.35</b> : Uyarma Alanı Akım Kontrolü [84].....	79
<b>Şekil 5.1</b> : Enerji Depolama Sisteminde Enerjinin Çevrim Şeması [20].....	80

<b>Şekil 5.2:</b> Enerji Depolama Sistemleri [35].....	82
<b>Şekil 5.3 :</b> Hidrolik Güç Depolaması Blok Şemasının Gösterimi [11] .....	83
<b>Şekil 5.4:</b> CAES Sistemi Elemanlar Gösterimi [48].....	86
<b>Şekil 5.5 :</b> Lityum-İyon Batarya İç Yapısı [14].....	88
<b>Şekil 5.6 :</b> Süper iletken Manyetik Alan Enerji Depolama Sistemi Basit Blok Diyagramı [24].....	90
<b>Şekil 5.7 :</b> Süper Kapasitörlerin İç Yapısı Gösterimi [85].....	91
<b>Şekil 5.8 :</b> Volanlar [56].....	93
<b>Şekil 5.9 :</b> Yüksek ve Düşük Hızlı Volan Enerji Depolama Sistemleri [27] .....	95
<b>Şekil 5.10 :</b> Volanın Evrim Süreci [88].....	96
<b>Şekil 5.11 :</b> Geleneksel Jeneratör veya Motor İle Akuple Edilmiş Çelik Volan Uygulaması [59] .....	97
<b>Şekil 5.12 :</b> Değişken Hız Kontrollü Tahrik ve Evirici veya Çevirici Elektronik Devreler [38] .....	97
<b>Şekil 5.13 :</b> Bir Metro Aracında Enerji Depolama Sistemi Bağlantısı [84] .....	101
<b>Şekil 5.14 :</b> Farklı Duruş Frekansına Sahip Raylı Ulaşım Sistemlerinin Enerji Depolama Kapasiteleri [85].....	102
<b>Şekil 5.15 :</b> Araçlarda ve Araçlarla Birlikte Tesisler Üzerinde Elde Edilen Kazançlar [85].....	103
<b>Şekil 5.16 :</b> Bir Metro Hareketi Sırasında Harcanan Enerji Depolaması [86] .....	104
<b>Şekil 5.17 :</b> Tren Gruplarına ve EDS Teknolojilerine Göre EDS Kütlesi veya Tren Kütlesi Karşılaştırması [86].....	105
<b>Şekil 5.18 :</b> Bombardier Ulaşım Tarafından Yapılan Manheim'deki Prototip Araç [88].....	107
<b>Şekil 5.19 :</b> İstasyon Tipi Enerji Depolama [30].....	109
<b>Şekil.6.1 :</b> Farklı TAS'larda Enerji Talebi ve Rejeneratif Enerji.....	114
<b>Şekil 6.2 :</b> Yüke Bağlı Enerji Talebi.....	116
<b>Şekil 6.3 :</b> İvmelenmeye Bağlı Enerji Değişimi.....	117
<b>Şekil 6.4 :</b> Test -2 Treni İçin Enerji Talebi.....	118



## KISALTMALAR LİSTESİ

- AW:** Armatür sargıları  
**A:** Kesit (mm)  
**BD:** Frenleme diyotları  
**BR:** Frenleme direnci CC Şarj kontaktörü  
**CC:** Seviye kaydırıcı kondansatör  
**CF:** Şarj ünitesi koruma sigortaları  
**CR:** Şarj direnci  
**Cs:** Bastırma kondansatörü  
**D:** Diyot  
**DÇM:** Seviye kaydırıcı diyot  
**Ds:** Bastırma diyotu  
**DU:** Tetikleme ünitesi  
**C:** Metalin elektrokimyasal katsayısı  
**D:** Trendeki araç sayısı  
**G:** Tren setinin yüklü ağırlığı (ton)  
**GB:** Aracın boş ağırlığı (ton)  
**GY:** Aracın yüklü ağırlığı (ton)  
**I:** Akım (A)  
**IOHL:** İletken ray akımı (A)  
**IRC:** Üçüncü ray akımı (A)  
**IL:** Harmonik akımın etkin değeri (A)  
**ED:** Topraklama ünitesi  
**FD:** Serbest geçiş diyotu  
**FW:** Uyarma sargıları  
**L:** Bobin LA Yıldırıma karşı koruyucu  
**LC:** Hat kapasitansı  
**LL:** Hat endüktansı  
**MC:** Motor parça kontaktörü  
**MCB:** Ana devre kesicisi  
**MIS:** Ana izolatör ayıcısı  
**OCH:** Yüksek gerilim kıyıcısı

**OPT:** Yüksek gerilime karşı koruyucu tristor  
**PC:** Motor kontaktörü  
**RC:** Seviye kaydırıcı direnç  
**TCH:** Ana kıyıcı  
**TMI:** Tahrik motor endüktansı  
**IK:** Yük akımı (A)  
**IP:** Korozyon koruma akımı (A)  
**K:** Yolcu yükü (yolcu/araç)  
**L:** Uzunluk (m)  
**M:** Kütle (kg)  
**P:** Aktif güç (W)  
**Q:** Reaktif güç (VAR)  
**R<sub>(db.)</sub>:** Belirli sıcaklıktaki direnç ( $\Omega$ )  
**S:** Görünür güç (VA)  
**S:** Güzergâh boyu (km)  
**U:** Gerilim (V)  
 **$\Delta U$ :** Gerilim düşümü (V)  
**V:** Ortalama hız (km/s)  
**Z:** Empedans ( $\Omega$ ) ‰  
**S:** Ortalama hat eğimi  
**db.:** Ortam sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )  
**P<sub>(db.)</sub>:** Belirli sıcaklıktaki özgül direnç ( $\Omega mm/m$ )

## GİRİŞ

Genel olarak bakıldığında, tren lokomotif tarafından çekilen vagonlar dizisi olarak tanımlanır. Aslında raylı sistemlerin, dünyada ilk kez 1800'lü yıllarda, İngiltere'de kullanılmaya başlamıştır [1].

Genç bir mühendis olan Trevithick, yaklaşık on ton ağırlığındaki demiri buharlı makineyle Pennydarran'dan Cardiff'e kadar raylı bir yol aracılığıyla hiç zorlanmadan taşıyabileceğini iddia etmiştir. Bu bağlamda, 6 Şubat 1804 tarihinde TuramVagon adlı bir lokomotif on tonluk demir yükü ve ayrıca 70 yolculu bir arabayla Cardiff'ten hareket etti. On altı km uzunluğundaki Pennydarran Cardiff yolu, beklemeler ve tamirler de hesaba katılması durumunda ise yaklaşık olarak beş saatte aşılabilmektedir [2,3].

Metro, süratli taşıma için kullanılan şehir içi raylı sistemidir. Güzergahın yoğunluğuna göre istasyon kapasiteleri azalır artar ve istasyon mesafeleri de buna göre yakınlık uzaklık gösterebilir. Metro sistemi rayın yanına bağlı olan enerji sisteminden alır [2].

Genel olarak değerlendirildiğinde, yer altında olmasının sebebi de kaçak akım artışına neden olması ve bu durumun özellikle yağışlı havalarda daha da kötüleşmesidir. Bu sistemin daha güvenli bir benzeri APS ismi ile Fransa'da tekrar hayata geçirilmiştir [5].

Raylı sistemlerde kullanılan havai hat besleme sistemine bir telin/kablonun iki askı noktası arasında aldığı doğal zincir eğrisine verilen isme uygun olarak Kataner sistemleri adı verilmiştir ve taşıyıcı hat raylarının yan tarafına yerleştirilen çelik raylardan enerji sağlanmıştır. Eski metro sistemlerin birçoğunda tercih edilmiş olan bu besleme sistemi ile tünel kesitleri normal katanerli sistemlere göre küçültülebilmektedir. Tünellerde büyük kesitli Al veya Cu profilin veya çubuğun tavana asılması ile geliştirilen rijit kataner sistemlerinin kullanımı ise giderek yaygınlaşmaktadır. Sağladığı avantajlar bu sistemin, özellikle hattın tamamının tünel içinde olduğu durumlarda üçüncü ray sistemine göre daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır. Elektrikli raylı ulaşım araçlarında frenleme esnasında frenleme dirençlerinde ısıya

dönüştürülerek harcanan kinetik enerji, enerji etkinliğini ifade eden km/kWh değerini artırabilecek önemli bir potansiyele sahiptir [3,6,7].

Bataryalar, volanlar veya süperkapasitörler gibi enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler özellikle demiryolu araç imalat endüstrisinde yakından takip edilmektedir. Enerji depolama sistemlerinden beklentiler sadece enerji tüketimini azaltıcı etkilerle sınırlı kalmamaktadır. Tüketimle ilişkili pik yükü azaltıcı, cer güç kararlılığını ve seyir performansını artırma konularında çalışmalar yapılmaktadır. Enerji depolama sistemleri, frenleme esnasında aracın sahip olduğu kinetik enerjiyi depolayıp hızlanma esnasında geri verebilmektedirler [5,7].

Araçlar üzerine monte edilen enerji depolama cihazları enerji şebeke karakteristiğini yükseltmek için kullanılır. Faydalı frenleme ile geri kazanılan enerjinin şebekeye geri verilmesi ekonomik değildir [8].

Uygulamada depolama teknolojisi yatırımlarının muhtemel ekonomik sonuçlarının dikkate alınması gereklidir. Öncelikle önemli miktarda enerjinin depolanabileceği büyüklükte bir depolama cihazı kullanımının, araçta önemli ağırlık artışına neden olacağı muhakkaktır. Bu nedenle mümkün farklı depolama teknolojileri hacim ağırlık-fiyat-teknoloji kapsamında doğru olarak analiz edilmeli, karşılaştırılmalıdır. Uygulamanın doğru yapılabilmesi için bu çok önemlidir [7,9].

## **2. ULAŞIM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ**

Ulaşım, ülkemizde hızla büyüyen kentli nüfusun günlük faaliyetlerini sürdürmek amacıyla gerçekleştirdiği yolcu ve mal hareketlerini kapsamaktadır. Kentlerimizde bir günde gerçekleştirilen 50 milyon düzeyindeki yolculuk, kentler arasında kara, demir, deniz ve hava yollarıyla bir günde gerçekleştirilen yolculuk sayısının yaklaşık on beş katıdır [10].

### **2.1. Ulaşım Türleri**

Yaya ve bisiklet, bireysel ulaşım, lastik tekerlekli toplu, denizyolu ve raylı ulaşım sistemleri anlatılacaktır.

#### **2.1.1. Yaya ve Bisiklet**

Kentlerimizde yaya ulaşımı pek çok engelle karşılaşmakta ve yaya hareketleri motorlu taşıtların baskısı sebebiyle gelişmemektedir. Kentsel gelişmeye ve nüfus artışına paralel olarak kent içindeki yolculuklardaki yaya hareketlerinin payı azalmaktadır [11].

#### **2.1.2. Bireysel Ulaşım**

Ülkemizde giderek hızlanan otomobilleşme sonucunda kent içi karayolu altyapısı üzerinde büyük bir baskı oluşmakta, özellikle tarihi kent dokusu içinde yer alan yollar tıkanma noktasına gelmektedir. Toplu taşıma hizmetlerinin yeterli düzeye ulaştırılamaması, otomobilin bir ulaşım aracı ötesinde bir yatırım aracına dönüşmesi tüm türlerin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olmaktadır [12,13].

#### **2.1.3. Lastik Tekerlekli Toplu Taşıma**

Dolmuş, minibüs ve otobüslerden oluşan bu gruptaki toplu taşıma ve ara toplu taşıma araçları ülkemiz kentlerindeki yolculukların en büyük bölümüne cevap vermektedir. Nüfusu bir milyona yaklaşan kentlerimizde lastik tekerlekli toplu taşıma sistemlerinin en yaygın sorunu, talep düzeylerinin bu türün kapasitesinin üstüne çıktığı koridorlarda bile, hala talebe bu araçlarla cevap vermeye çalışılmasıdır [14].

#### 2.1.4. Denizyolu

Büyük kentlerimizden özellikle İstanbul ve İzmir'de kent içi deniz taşımacılığı önemli bir pay üstlenmiştir. Son zamanlarda önemi bir daha anlaşılması üzerine denizyolu ile kent içi ulaşım ivme kazanmıştır [2].

#### 2.1.5. Raylı Toplu Taşıma

Büyük kentlerimizde yolculuk taleplerinin ulaştığı düzey, raylı sistemlerle hizmet verilmesini zorunlu kılmakta, kentsel raylı sistemlerin uygulanmasında gecikilmiş olması büyük kentlerimizde yaşanan trafik sorunların temelini oluşturmaktadır. Son yıllarda girişilen çabalarla yapımına başlanan kent içi raylı toplu taşıma hatları gecikmiş ve birikmiş bir yatırım talebini gündeme getirmektedir. Kentlerimizdeki mevcut raylı toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve yeni sistemlerin planlanıp uygulamaya geçirilmesi sırasında birçok sorun ortaya çıkmaktadır [15].

Uzun yıllardır kent içinde yeni raylı sistemlerin devreye girmemiş oluşu sebebiyle, gerekli tecrübe ve birikime yeni yeni ulaşılabilmektedir. Kent içi raylı sistemler konusundaki bu eksiklik sadece teknik konularda değil, raylı sistemlerin planlaması, projelendirilmesi, yapımı ve işletilmesi, yapım ve işletme finansmanının sağlanması gibi konulardaki yöntem ve işlemlerin belirsizliğinde de kendini göstermektedir [16,17].

#### 2.2. Şehir İçi Raylı Ulaşım Tipleri

Artan nüfusa ve zorlaşan şehir içi trafiğine yeni açılımlar getiren raylı toplu ulaşım sistemleri beraberinde birçok avantaj getirmektedir [51]. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- **Yeni kullanıcıların katılması:** Raylı sistem kullanıcılarının %30-%50'si, otomobili olup bunun yerine raylı sistemi tercih eden kitledir.
- **Taşıma maliyetlerinin azalması:** Otobüs ile taşıma kıyaslandığında yolcu kilometre başına maliyet çoğu durumda %50 oranında azalmaktadır. Bu da işletme maliyetlerini ve sübvansiyon giderlerini düşürmektedir. Ayrıca şehrin ana arterlerinde, trafiğin omurgasını oluşturan hatlara demiryolu

hatları inşa edip otobüsleri trafikten almak, düşük yoğunluk bölgelere bu araçları kaydırarak yeni yatırım maliyetlerini azaltır.

- **Güvenlik:** Raylı sistem ile ulaşım karayoluna göre oldukça güvenlidir. Bir tren seti, trafikte seyreden 60-125 adet otomobile eşdeğerdir. Sinyal ve otomatik kontrol/durdurma sistemleri güvenliği temin eder.
- **Kirliliğin azalması:** Hiç şüphesiz elektrikli ulaşımın zararlı çevre etkisi karayolu taşıtlarının yanında yok denecek kadar azdır. Ayrıca trafikten eksilteceği taşıtlar da eklenirse önemli kazançlar sağlanır.
- **Tesis ve altyapı inşası:** Metrolar yer altında, LRT sistemler yer üstünde yolun altı veya üstü her ekseninde veya kanal içinde ilerleyebilir. İstasyonlar kompakt ve işlevseldir. Böylece şehrin her noktasına bağlantı mümkün olabilir.
- **Emlak değerlenmesi:** İstasyon civarı mahallerde emlak fiyatlarında artışlar olur. Artan değer ile kaliteli hizmet ve ürünler şehrin çeşitli noktalarına yayılırken yeni ticaret ve yerleşim odakları oluşur [15,17].

### 2.2.1. Tramvay

Tramvaylar, şehir içi taşımacılık sistemleri içinde ilk kullanılan sistemdir. Toplu ulaşımın alternatifi olmayan tek sistemi olarak düşünülen tramvay sistemleri, gelişen diğer ulaşım sistemlerine paralel olarak, atlı tramvaydan başlayarak, önemli gelişmeler göstermiştir ve zaman içerisinde diğer ulaşım sistemleri ile entegre edilerek, toplu taşımacılıktaki etkinliği artırılmıştır. Tramvay, maliyet açısından diğer sistemlere oranla oldukça ucuz sistemlerdir. Dünyada pek çok kentte kullanılan bu sistemler istasyon olarak otobüs durakları veya onlara benzer tesislerden faydalanılmaktadır. Tramvaylar için durak boyları en fazla 60-70 metre civarındadır. Enerji temini tramvaylarda kataner denilen havai besleme hatları ile sağlanmaktadır. Genel olarak 750 V DC kullanılır. Tramvay sistemleri, yukarıda belirttiğimiz özelliklerden ötürü diğer raylı toplu ulaşım sistemlerine oranla daha az maliyetli inşa edilebilmektedirler [17,18].



**Şekil 2.1.** Tramvay Örneği [19]

### **2.2.2. Hafif Metro**

Hafif Metro Sistemi şehir içi raylı toplu taşımacılık sistemlerinde çok önemlidir. Tramvay sistemlerine göre yüksek yolculuk kapasitesine sahiptir. Maksimum yolculuk kapasiteleri saatte 35.000 yolcu/yöndür. Bu sistemler yolculuk taleplerinin fazla olan ulaşım mahallerinde temel ulaşım sistemleri olarak tercih edilmenin yanında çok kalabalık şehirlerde daha yüksek kapasiteli sistemlerle bütünleşmiş çalışan tali ulaşım sistemleri olarak da inşa edilebilmektedir. Hafif yer altı treni hatları tam tecritle yani karayolu ile buluşmayan güvenli sistemlerdir. Hemzemin, köprüyol veya tünel olarak inşa edilebilirler. Sistem tecritle olduğu için yüksek ticari hızlarda seyredebilir. Bu sistemlerde ticari hız 42-45 km/saat, maksimum seyir hızı 88 km/saattir. İstasyon boyları ortalama 100 m civarında ve araç genişliği genellikle 2400-2700 mm'dir [15,17,20].



**Şekil 2.2.** Hafif Metro Örneği [20]



### 2.2.3.Metro

Şehir içi toplu ulaşım sistemleri arasında en yüksek yolculuk kapasitelerine sahip ve konforlu ulaşım sistemleri olarak kabul edilen yeraltı treni sistemleri, pek çok büyük şehirde ana toplu ulaşım sistemi olarak çalıştırılmaktadır. Metrolar yüksek yolculuk kapasitesine sahip sistemlerdir. Yolcu kapasiteleri saatte maksimum 70.000 yolcu/yöndür.

Büyük şehirlerde en yüksek yolculuk taleplerinin tespit edildiği hatlarda yer altı treni sistemleri tercih edilmektedir. Tam tecritle raylı ulaşım sistemleri olan metrolar, genellikle yüzeydeki trafik yüklerini hafifletmek amacıyla derin tünel yöntemleri ile yer altında inşa edilirler. Araziye bağlı olarak aç kapa tünel veya delme olarak yapılan metro hatları bazen yüzeyde hemzemin şeklinde veya viyadük üzerinde yapılır [10,22].



Şekil 2.3. Metro [23]

### **3. ELEKTRİKLİ RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ**

İnsanların yaşamında vazgeçilmez bir olgu olan ulaşımın amacı, insanları bir yerden başka bir yere en konforlu bir şekilde ulaştırmaktır. Kentleşme insanların sayılarının artması ile birlikte ulaşım sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu sorunun çözümü adına dünyada öngörülen yaklaşım kentsel raylı sistemlerin yoğun bir şekilde kullanılmasıdır. Kentsel raylı ulaşım sistemleri ülkemizde metro, hafif metro, tramvay ve cadde tramvay sistemleri olmak üzere sınıflandırılabilir [24,25].

#### **3.1. Raylı Ulaşım Sistemlerinin Genel Yapısı**

Kentsel raylı ulaşım sistemleri yapısal olarak sabit tesisler ve araçlar olmak üzere iki kısma ayrılır. Sabit tesisler yolcu ve besleme istasyonlarını, rayları, kataner veya üçüncü ray hattını, atölye ve merkezi kontrol binasını kapsar. Elektriksel olarak raylı ulaşım sistemleri dört ana bölümdür, bunlar: Cer Sistemleri, Yardımcı Güç Sistemleri, Tahrik Sistemi ve Kontrol ve Denetleme Sistemleridir [1,26].

Bu bölümlerden, Cer ve yardımcı güç sistemleri bu bölümde verilmiş, tahrik, kontrol ve denetleme sistemleri LRT sistemi incelemesi kapsamında açıklanmıştır.

##### **3.1.1. Cer Sistemleri ve Yapısı**

Kataner olarak bilinen havai hat ve 3. ray olmak üzere raylı ulaşım sistemlerinde besleme iki farklı yöntemle yapılır. Kataner sistemi, demiryolu üzerine asılmış havai bir hattır, yol ekseninde hassas bir şekilde yatay olarak tutulan taşıyıcı bir kablo sistemidir. Kataner sistemi portör konsolların ve izolatörlerin bağlandığı direkler üzerindeki esas taşıyıcı kablo, pandül seyir telinin portöre bağlanmasını sağlayan kısım ve seyir telinden oluşur. Seyir teli elektriksel ve mekaniksel birtakım özelliklere sahiptir. Yer çekimi sebebiyle oluşacak gerilimleri karşılayabilecek kadar mekanik dayanımlı ve büyük gerilim düşümleri oluşturmaması için çok iyi bir iletken olmalıdır. Portör iletkeninden seyir iletkenine akım akışı kolay olmalıdır [3,6,27].

### **3.1.2. Cer Gücü Temin Sistemleri**

Genel olarak bakıldığında, Cer gücü temin sistemlerinde, yer altı treni, tren gibi raylı ulaşım tesislerinde araçlara hareket verdiren sistemler haricinde elektrikli birçok ünite vardı. Bunlar yardımcı güç sistemi yüklerini oluşturur. Yardımcı güç sistemi, yolcu konforu için kullanılan ısıtma/soğutma, aydınlatma, sürücü kabin sistemlerine ve 24 V DC gerilim devresine enerji sağlar. İhtiyaç duyulan enerji kataner sistemi ya da üçüncü raydan temin edilmektedir [2,6].

### **3.1.3. Cer Gücü Tipleri**

Raylı sistem güç temin tipleri akım tipine göre ayrılmaktadır. Esas olarak doğru akım gerilim kullanılmaktadır; çünkü raylı sistemlerde kullanılan seri komütatörü motorlar için alternatif akım gerilime göre daha uygun, hiperbolik güç/hız eğrilerine sahiptir. Dünyada çoğunlukla doğru akım sistemler hala tercih edilmesine rağmen, düşük gerilim kullanımı mevcut sistemlerde yüksek güç talebini karşılamak adına en büyük dezavantajını oluşturmaktadır. Yirminci yüzyıl başlarında seri motorları, alternatif akım gerilimin dönüştürülebilme yeteneği ile birleştirme çalışmaları yapıldı. Amaç tek fazlı seri alternatif akım motoru monofaze alternatif akım gerilimde ve şebeke frekansında sürmektir [7].

## **3.2. Cer Gücü Sistemlerinin Temel Yapısı**

Doğru akım ve Alternatif akım 50Hz sistemlerde cer gücü enerjisi doğrudan yerel şebekeden sağlanabilir. Alternatif akım 25kV-16,7 Hz. sistemlerde ise enerji merkezi olmayan dönüştürücü istasyonlardan veya şebekeden sağlanabilir. Doğru akım sistemlerde enerji 34,5kV trifaze şebeke geriliminden alınarak kullanılır. Monofaze alternatif akım cer gücü sistemleri ise genellikle 110 kV mertebelerindeki şebekeden doğrudan beslenir [28,29].

### **3.2.1. Cer Gücü Dağıtımı**

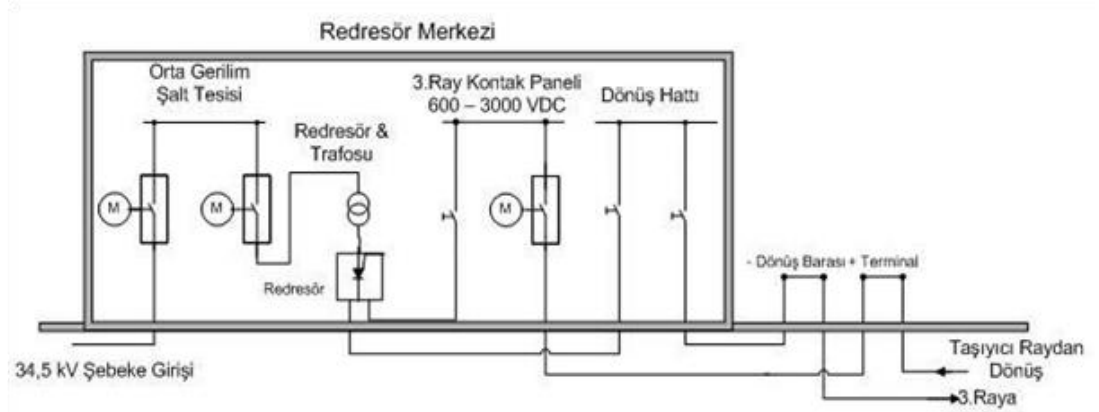
Cer gücü dağıtımının fonksiyonu, şalt tesisine belli gerilim ve frekans değerlerinde gelen enerjiyi, tüketiciye saymaca değerleri sağlayacak şekilde ulaştırmaktır. Şalt tesisi tipleri şöyle özetlenebilir [30].

- **Trafo Merkezleri:** İletim hattından nominal frekansta alınan gerilim, cer gücü sistemine monofaze alternatif akım gerilim olarak verilmektedir.
- **Cer Gücü Redresör Merkezi:** Şebekeden alınan trifaze alternatif akım gerilimi gereken DC gerilime dönüştürerek sisteme veren merkezlerdir.
- **Merkezi Olmayan Dönüştürücü Merkezi:** Şebekeden alınan trifaze alternatif akım 50HZ gerilim, makine veya güç elektroniği devreleri yardımı ile alternatif akım 16,7Hz gerilime dönüştürülerek nominal değerlerinde sisteme verilir.
- **Anahtarlama Postaları:** Farklı şalt sistemlerinden enerjiyi alarak, besleyeceği kısmın özelliklerine uygun enerjiyi cer sistemine veren veya farklı kısımlar arasında bağlantı sağlayan gruplamalardır.

### 3.2.2. DC Cer Sistemi

Günümüzde raylı sistemlerin yarından fazlası oranında doğru akım tip besleme kullanılmaktadır. Toplu taşımada, daha yüksek gerilimlerin tehlikelerinden dolayı maksimum 1500V doğru akım mertebesine kadar gerilim tercih edilmektedir. En yaygın olarak 750 ve 600V doğru akım sistemler kullanılmaktadır. Bunlarda şalt tesisleri arası mesafe 1,5-6 km'yi bulurken 1500 ve 3000V doğru akım sistemlerde bu mesafeler 20 km'ye kadar çıkmaktadır. Şalt tesislerinin çıkış gücü tramvay sistemlerinde 1-2 MW arasında değişirken ağır metro sistemlerinde bu değer 10MW mertebelerine kadar çıkmaktadır [31].

Elektrikli ulaşım sistemleri güç temininde iki temel tüketici bulunmaktadır. Cer gücü ve yardımcı güçtür. Çekiş gücü trenleri besler; yardımcı güç ise istasyon, trafo merkezleri, kontrol merkezleri vb. tarafından kullanılan aydınlatma, ısıtma-soğutma, havalandırma, haberleşme gibi sistemler tarafından kullanılmaktadır. Yardımcı güç temin sistemi indirme, doğrultma ve dağıtım fonksiyonlarını sağlayan cer gücü trafo merkezi, istasyon trafo merkezi ve 34,5kV ana iletim hattı ile enterkonnektedir. Doğru akım çekiş gücü sistemi trafo merkezi ve bu enerjiyi trenlere ileten üçüncü ray hattından oluşmaktadır. Bir cer gücü trafo merkezi şu bileşenlerden oluşmaktadır [32,33].



**Şekil 3.1.** Doğru Akım Cer Besleme Sistemi Prensi Şeması [36]

- Redresör trafosu
- Redresör
- Doğru akım şalt hücreleri
- OG şalt hücreleri
- Ana dağıtım trafosu
- Dağıtım ve AG transfer trafosu
- Yardımcı güç panoları
- Kesintisiz güç kaynağı
- Kontrol donanımı

Doğru akım sistemleri, 750V Doğru akım gerilimi sağlayan sistem redresör, bunları besleyen redresör trafosu ve doğru akım gerilimi ve üçüncü ray sistemleri görevi yapan panolardan oluşmaktadır [32].

### 3.2.3. Redresör Trafosu

Redresör Trafosuna genel olarak baktığımızda, 34,5kV şalt hücresi üzerinden beslenmektedir. Şartnamelere ve standartlara uygun tipte ve izolasyonda olmaktadır. Redresör trafosunun, günümüz sistemlerinde sıklıkla kullanılan on iki darbeli redresör beslemesine uygun şekilde tek primer ve çift sekonder şeklindedir. Sekonder sargılar üzerinden redresörün altı darbeli köprüleri beslenmektedir. İhtiyaca göre trafo soğutması için fanlar da bulunabilir [37].

### **Redresör**

Redresör aslında, alternatif akım gücü doğru akım güç olarak doğrultan, darbeli tip redresördür. Uygulamada sık rastlanılan tip üç faz köprülü ve diyot doğrultmalı ünitelerdir [38].



**Şekil 3.2.** Redresör [38]

### **3.2.4. DC Şalt Hücreleri**

Redresör trafosu-redresör ünitesinden cer gücü şebekesine giriş donanımdır. Dahili kullanım olarak tesis edilen ve metal pano olarak monte edilen hücreler yüksek hızlı doğru akım kesiciler, ayırıcılar, kontrol, izleme ve koruma ekipmanları bulundurmaktadır [32].

### **3.2.5. OG Sistem**

OG sistemler, aslında cer yani çekiş gücü sistemini ve istasyonları güvenli şekilde beslemek için tesis edilen elemanlardır. Uygulamada dahili tip, araba üzerine monte, kesicili kapalı hücrelerdir. Bu üniteye ayırıcı, kesici, gerilim ve akım trafoları, kontrol ve ölçüm cihazları vd. gereken tüm donanım içermektedir. AG bölmesinde kontrol ve röle koruma donanımı bulunmaktadır. Ana giriş hücresi şehir şebekesinden sisteme giriş için kullanılmaktadır. Giriş veya çıkış şalt hücreleri şehir şebekesine bağlantı noktalarında kullanılmakta ve işletme esnasında besleme noktaları bypass olarak kullanılmakta, aynı zamanda şebeke bölümlendirmesini sağlamaktadır. Trafo besleme şalt hücresi redresör ve dağıtım trafolarının beslenmesi için kullanılmaktadır [39,40].

### **3.2.6. 34,5/0,4 kV Dağıtım Trafosu**

Genel olarak bakıldığında, 34.5/0.4kW dağıtım trafosuna bakıldığında, cer yani çekiş gücü trafo merkezinin iç güç veya şartlara bağlı olarak yakın istasyonun yardımcı güç ihtiyacını karşılamak üzere tesis edilir [41].

### **3.2.7. 6.3/0,4 kV Transfer Trafosu**

Baktığımızda, 6.3/0,4kV transfer trafosu, istasyonun genelde iki farklı bölgesinde bulunan AG yüklerinin acil bir durumda diğer bölgelerden beslenebilmesi için kullanılmaktadır [42].

### **3.2.8. AG ve Yedek Güç Sistemi**

400/231 VAC Yardımcı Güç Panoları, Kesintisiz Güç Kaynağı, Kesintisiz Doğru Akım Güç Kaynağı olarak üçe ayrılır.

### **3.2.9. 400/231 VAC Yardımcı Güç Panoları**

Genel olarak baktığımızda, 400/231V alternatif akım yardımcı güç panoları aslında trafo merkezindeki iç ihtiyaç dağılımını sağlayan trafolardır.

## **3.3. Kesintisiz Güç Kaynağı**

İstasyonlarda haberleşme, sinyalizasyon, acil durum aydınlatma gibi kritik sistemlerin ana şebekedeki kesinti halinde beslenmesini sağlar. Beraberinde akü grupları bulunmaktadır bu da ünitelerin durumu SCADA ile izlenmektedir [20].

### **3.3.1. Kesintisiz Doğru Akım Güç Kaynağı**

Kesintisiz doğru akım güç kaynağı olarak, trafo merkezlerindeki kontrol gerilimi için, 110V doğru akım çıkışlı ünitelerdir. Bu donanımın da akü grupları olup izlenmesi scada üzerinden yapılmaktadır [32].

## **3.4. Cer Gücü Şebekesi**

Baktığımızda cer yani çekiş gücü şebekesi, trenlere enerji taşıyan üçüncü ray ve trafo ile üçüncü metro rayı bağlayan kablolardan oluşmaktadır. Hat rayları, şebekede, akımın cer gücü trafo merkezlerindeki negatif baraya dönüş yolunu oluşturmaktadır.

Üçüncü ray sistemi, kompozit olmayan belirli boyda yekpare çelik malzemeden yapılmaktadır [43,44].

Genelde alüminyum gövde üzerine paslanmaz çelik temas yolundan oluşur. Ray monte edilen travers üzerine yerleştirilen izolatörlere monte edilir. Ayrıca sıcaklığa bağlı genleşmeleri önlemek için özel bağlantı parçaları ile bağlanır. Sıcaklığa bağlı üçüncü ray direnci şu şekilde hesaplanır [42]:

**$\theta_B$** : Ortam sıcaklığı (°C)

**$P(\theta_B)$** : Belirli sıcaklıktaki özgül direnç ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )

**$R(\theta_B)$** : Belirli sıcaklıktaki direnç ( $\Omega$ )

**L**: Uzunluk (m)

**A**: Kesit ( $\text{mm}^2$ )

20 °C'deki özgül direncin hesabı:

$$P(\theta_B) = \rho_{20} \times [1 + \alpha (\theta_B - 20)] \quad (3.1)$$

$$R(\theta_B) = P(\theta_B) \times \frac{1}{A} \quad (3.2)$$

Buradan yola çıkarak paralel bağlı olan çelik alüminyum iletkenlerin toplam direncinden rayın toplam direnci bulunabilir [45].

#### 3.4.1. Cer Gücü Temin Sistemlerinde Elektriksel Bağlılıklar

Cer gücü temin sistemlerinde elektrik bağlantıları da enerji taşıyıcı hattaki gerilim kararlılığının sürdürülebilirliği problemleri incelenecek ve sebepleri analiz edilerek ve örneklemeler verilerek açıklanmıştır. Baktığımızda, empedans, akım dağılımı, toprak veya demiryolu arası kaçaklar gibi elektriksel karakteristikler bir iletim hattının enerji iletim davranışını belirler. Hattın boyutlandırılması, gerekli koruma elemanları ve işletme ekipmanları iletilecek elektrik enerjisi tipi göz önüne alınarak tasarlanır [45,71].



**Tablo 3.1:** EN-50 Göre Demiryolu Elektrifikasyonu Gerilim Seviyeleri [71]

<i>Değerler</i>	<i>Un</i>	<i>Umin2</i>	<i>Umin1</i>	<i>Umax1</i>	<i>Umax2</i>	<i>Umax3</i>
DC 600 V	600	-	400	720	770	1015
DC 750 V	750	-	500	900	950	1269
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2538
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24311
AC 25kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38746

**Un:** Nominal gerilim

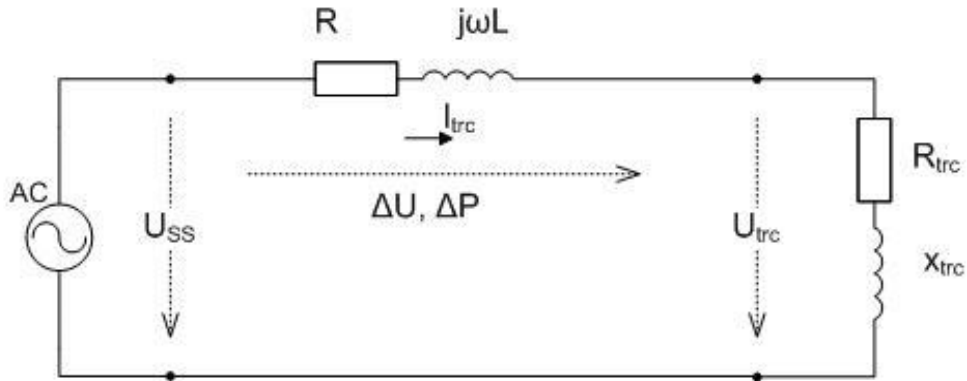
**Umin1:** En düşük kalıcı gerilim

**Umax1:** En yüksek kalıcı gerilim

**Umin2:** En düşük geçici gerilim, max 10 dakika

**Umax2:** En düşük geçici gerilim, max 5 dakika

**Umax3:** Aşırı gerilim, 20ms'den uzun süreli



**Şekil 3.3.** Cer Gücü Sistemi Prensi Şeması [36]

Şehir içi toplu taşımada 600, 750 ve 1500V DC gerilim seviyeleri kullanılmaktadır. Alternatif akım gerilim özellikle yük ve uzun mesafe taşımacılıkta tercih edilmektedir. Dünya üzerindeki yaklaşık 200.000 km elektrikli demiryolu hattının %33'ü 25 kV AC-50 Hz, %18'i 25 kV AC 16,7 Hz. ve geri kalanı doğru akım gerilimli sistemlerdir [86].

### 3.4.2. Hat Direnci/Empedansı

Hat direnci veya empedansı; iletken hattı, ekipmanları ve dönüş akım devresinden oluşan çevrimin efektif empedansı hat empedansı olarak adlandırılır. Doğru akım

sistemlerde hat empedansı, tüm paralel kontak hatlarının, fider iletkenlerinin veya kablolarının ve paralel dönüş kablolarını içeren efektif hat direncinin toplamından oluşur. Reel direnç bileşeni R ile sembolize edilir [70].

### 3.4.3. Birim Uzunluk Başına Direnç

İletkenlerin, taşıyıcı rayın, kabloların ve iletkenlerin birim uzunluk başına direnci yapıldığı malzemeye göre belirlenir. İletkenler ve kablolar için birim uzunluk başına direnç, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = \rho(v) = \rho_{20} \times (1 + \alpha R \times (v - 20)) \quad (3.3)$$

Taşıyıcı rayların birim uzunluk başına direnci alternatif akım sistemlerde frekansa bağlı olarak manyetik iletkenliğe göre değişmektedir. Doğru akım sistemlerde ise kullanılan ray tipine göre kesite bağlı değişmektedir. Toprak dönüşünde ise yine alternatif akım sistemde frekans ve manyetik iletkenliğe göre değişirken doğru akım sistemde bu değer sıfırdır. Aşağıdaki tabloda da görüleceği üzere, üçüncü ray tiplerine göre birim uzunluk başına, aşınma oranına göre direnç değerleri verilmiştir [10].

**Tablo 3.2.**20°C’de Hat Empedansının Ray Tiplerine Göre Değerleri [36]

f (Hz)	I <sub>hat</sub> (A)	Z' <sub>HAT</sub> (mΩ/km)				
		S49	S49 <sup>2</sup> >	UIC54	UIC60	R65
0	Tüm değerler	35,1		32	28,9	25,2
	100	100	98	85	73	85
16,7	200		129	95	80	107
	300	190	136	120	95	129
	100		180			160
50	200		240			200
	300		290			250

**Tablo 3.3.**20°C’de, Aşınma Oranına Göre Birim Uzunluk Başına Ray Direnci [10]

<i>Ray Tipi</i>	<i>Aşınma</i>	<i>R' (mΩ/km)</i>		
		<i>Ray</i>	<i>Tek Hat</i>	<i>Çift Hat</i>
S49	0	35,7	17,8	8,9
	15	42,0	21,0	10,5
UIC 54	0	32,0	16,0	8,0
	15	37,6	18,8	9,4
UIC 60	0	28,9	15,0	7,5
	15	34,0	17,0	8,5
R60	0	28,8	14,9	7,5
	15	33,0	17,0	8,5
R65	0	25,2	12,7	6,4
	15	29,9	14,9	7,5

### 3.5. Cer Hatlarında Gerilimin Düzenlenmesi

Trafo ve redresör merkezlerinden araçlara enerji iletimi esnasında hat boyunca gerilim düşümü meydana gelecektir. Ters durumda, eğer araç frenleme geri kazanım enerjisini hatta verebiliyorsa aracın bulunduğu konumda hatta gerilim yükselmesi olacaktır. Bu sebeplerden dolayı araç kolektörlerinde gerilim sistemin yapısına, besleme bölgesindeki araçların güç tüketimine ve besleme noktalarına olan uzaklığa göre değişecektir. Normal işletme şartlarında gerilimin asla tolerans aralığını aşmasına veya nominal gerilim sınırının altına düşmesine müsaade edilmeyecektir. Yüksek hızla veya ağır yükte işleyen demiryolu hatlarında standartlar daha katı olup, hattın hiçbir bölgesinde nominal gerilim değerinden sapılmamaktadır [22].

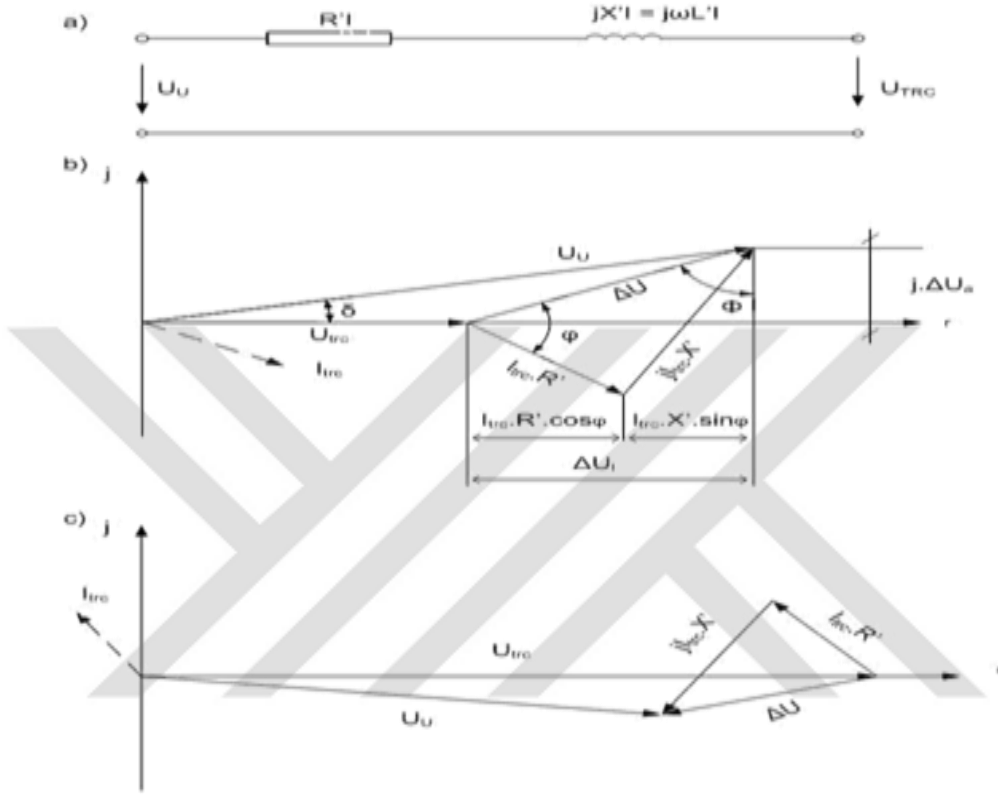
#### 3.5.1. Temel Kabuller

Şekilde de belirtildiği üzere; eşdeğer devre ve ilişkin vektör diyagramı verilmiştir. Alternatif Akım sistemler için geçerli olan bu diyagramdan gerilim düşümleri hesaplanabilir. Doğru Akım sistemlerinde yani hatlarda ise bu eşitlik [10].

$$U = I_{RC} \times l \times R' \quad (3.4)$$

Doğru Akımda hat boyunca, rayın birim uzunluk başına direncinden veya Alternatif Akımda hatta ise efektif dirençten kaynaklanan güç kaybı ise şöyle ifade edilebilir:

$$P' = I^2 \times \frac{R}{L} \quad (3.5)$$



**Şekil 3.4.** Cer Gücü Kontakt Hattında Gerilim [86]

Şekil (a): Eşdeğer devre

Şekil (b): Tren sürüş anında vektör diyagramı

Şekil (c): Tren frenleme anında vektör diyagramı

### 3.5.2. Gerilim Düşümü Hesabı

Gerilim düşümünde, besleme noktası ile aynı besleme bölgesi içinde yer alan bir veya birden fazla trenin mevcut konumu arasındaki düşüm hesaplanır. Hat akımından ayrı olarak birim uzunluk başına empedans, besleme tipi ve mesafe gerilim düşümünü belirler. En az karmaşık hesaplama tek uçlu besleme durumunda yapılabilir [11].

### 3.5.3 Tek Uçlu Besleme

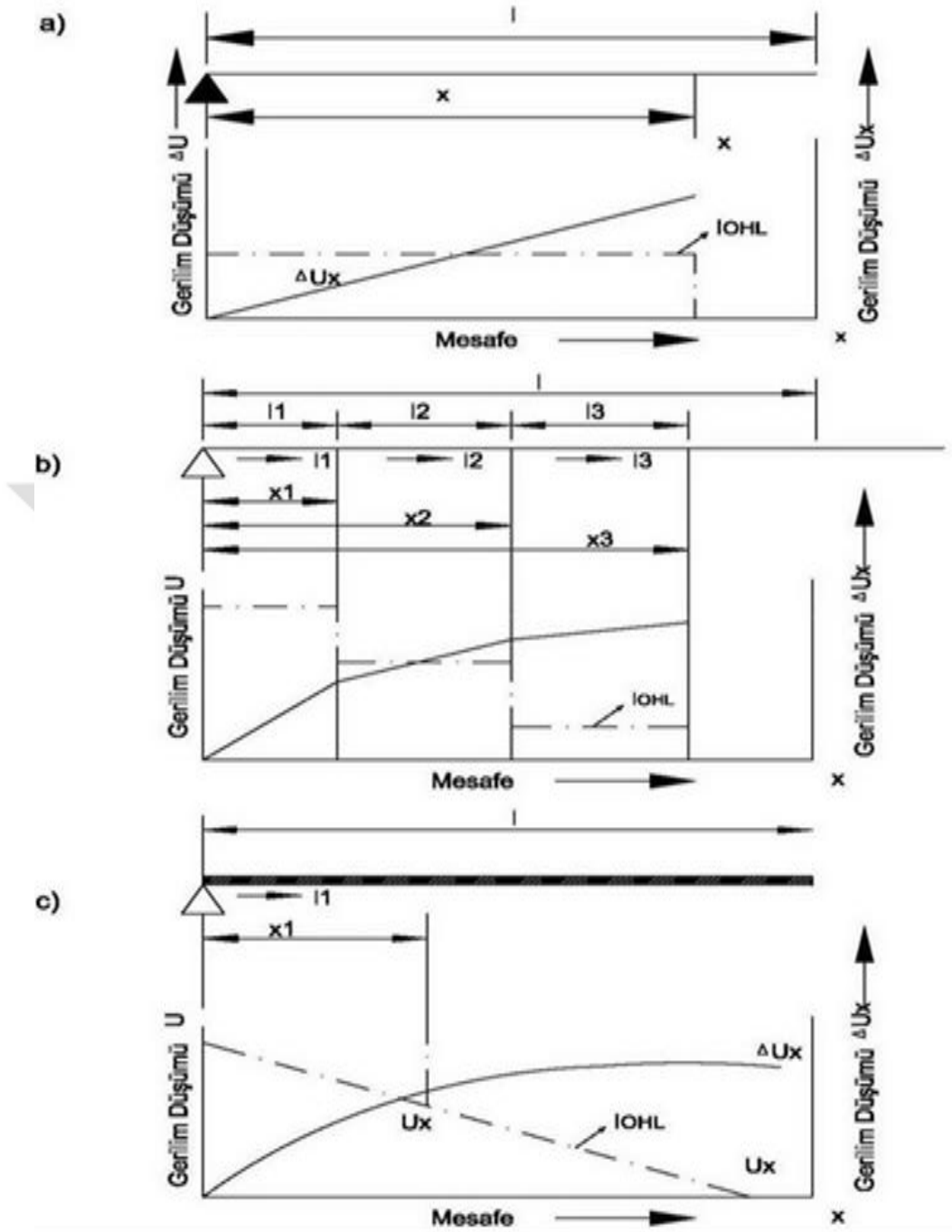
Aslında baktığımızda tek uçlu beslenmelerde, besleme noktasından  $x$  konumuna kadar olan gerilim düşümü şu şekilde hesaplanabilir.

$$U_z = I_{trc} \times Z' \times x \quad (3.6)$$

Maksimum gerilim düşümü  $U_{max}$  ise, tren besleme noktasından en uzak noktaya ulaştığında oluşacaktır.

$$U_{max} = I_{trc} \times Z' \times l \quad (3.7)$$

Eğer araç, bir bölge boyunca sabit hızla ilerliyorsa grafik-zaman-mesafe ekseninde oluşturulabilir. Bu ifade,  $n$  tren sayısını ifade edecek şekilde aşağıdaki gibi geliştirilebilir [10]. Bu problemi çözmek için başka bir eşitlik geliştirilmiştir. Burada  $\alpha$  iki ivmelenme işlemi arası dönem katsayısıdır. Ampirik metotlarla elde edilen bu katsayı düzenli işleyen sistemlerde iki iken şehir içi toplu taşıma sistemlerinde 4-6 arasında değişmektedir [23].



Şekil 3.5. Tek Uç Beslemeli Hatta Gerilim Düşümü Gösterimi [22]

Şekil (a). Bölgede tek trenin varlığını göstermektedir.

Şekil (b). Bölgede iki trenini varlığını göstermektedir.

Şekil (c). Düzgün dağıtılmış yük yani hat yükünü göstermektedir.

### 3.5.4 Çift Uçlu Besleme

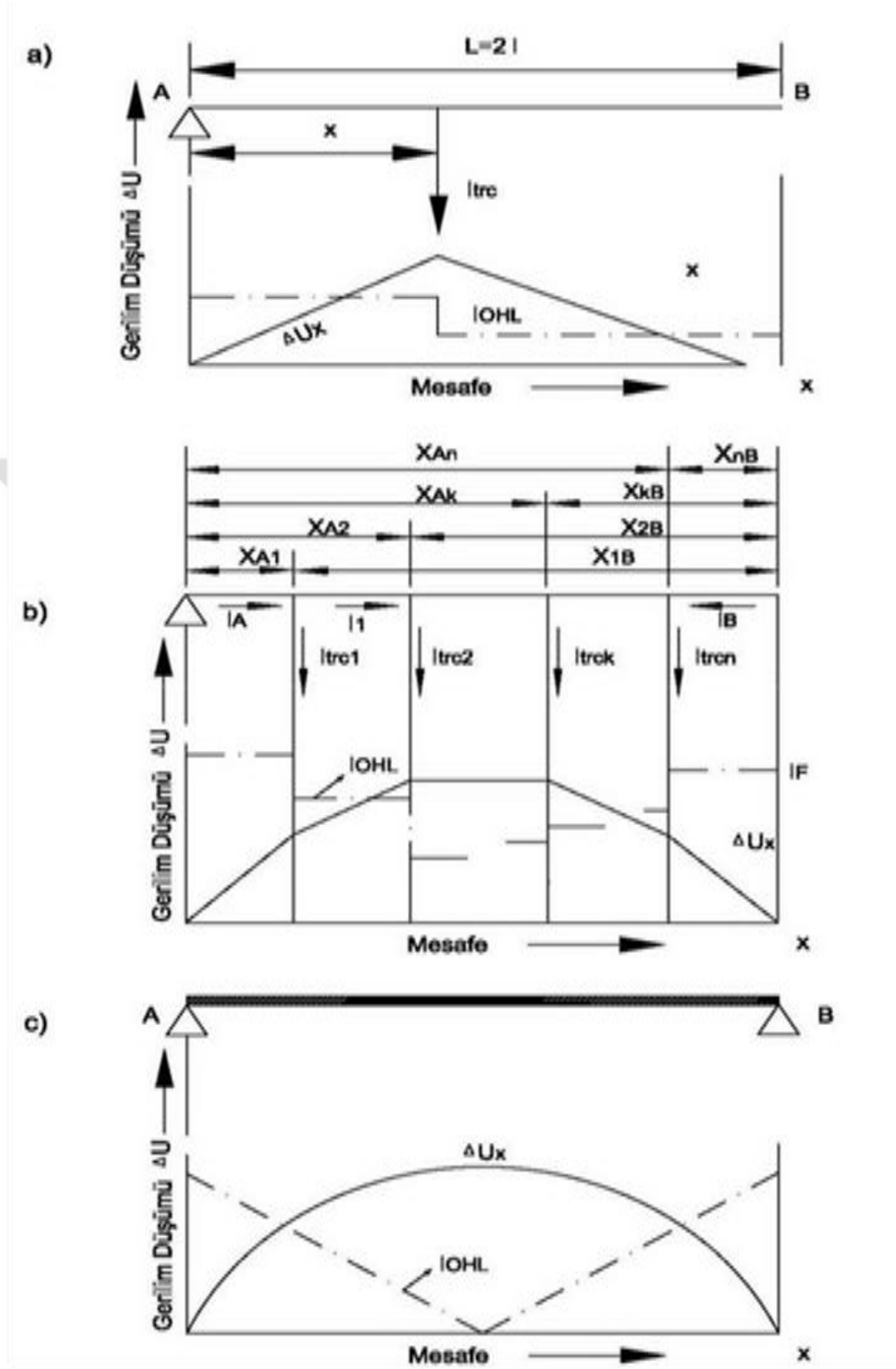
Çift uçlu besleme koşullarına baktığımızda,  $L$  iki besleme merkezi arası mesafedir. Çift uçlu besleme durumlarında bir merkezin besleme bölgesi  $l = L/2$  (3.8) olarak tanımlanır; ayrıca iki merkezin  $R'$  değeri sabit ve  $U_A = U_B = U$  (3.9) olarak kabul edilir. Gerilim bölüşümüne göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir [22].

$$\frac{I_A}{I_{RC}} = Z' \times (L - x) / (Z' \times L) \quad (3.10)$$

Bakıldığında, A merkezi noktası referans alınarak, aşağıdaki kabullere göre herhangi bir  $x$  noktasındaki gerilim düşümü ve  $x=L/2$  noktasındaki maksimum değeri şöyle elde edilebilir [68].

$$U_x = I_{rc} Z' \times \left(x - \frac{x^2}{L}\right) \quad (3.11)$$

Çift hat sistemin kontak hattı veya üçüncü ray montajında, besleme bölgesinin orta noktasında kros kupla yapılmışsa paralel hattın herhangi birinde seyreden tren meydana gelecek gerilim düşümü bağıntıları aşağıda verilmiştir. Besleme bölgesinde fazla sayıda tren bulunması durumunda eşitlikler değişecektir. Yukarıda geçen kabul ve şartlar altında A besleme merkezi ile *katren* arasındaki ani gerilim düşümü aşağıdaki gibi olacaktır [47,48].



Şekil 3.6. Çift Uç Beslemeli Hatta Gerilim Düşümü Gösterimi [22]

Şekil (a). Bölgede tek tren, Şekil (b). Bölgede iki tren ve Şekil (c). Düzgün dağıtılmış yükü yani, hat yükü göstermiştir.



Eğer A ve B besleme merkezlerinin gerilimleri eşit değilse eşitliğinin sağ yanına;

$Ak \times (U_A - U_B) / L$  [3.1.8] değeri eklenir. Bu durumda eğer besleme bölümü boyunca yük yoksa bir merkezden diğerine  $I_{DA}$  değerinde kombine edici bir akım akar [49],

$$I_{DA} = (U_A - U_B) / (Z' \times L) \quad (3.11)$$

Eğer  $\alpha$  faktörü ve besleme bölgesindeki  $n$  tren âdeti biliniyorsa ortalama değer:

$$U = \frac{I_{RC} Z' L}{12(n + 2\alpha - 1)} = \frac{I_{RC} Z' l}{6(n + 2\alpha - 1)} \quad (3.12)$$

Şekilde de görüleceği üzere; çeşitli besleme tiplerine göre gerilim düşümü hesabı için kullanılan eşitliklerin özeti verilmiştir. Karşılaştırma kolaylığı açısından hat bölümü uzunluğu  $l$  olarak verilmiş, çift uçlu beslemede ise kısım uzunluğu  $L = Lal$  olarak alınmıştır [48].

### 3.6. CER Gücü Temin Sistemi Kontrolü

Cer gücü sistem kontrolünü sağlayan sistemler aşağıda verilmiştir.

#### 3.6.1. Gelişim ve Fonksiyon

Güç sistem kontrolü cer gücü, üçüncü yer altı treni veya ray ya da kontak hattı, trafo-redresör merkezi ile ilgili tüm ekipmanları kapsar. Kontrol sisteminin dizaynı ve konsepti güç beslemesi ile yakından ilişkilidir. Önceleri kontrol sisteminin görevi yüksek gerilim kesici ve ayırıcılarının kontrolü üzerinedir.

Artan güvenlik gereklilikleri ve ekonomik işletme talepleri, kontrol sistemleri üzerinde etkisini belirgin ölçüde göstermiştir. Kontrol merkezi ile şalt tesisleri arasındaki mesafenin artmasıyla da uzaktan kontrol kavramı doğmuştur [10,22].

### **3.6.2. Yerel Kontrol Ünitesi ve Uzaktan Kontrol Hatları**

Bozulmalara ve bakım işlerine rağmen yüksek gereksinim imkanlarını karşılayabilmek için kontrol sistemi çeşitli miktarda ana ve yardımcı devrelere bölünmüştür. Bağımsız hat bölümleri elektrikle sürülen kesiciler ile beslenir ve kesicilere paralel, seri bağlı trafolar aracılığı ile izlenir. İstasyonlarda ana gruplara bağlanır. Lokal kontrol üniteleri de kesicilerin kontrolü ve izlenmesi için kullanılır [10,50].

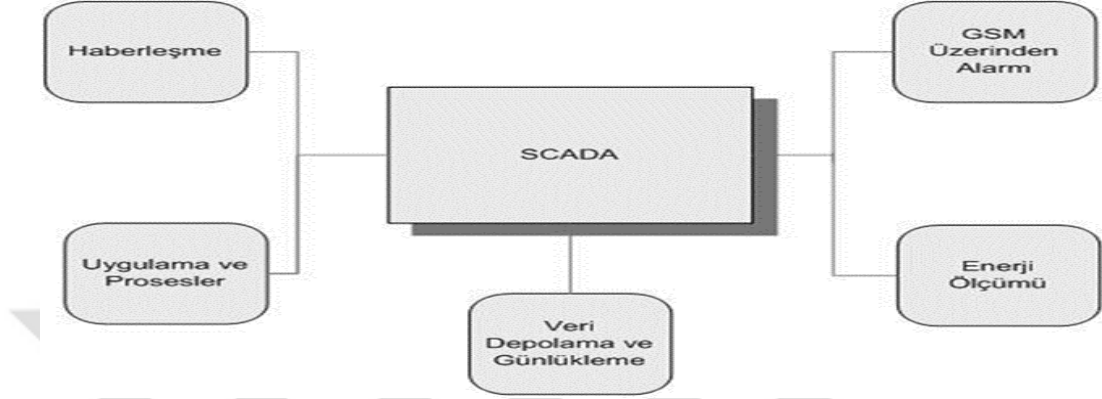
### **3.6.3. Denetim Kontrolü ve Veri Toplama**

Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Merkezi olarak adlandırılan, gereken ihtiyaçları gerçekleştirmek üzere kurulan ve sistemi kontrol eden, otomasyonunu yöneten, veri işleyip transfer edebilen merkezi sistemdir. 1970'ler ortasında kayıt kontrol sistemi olarak kullanılmış, data görüntüleme teknolojisi ile birlikte çok fonksiyonlu kontrol merkezi olarak gelişmeye devam etmiştir.

Periyodik ve aralıklı haberleşme temeline dayanır. Yüksek doğruluklu uygulamalar için scada sistemleri veri iletimi onaylama, kontrol doğrulama ve yetkilendirme, şüpheli veri tanımlama yeteneklerine sahiptir. Dağınık kontrol sistemleri durum paradigmasına göre çalışırlar. Yani sistem, mevcut durumun herhangi bir andaki anlık durumunu görmeye dayanır. Birçok scada uygulamasında ise geçici durumların raporlandığı durum raporlama paradigması geçerlidir. Scada sistemi aşağıdaki fonksiyonel bölümlerden oluşur [10,22,49].

- Yerel kontrol
- Alarm İşleme
- Sinyal ve veri işleme
- Dijital ölçüm görüntüleme ve işleme
- Uzaktan kontrol sistemi
- Kilitleme
- İşletme

Genel olarak bakıldığında, aslında güvenlik, depolama, bilgilendirme, hata raporlama, operasyon günlükleme, parametre ayarlama gibi çeşitli ilave fonksiyonlar operatör ile scada arasında iletişimi sağlar [24].



Şekil 3.7. Genel SCADA Sisteminin Gösterimi [24]

### 3.7. Denetim Kontrolü ve Veri Toplama Sistemi Bileşenleri

Scada'nın sistemsal olarak bileşimlerine bakıldığında, scada sistemini temel olarak dört bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlar uzak terminal birimleri, ana terminal birimi, iletişim sistemi ve kontrol üniteleri olarak sıralanabilir [79].

#### 3.7.1. Uzak Terminal Birimleri

Uzak terminal birimleri yerleştirilen yerde ölçüm ve denetleme işlemleri yürüten birimler, Remote Terminal Unit olarak adlandırılmaktadır. SCADA sistemleri içerisinde yerel ölçüm ve kontrol noktalarını oluşturan RTU'lar, birbirlerine bağlı çeşitli cihazları enerji gözetleme sistemlerinde, kesici ayırıcı kontrol eder; ölçülmesi gereken akım, gerilim, aktif ve reaktif güç, güç faktörü gibi değerleri ölçebilir. Bakıldığında, RTU yardımıyla merkezi kontrol ve izlemeyi sağlayabilmek için RTU'lar tüm ölçüm sonuçları ile cihazların çalışma durumlarını (Kesici açık, Ayırıcı kapalı) merkeze iletirler ve merkezden gelen komutlar doğrultusunda (Kesici Aç, Ayırıcı Kapa) işlemlerini yaparlar [25].

### 3.7.2. Güç Kaynağı Modülü

Güç kaynağı modülü şebeke geriliminden otomasyon ekipmanı elektronik cihazları için gerilim üretir [15]. Bu gerilimin en yüksek değeri 24V kadar etmektedir. 24V'a sarkan sensör sinyalleri, erişim düzenekleri ve uyarı lambaları için gerilimler, güç kaynağı üniteleri veya kontrol transformatörleri için ilave gerilim sağlar [51].



Şekil 3.8. Güç Kaynağı Modülü [65]

### 3.7.3. Merkezi İşleme Ünitesi

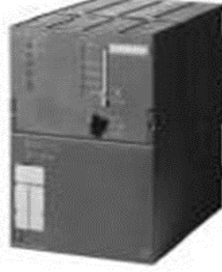
Orta büyüklükten geniş program hafızalı, ikili ve kayan noktalı aritmetikte yüksek işlem performanslı CPU, geniş kapsamlı I/O konfigürasyonu ve dağıtık I/O yapısının kurulması içindir. Bozulmaz CPU'lar daha yüksek emniyet gereklilikleri olan tesislerde kullanılmaktadır. Baktığımızda, CPU kontrolörün düzgün işletimini düzenli öz sınımalar, komut testleri ve mantıksal ve kronolojik program çalıştırma kontrolleri vasıtasıyla kontrol eder. Ek olarak, dağıtık I/O yaşam sinyalleri istenerek kontrol edilir. Eğer sistemde bir hata teşhis edilirse, sistem güvenli duruma getirilir [15].



Şekil 3.9. Merkezi İşlem Ünitesi Gösterimi [15]

#### **3.7.4. Haberleşme İşlemcisi Modülü**

Haberleşme modülünde veri aktarımı çeşitli protokoller yoluyla sağlanır.



**Şekil 3.10.** Haberleşme İşlemcisi Modülü Gösterimi [15]

#### **3.7.5. Giriş ve Çıkış Modülleri**

Dijital giriş modülü, dijital çıkış modülü, analog giriş modülü olarak üç adettir.

#### **3.7.6. Dijital Giriş Modülü**

Dijital girişler modülü, anahtarların bağlantılarından ve iki adet tel giriş şekilli yaklaşma anahtarlarından gelen sinyalleri CPU'nun dahili sinyal seviyesine uyarlar [52].

#### **3.7.7. Dijital Çıkış Modülü**

Dijital çıkış modülleri CPU'nun dahili sinyal seviyesini dijital işlem sinyaline, manyetik vanaların bağlantılarına, kontaktörlere, küçük motorlara, lambalara ve motor marşlarına dönüştürür [51].

#### **3.7.8. Analog Giriş Modülü**

Analog giriş modülleri gerilim ve akım sensörleri, ısı çift, rezistans ve rezistanslı termometre bağlantılarından gelen analog işleme sinyallerini dijital olarak çalışan CPU'ya uyarlar [16].

### **3.8. Ana Terminal Birimi**

Ana terminal birimi, scada sisteminde yaygın bir alana yayılmış RTU'ların uyumlu çalışması, RTU'lardaki bilgilerin yorumlanması, sunulması ve ayrıca kullanıcıların isteklerini RTU'lara göndererek kumandanın sağlanması işlevlerini scada sisteminde merkezi sistem birimi yapar. Merkezi bilgisayar RTU'lardan gelen doneleri sistem üzerinden alınan uyarıları, istenilen bilgileri saklar. Merkezi yazılım bu doneleri değerlendirir. Scada sistemlerinde merkezi bilgisayar aracılığı ile RTU'lardan ve sistemin başka parçalarından gelen bilgileri gerektiğinde, raporlar çıktı olarak sunulabilir. [17,51].

#### **3.8.1. Bilgisayar Terminalleri**

Bilgisayar Terminalleri sistemi takip eder. Ekranlar ile dinamik işletme noktası kesici, ayırıcı, motor, vana, ölçü noktası devamlı kontrol eder [51].

#### **3.8.2. Yazıcılar**

Durum ve arızaları raporlar.

#### **3.8.3. İletişim Sistemi**

İletişim ağı LAN, WAN olarak üç adettir.

#### **3.8.4. İletişim Ağı**

İletim ağı olarak, scada sisteminin hızını kontrol eden en önemli kısımdır. Kontrolü yapılan sistemlerin çeşitli otomasyon seviyelerinde birbiri ile ilişkili birimleri arasındaki veri transferi ve güncelleştirilmesini sağlayan tüm işlemler iletişim ağları üzerinden yapılır. SCADA uygulamalarında haberleşmenin çok önemlidir [15,54].

#### **3.8.5. LAN**

Boyutu küçüktür. Eğer scada sistemlerinde ana terminal ile yerel terminal birimleri küçük bir alan içerisinde ise iletişim bağlantısı yerel alan ağı şeklinde olur.

### **3.8.6. WAN**

Yerel alan ağı bir ortam ile sınırlıdır. Halbuki birbirine bağlar. Birimler birbirinden coğrafi durumda iletişim bağlantısı bu ağ türüne dönüşür. Wan, birbirinden çok uzak olan sistemleri olarak uzak mesafelerde bulunuyorsa bu Wan ve Lan sistemleri scada kontrol sisteminde geniş bir alana yayılmış birden fazla operatör istasyonunun birbirine bağlanması ve işletmeye ait tüm verilerin transferi için kullanılır [15].

### **3.8.7. İletişim Ortamlar**

İletim ortamı, scada sistemlerinde merkez ile RTU'lar arasındaki ve RTU'ların kendi içinde iletişim için kullanılan özel kablo hatları, fiber optik kablolar, telefon hatları, telsiz ve uydu hatlardır. Yerel alan ağlarında ethernet en yaygın olanıdır [51].

### **3.8.8. Modülasyon**

Modülasyon veri sinyalinin istenilen yapıya dönüştürülmesidir. Modülasyonda amaç iletilmesi gereken veri sinyalinde meydana gelen değişikliklerin taşıyıcı sinyali şekillendirmesini sağlamaktır. Bu şekilde iletilmesi gerekli veri sinyali, taşıyıcı sinyal üzerinde ifade edilir. Scada sistemlerinde kullanılan modülasyonlar: Genlik Modülasyonu, iletim zorlukları ve gürültü hassasiyetinden ötürü pek tercih edilmez. Frekans Modülasyonu, en genel frekans modülasyonu 3kHz bant genişliği içinde dört frekansı kullanılan frekans kaydırmalı anahtarlamadır [64,66].

### **3.8.9. Modemler**

Sayısal veriyi analog iletişim ortamına modüle ederek aktarır. Asenkron ve senkron modem olarak iki çeşittir. Asenkron modem, aynı anda veri alışverişi gerçekleştiremezler. Asenkron modemler iletilen tarafında modüle edilen yaklaşık olarak aynı orandaki veriyi alıcının demodüle etmesi için her veri sonunda farklı zaman kaynakları kullanır. Mesajı küçük parçalara ya da karakterlere bölmeye veri mesajı çok sık senkronize edilir. Bu hızlı senkronizasyonun nerede talep edilirse kısa mesajlar için daha uygundur. Verimleri yüksektir [77,79].

### 3.9. Kontrol Üniteleri

İşletme ve yönetim seviyesine kadar tüm veri ve bilgileri yüksek hızlarda işleyecek bir yapıdadır. Kontrol alt birimlerine, işletme ünitelerine, çalışma sahasına ait malzemeler ve detektörlere vasıtası ile gerekli bilgi alışverişini sağlar [24].

#### 3.9.1. Programlanabilir Lojik Denetleyiciler

Programlanabilir Lojik Denetleyiciler, ikili ve üst denetimsel kontrolü sağlayan mikroşlemci tabanlı elektronik ünitelerdir. Bu üniteler, kontrol sisteminde tek veya entegre bir işlem istasyonu olarak farklı programlanabilir elektronik üniteler ile haberleşme ağı üzerinden iletişim kurarak kullanılır. PLC'ler, biriken bilgi ve verileri bir yandan scada sistemine iletirken bir yandan da işletme görevlerini yapmak için yazılım programlarına uygun olarak lojik kontrolleri sağlar. Genel bir kontrol modülü yapısı şu parçalardan oluşur [50,77]:

- **Güç Kartı:** Kontrol modülünün ve I/O kartlarının güç ihtiyacını sağlar.
- **Uzak Giriş veya Çıkış Kartı:** İletişim ağını bağlı diğer sistem elemanları ile haberleşmesini sağlar. Uzaktan kumanda I/O üniteleri, programlanabilir elektronik denetleyiciler ile yüksek hızlı seri haberleşme ağı ile iletişimi sağlar. Uzaktan I/O üniteleri sayesinde programlanabilir elektronik denetleyicilere bağlanan işletme değişkenleri, sistemde bulunan, aynen lokal şekilde bağlı değişkenlere benzer. Haberleşme ağının yüksek performansı, seri iletişimden kaynaklanan gecikmeleri önemsizleştirir [12].
- **Random Access Memory:** Gerçek zaman doneleri ve denetim parametrelerini kaydetmek için RAM kullanılır.
- **Read Only Memory:** Denetim algoritmaları ve sürekli olarak saklanması gerekli bilgileri kaydedilir.
- **A/D Çevirici ve Çoklayıcı:** Kontrol edilen süreç değişkenlerinin mikro kontrolöre verilebilmesi için gerekli olan analogdan sayısala çevirir. Çoklayıcı kullanımı ile aynı anda birden fazla kanaldan done girişini gerçekleştirir [86].
- **Yerel Giriş/Çıkış Kartı:** Programlanabilir elektronik denetleyici, lokal analog/dijital sinyal giriş ve çıkışlar için fazla sayıda sinyal toplama kartı içerir I/O kartları, saha cihaz ve detektörlerine doğrudan bağlanabildiği gibi, kontrol panosunda bulunan alçak gerilim cihazlarına da bağlanabilirler. Saha



cihazlarına I/O kartları ile bağlantıları için 0-10V veya 4-20mA sinyal kabloları kullanılır. Analog değerler otomatik olarak proses veya iletişim ilişkili verilere dönüştürülür [81].

- **Merkez İşlem Ünitesi:** Yüksek performanslıdır. Sistemin yazılımı, istenen fonksiyonel konfigürasyonu oluşturmak üzere ana kartlardaki salt okunur bellek modüllerinde depolanır. Uygulama programları ise RAM bellekte toplanır. Programlanabilir elektronik üniteleri sistem yazılımı, bir gerçek-zamanlı işletme sistemi ve uygulama parçalarından oluşur. Bu ünitelerin programları, öncelikli olarak çevrimlidir. Çevrim süreleri on msn ile iki saniye arasında seçilebilir [24,81].

### **3.9.2. Elektrik Güç Dağıtım Panoları**

Elektrikli güç dağıtım panoları, scada kontrol sistemlerinde alçak gerilim cihazları, elektronik kontrol ünitelerinin montajı bu panolara yapılır. Bunlar kontaktörler, röleler, sigortalar ve benzeri elemanları içerir [81].

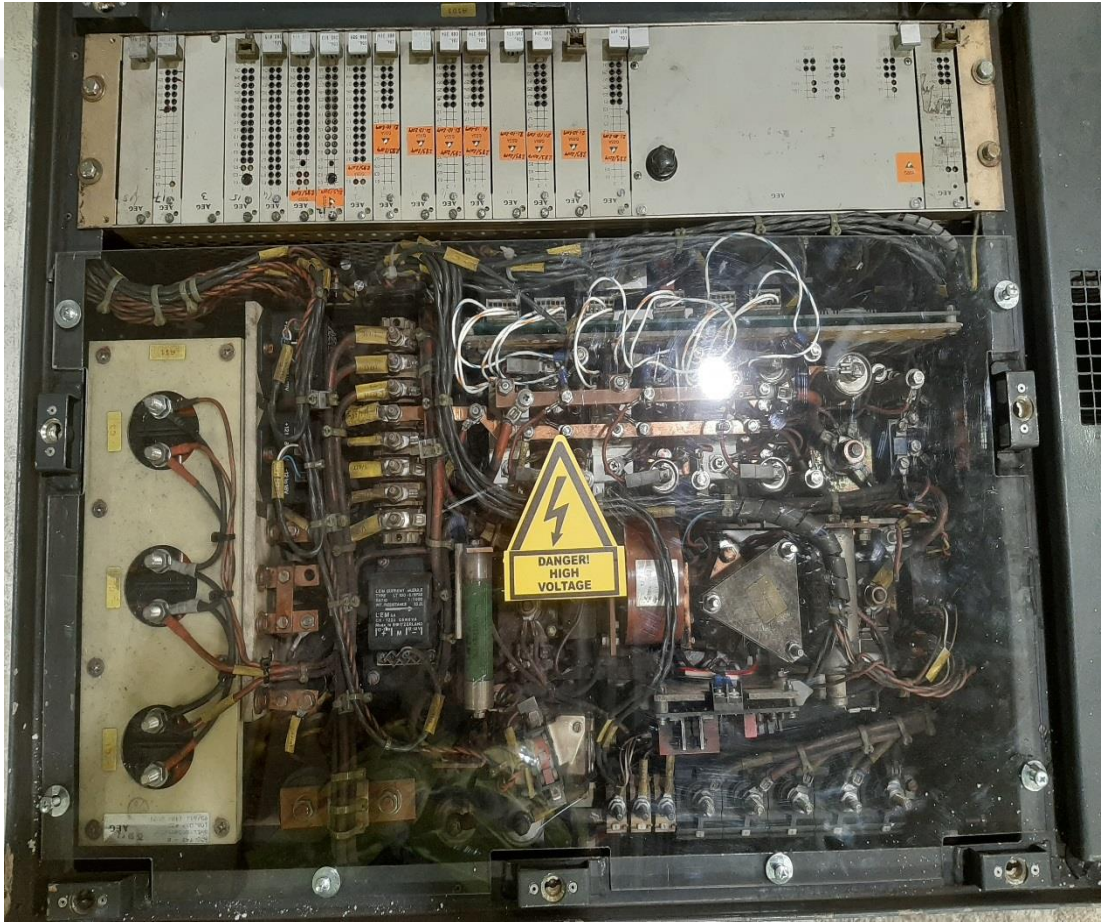
### **3.9.3. Saha Elemanları**

Saha, süreç ve işletmeye ait verilerin toplandığı scada kontrol sistemlerinin en alt seviyesidir. Fiziksel ve elektronik iletişim cihazlardır, işletme için gerekli lokal denetleyicilerdir. Fiziksel çevrenin doneleri bu seviyede elektrik/elektronik işaretlerine çevrilir ve scada sistemine girerler. Baktığımızda aslında scada sisteminden verilen komutlar ile bu seviyede elektrik/elektronik işaretlerden fiziksel büyüklüklere çevrilir ve gerçek dünyada istenen hareketler kesicilerin çalışması, motorların start-stop edilmesi ve benzeri işleri yapar. Programlanabilir. Bir de programlanabilir kontrol ünitelerinin yazılım kısmı vardır. Kontrol edilen sistemde en önemli özellik elektronik kontrol ünitelerinin sistemin görevlerine göre programlanabilmesidir [11,20].

### **3.9.4. Yardımcı Güç Sistemleri**

Yardımcı güç sistemleri açısından bakıldığında, raylı ulaşım tesislerinde araçları hareket ettiren sistemler haricinde elektrikli birçok ünite vardır. Bunlar yardımcı güç sistemi yüklerini oluşturur. Yardımcı güç sisteminin amacı, cer gücü haricindeki

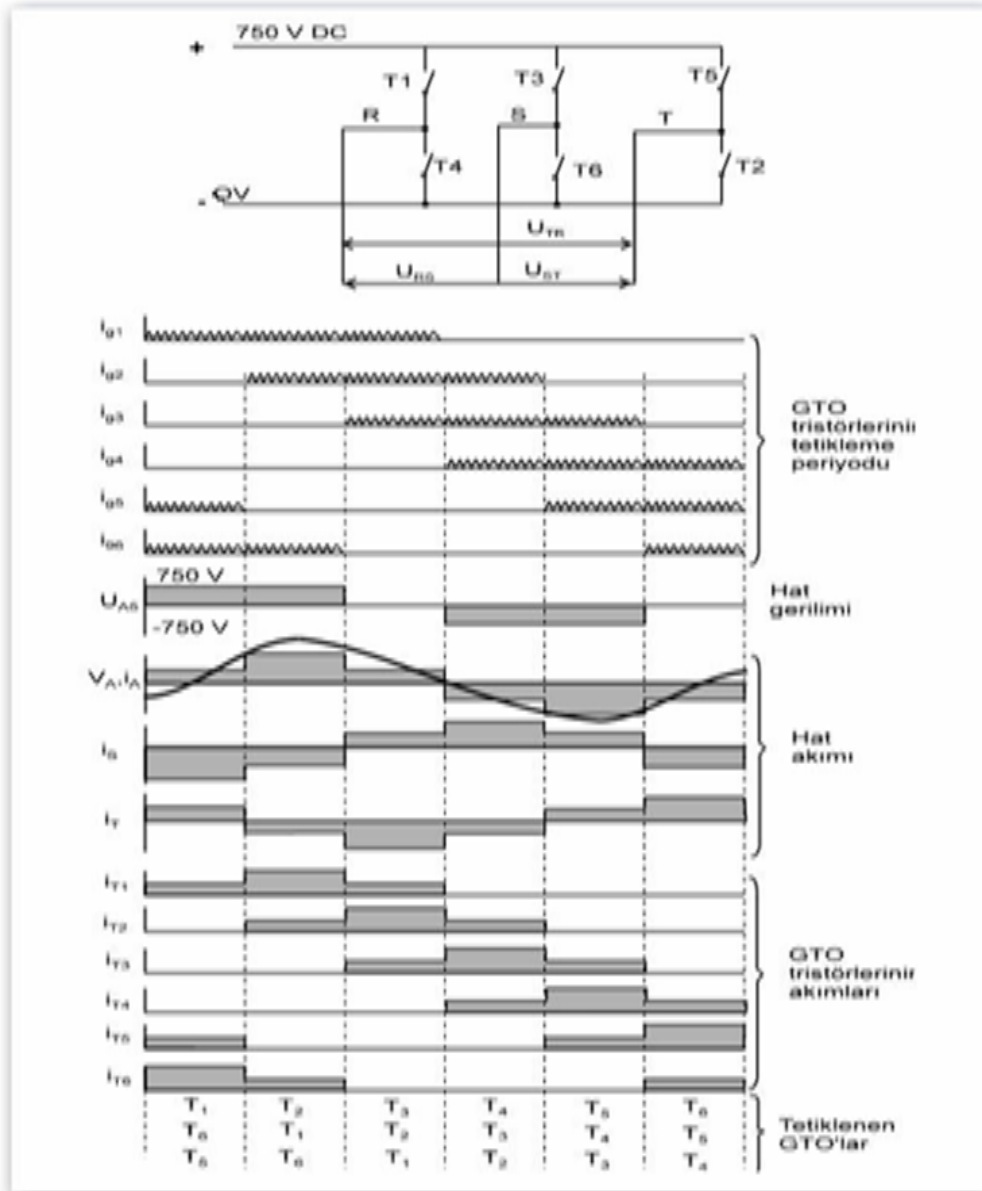
araçtaki yolcu konforu için kullanılan ısıtma ve soğutma, aydınlatma, sürücü kabin sistemlerine ve 24V doğru akım gerilim devresine enerji sağlamaktır. İhtiyaç duyulan enerji kataner sistemi ya da üçüncü metro veya raydan temin edilmektedir. Sistem girişindeki doğru akım veya alternatif akım dönüştürücüyle alternatif akım gerilime çevrilmekte ve üç fazlı transformatörlerden 3x380V, 50Hz'lik gerilime dönüştürülerek bağlı bulunan yükleri beslemektedir [25]. Aşağıdaki şekilde Ankaray Hafif Metro aracına ait yardımcı güç ünitesi verilmiştir.



Şekil 3.11. Ankaray Hafif Metro ya ait yardımcı güç ünitesi

### 3.9.5. Evirici Ünitesi

Şekilde eviricinin tetikleme devresi ve gerilim akım şemaları gösterilmiştir. Evirici devresi altı adet GTO tristörden meydana gelmiş üç fazlı köprü devresidir. GTO tristör devresi darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilmektedir [20].



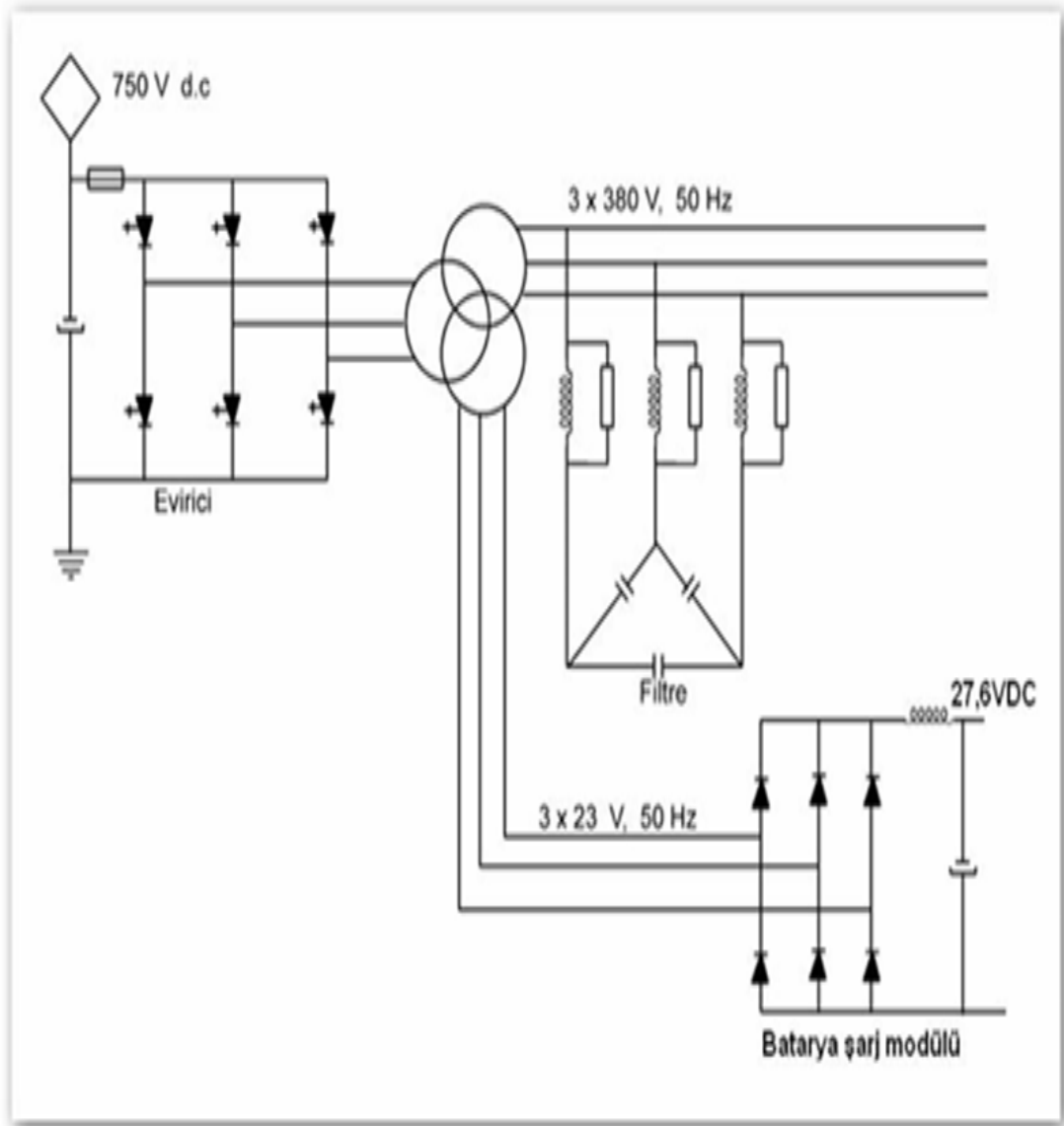
Şekil 3.12. Üç Fazlı Evirici Köprü Devresi Gösterimi [20]

Değişim frekansı 450 Hz'dir. Darbelerin modülasyonu sırasında 50 Hz'lik frekans elde edilir. Giriş doğru akım gerilimi 500 V ile 900 V arasında değişir. Buna rağmen üç fazlı çıkış gerilimi küçük değişimler gösterir [60].

Genel olarak bakıldığında, eviricinin çıkışı 3x380V'luk alternatif akım gerilime dönüştürülür. Alternatif Akım çıkış gerilimi sabit genlikli bir sinüs dalgasıdır.

### **3.9.6. Üç Fazlı Transformatör Ünitesi ve Filtre Devre**

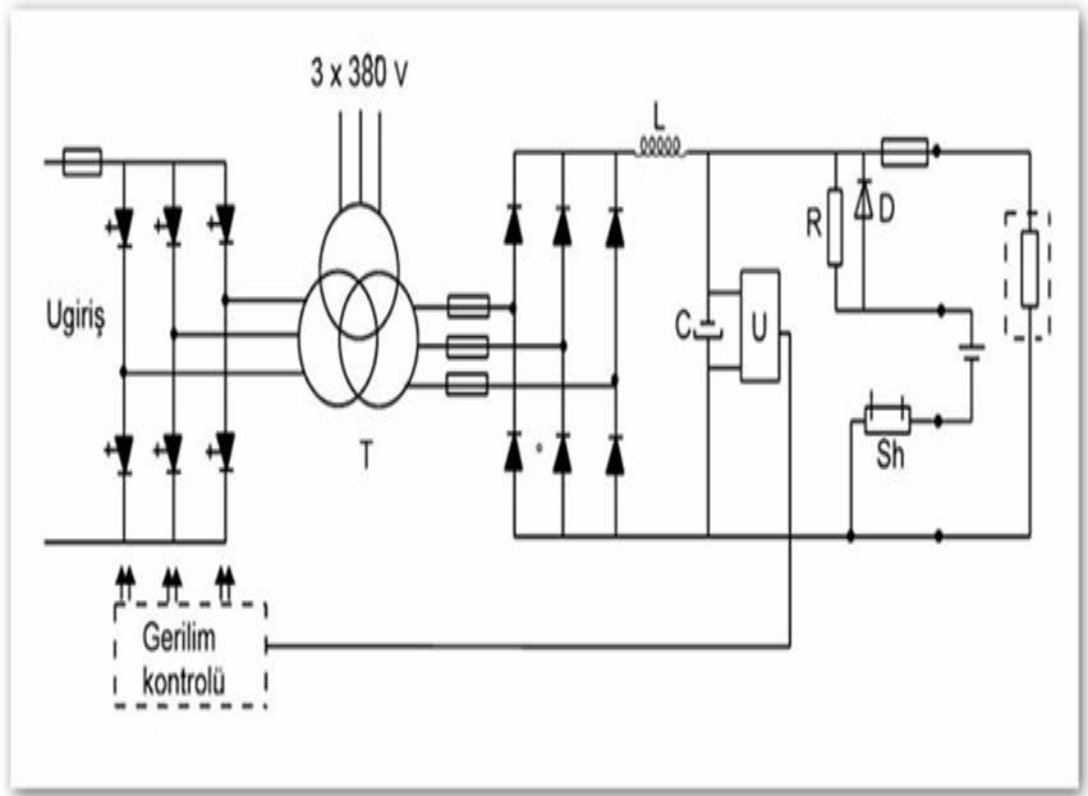
Statik eviriciden alınan çıkış gerilimi 3x380V alternatif akım, 50 Hz'dir. Bu üç fazlı alternatif akım gerilim yüke doğrudan uygulanmaz. Önce üç fazlı transformatörle dönüştürülür. Transformatörün iki sekonder sargısı vardır. Bunlardan biri çıkış gerilimi 3x380 V, diğerinin gerilimi 3x23 V'dur. Bakıldığında, 3x380V'luk çıkış terminalinde bir tane çift kombineli filtre vardır. Birinci filtre eviriciden gelen yüksek frekanslı harmonikleri filtre etmek için kullanılır. İkincisi reaktif güç üretmek için kullanılır [20,66].



**Şekil 3.13.** Yardımcı Güç Ünitesi Açık Devresinin Gösterimi [62]

### 3.9.7. Batarya Şarj Ünitesi

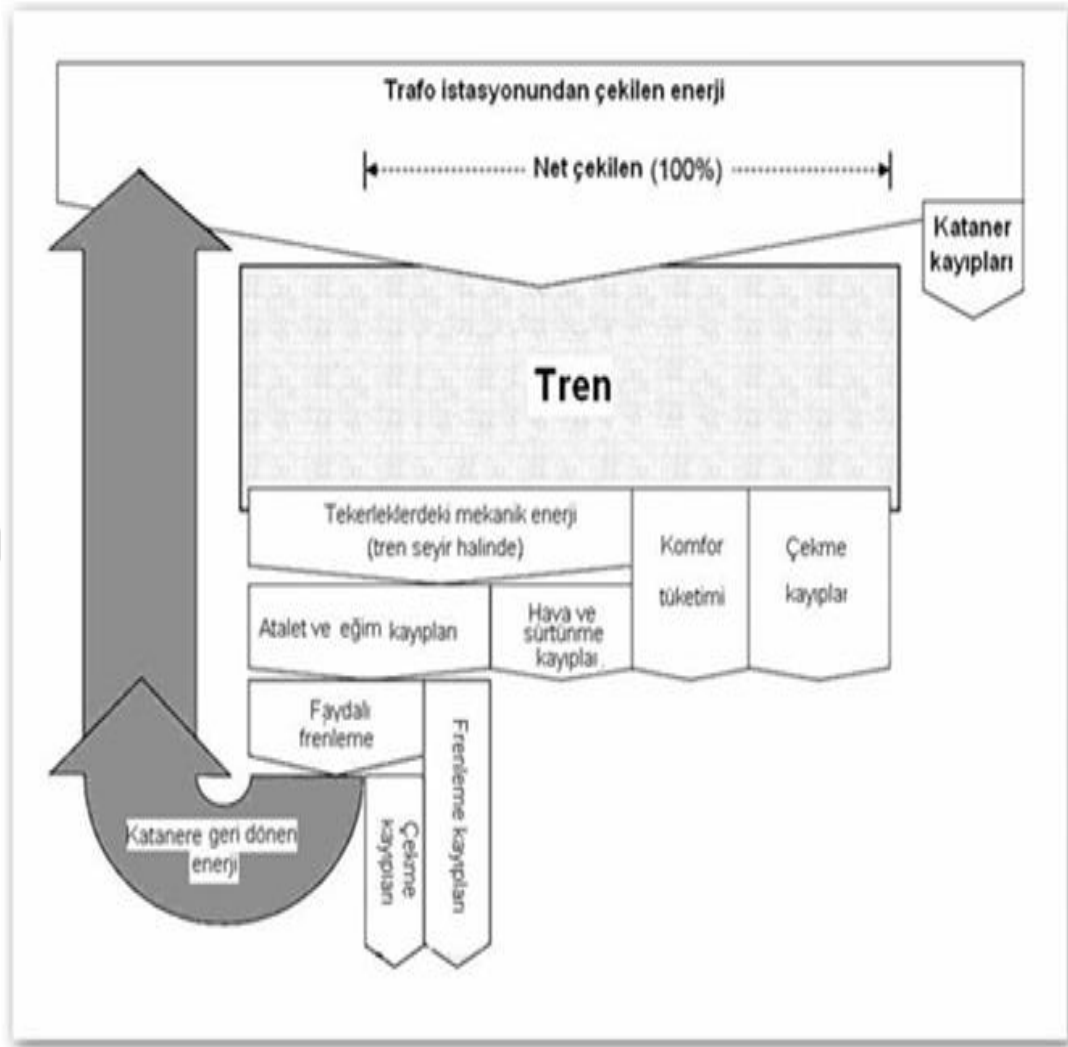
Bakıldığında, batarya şarj ünitesi açısından baktığımızda, 4V'luk batarya şarj ünitesi transformatörün sekonder sargısından sağlanan 3x23V'luk alternatif akım gerilimle bir batarya şarj ünitesi olan altı diyottan oluşmuş doğrultucu köprüsüyle doğrultulur. Köprünün çıkışı 24V'luk yükleri doğrudan besler. Batarya, doğrultucu köprü ile akım sınırlayıcı dirençten geçerek bağlanmıştır. Ünitenin kontrol sistemi doğrultucunun çıkış gerilimini 27,6 V'ta sabit kılacak şekilde tasarlanmıştır.[25].



Şekil 3.14. Batarya Şarj Ünitesinin Gösterimi [25]

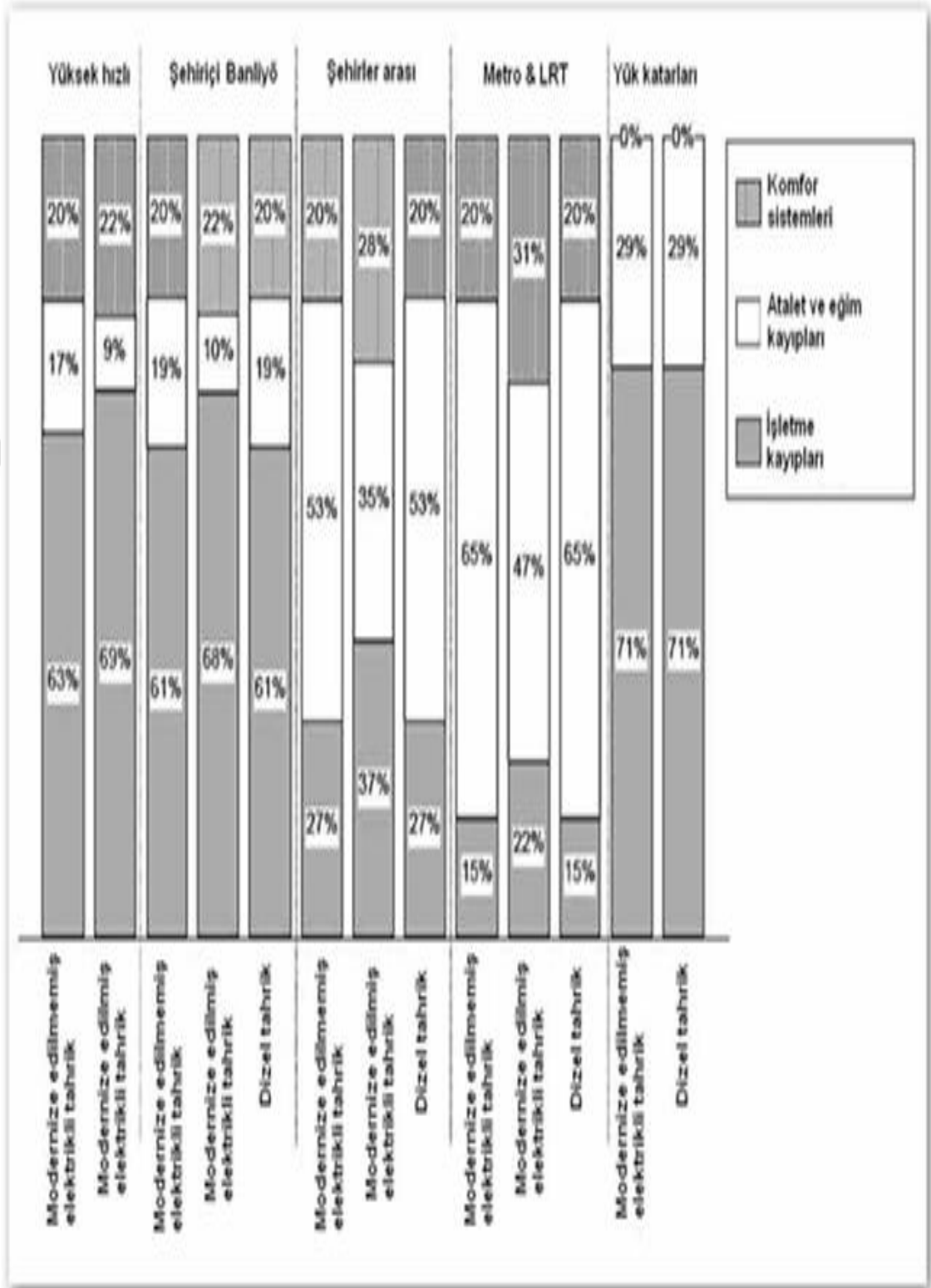
### 3.9.8.Faydalı Frenleme ve Enerji Geri Kazanımı

Bir trenin hızlanabilmesi için enerji kullanması gerekir. Araç şebekeden gelen enerjiyi kütlesinde kinetik ve potansiyel enerji olarak depolar. Elektrik motoru ile tahrik edilen araçlarda bu enerjinin büyük bir miktarı aracın frenlemesi anında motorun jeneratör olarak çalıştırılması ile tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür. Elektrik enerjisi, enerji dönüşüm çevrimi ters yönde çalıştırılarak geri kazanılabilir. Bu yöntem faydalı frenleme olarak bilinmekte ve demiryollarında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır [72].



**Şekil 3.15.** Bir Yolcu Treninde Kullanılan Enerjinin Dağılımının Şematik Gösterimi [72]

Bununla birlikte, dinamik frenleme kullanımı elektriğe geri dönüştürülen enerjinin tasarruf edildiği anlamına da gelmez. Dizel elektrik trenlerde yaygın bir şekilde kullanılan dinamik frenlemenin amacı mekanik frenlerin ömrünü uzatmak, bakım maliyetlerini düşürmektir. Bu yolla geri kazanılan elektrik enerjisi ise frenleme dirençlerinde ısıya dönüştürülmektedir [10].



Şekil 3.16. Değişik Tip Demiryolu Sistemlerinde Enerji Tüketim Dağılımı [8]

Şekilde de görüleceği üzere; faydalı frenleme ile enerji kazanımının durma frekansı yüksek olan kısa mesafeli metro raylı sistemlerde çok daha etkin olduğu



görülmektedir. Öte yandan, faydalı frenleme yüksek hızlı metro veya tren işletmeciliğinde de enerji verimliliğini artırıcı önemli bir potansiyele sahiptir. Birçok ülkede faydalı frenleme tekniği kullanılmakla birlikte, geri kazanılan enerji oranı kullanılabilir kısma göre oldukça küçük gerçekleşmektedir. Bunun birkaç nedeni vardır [4]:

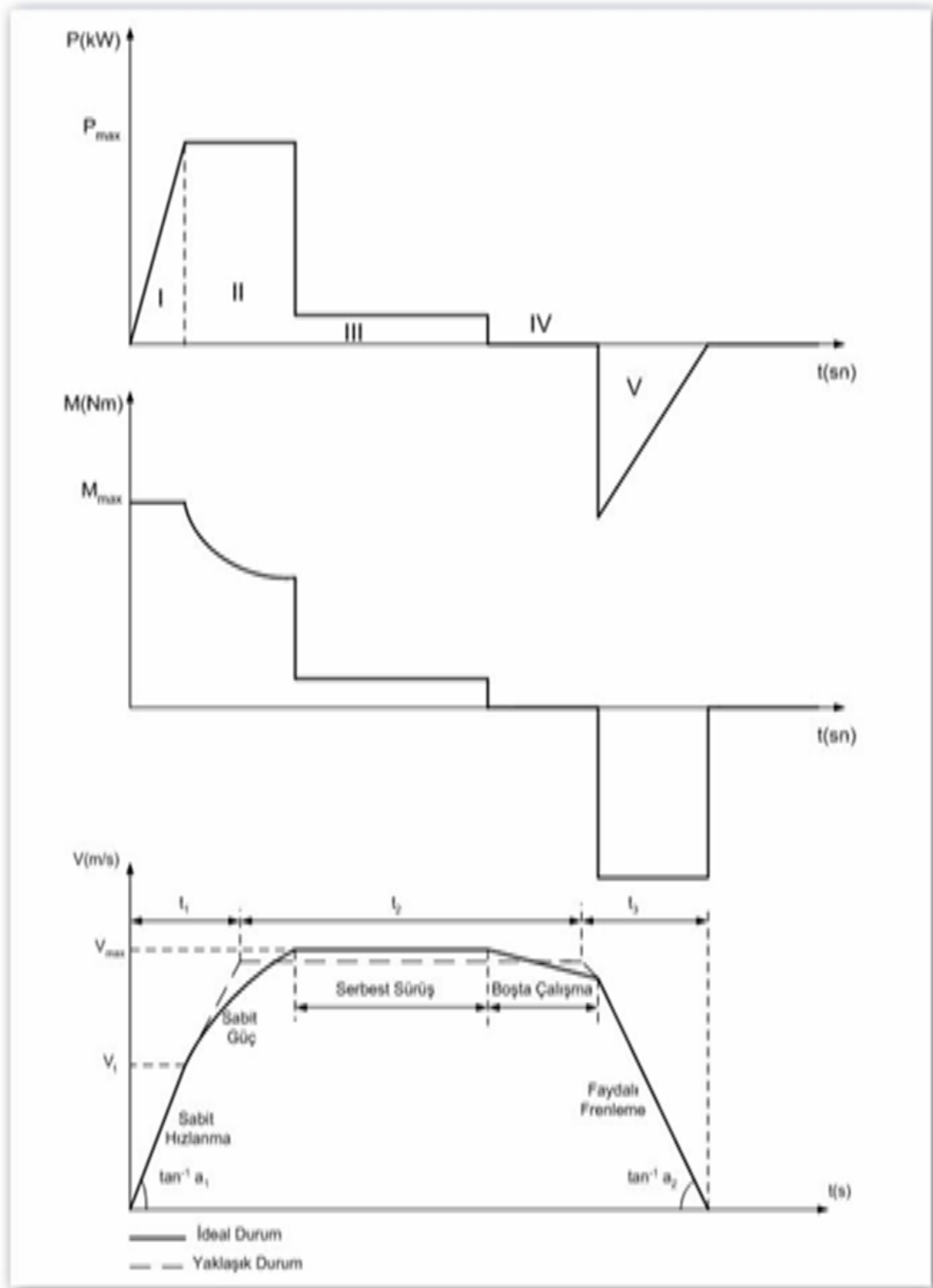
- **Enerjinin geri kazanım verimi:** Frenleme anında sahip olunan enerjinin tamamı dönü tüm kayıpları nedeniyle kazanılamaz. Faydalı frenleme enerji kazanım verimi ivmelenme veriminin yaklaşık %90'ı kadardır [55].
- **Kataner hattının enerji soğurma kabiliyeti:** Enerji geri kazanımı ancak hattın aynı bölümü üzerinde hatta verilen enerjiyi kullanabilecek başka bir trenin var olması durumunda gerçekleşebilir. Bu durumun olasılığı trafik yoğunluğuna ve muhtemel iletim mesafesine bağlıdır [55].
- **Frenleme gücü:** Çoğu zaman aracı durdurabilmek için sadece dinamik frenlemeyi kullanmak yeterli olmaz. Özellikle yük katarlarında treni tamamen durdurmak için mekanik frenler de kullanılır [26].

**Tablo 3.4.** DC Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Depolama Sistemleri ve Faydalı Frenleme Enerji Kazanımı [26]

	Teorik Olarak Geri Kazanılabilir Frenleme Enerjisi Miktarı	İvmeleme Kuvveti Düzeltme Çarpanı	Karışık Frenleme (Meka./Elekte. Düzeltme Çarpanı	Yeni Enerji Depolama Sistemleri Kullanılması Durumunda Potansiyel Kazanım	Frenleme Enerjisinin Katanere Aktarılma Durumunda Düzeltme Çarpanı	Yeni Depolama Teknolojileri Kullanılmadığı Durumda Potansiyel Kazanım
Ana hatlar	15%	0,9	0,8	11%	0,2	2%
Şehirler arası hatlar	35%	0,9	0,8	25%	0,4	10%
Şehir içi hatlar	45%	0,9	0,8	30%	0,5	16%
Yük katarı hatları	20%	0,9	0,5	14%	0,2	3%

Yukarıdaki tabloda da görüleceği gibi; farklı tip doğru akım demiryolu ulaşım sistemlerinin ilave enerji depolama sistemleri ile donatılmaları durumunda, geri kazanılabilir frenleme enerji oranlarının en çok kısa mesafeli ve sık duruş yapan metro gibi kent içi ulaşım sistemlerinde artırılabilirliğini göstermektedir. Şehir içi

raylı ulaşım sistemlerinde teorik olarak hesaplanan potansiyel frenleme enerji miktarı aracın tükettiği toplam enerjinin yaklaşık %45'i kadardır. Kayıplardan sonra bu değer enerji depolama sistemleri kullanılması durumunda %30 olarak hesaplanmaktadır. Fakat uygulamada faydalı frenleme ile elde edilen enerji hatta geri verilmektedir. Bu şekilde kazanılan enerji ise toplam potansiyelin %16'sı kadar hesaplanmaktadır. Gerek metrolarda gerekse de trenlerde, frenleme esnasında karşı yönde aynı besleme noktasından enerjisini sağlayan başka bir araç ivmelenme durumundaysa dinamik frenleme esnasında üretilen ve hatta verilen enerji gerçekten geri kazanılmış olur. Bu enerji karşı yöndeki araç tarafından kullanılması mümkündür. Bu yüzden raylı sistem işletmecileri, araçlarda herhangi bir depolama sistem için yatırım yapmadan önce, trafik ve işletmeyi düzenleyerek azami verimli koşulları sağlayabilecek tedbirleri almaya çalışırlar. Frenleme esnasında açığa çıkan enerjiyi kullanabilecek başka bir tren o anda yoksa hatta basılan enerji, hat geriliminin yükselmesine neden olur. Hat gerilimi aracın izin verilen işletme değerlerini aştığı durumda araç hat gerilimi ölçü ve kontrol sistemi aşırı yükselen hat geriliminin tesise zarar vermemesi için bu gerilimi aracın frenleme dirençleri üzerinde harcar. Bu takdirde frenleme esnasında kinetik enerji son haliyle ısı enerjisine dönüştürülmüş olur [7].



**Şekil 3.17.** DC Raylı Sistem Araçların Bir Hızlanma Frenleme Periyodunda Sahip Oldukları Güç Moment Hız Değişimlerinin Gösterimi [7]

Yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere, doğru akım raylı ulaşım sistemlerinde araçların iki istasyon arasında hareketi neticesinde elde edilen tahrik yapısını

göstermektedir. Araçlar (I) ile gösterilen bölgede sabit moment ile hızlanmakta, (II) bölgesinde ise eşik hızı denilen yaklaşık 37–40 km/s aşmak için alan zayıflama bölgesinde hızlanmaya devam etmektedir. (III) bölgesinde ise sabit hızla yol almakta, (IV) bölgesinde serbest sürüş haline geçmekte, son olarak (V) ile fren yapmakta ve istasyonda durmaktadır [7].



#### 4. RAYLI SİSTEMLERDE FRENLEME

Raylı sistemlerde frenleme konusuna baktığımızda, elektrikli raylı ulaşım sistemlerinin genel yapısı, sistemlerde kullanılan gerilim seviyeleri, enerji iletim ve cer gücü sistemleri, frenleme çeşitleri ile rejeneratif frenlemenin oluşumu anlatılacaktır [7].

##### 4.1. Elektrikli Raylı Sistemlerde Kullanılan Gerilim Seviyeleri

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde enerji maliyetlerini ve enerji kayıplarını azaltmak için çeşitli gerilim seviyeleri kullanılmıştır. Şehirlerarası ulaşım sistemlerinde alternatif akım sistemler kullanılırken, şehir içi ulaşım sistemlerinde doğru akım gerilimler kullanılmıştır. Tabloda da görüleceği üzere, EN-50163 Avrupa Standardında elektrikli demiryolları besleme gerilimleri ve bunların işletimsel limitleri tanımlanmıştır.

**Tablo 4.1.** EN-50163’de Belirtilen Besleme Gerilimleri [60]

Gerilim Seviyesi	$U_N$ (V)	$U_{MINI}$ (V)	$U_{MAXI}$ (V)
600 VDC	600	400	720
750 VDC	750	500	900
1500 VDC	1500	1000	1800
3000 VDC	3000	2000	3600
15 kV AC, 16,66Hz	15000	12000	17250
25 kV AC, 50 Hz	25000	19000	27500

$U_N$ : Nominal gerilim

$U_{MINI}$  (V): En küçük süreksiz gerilim

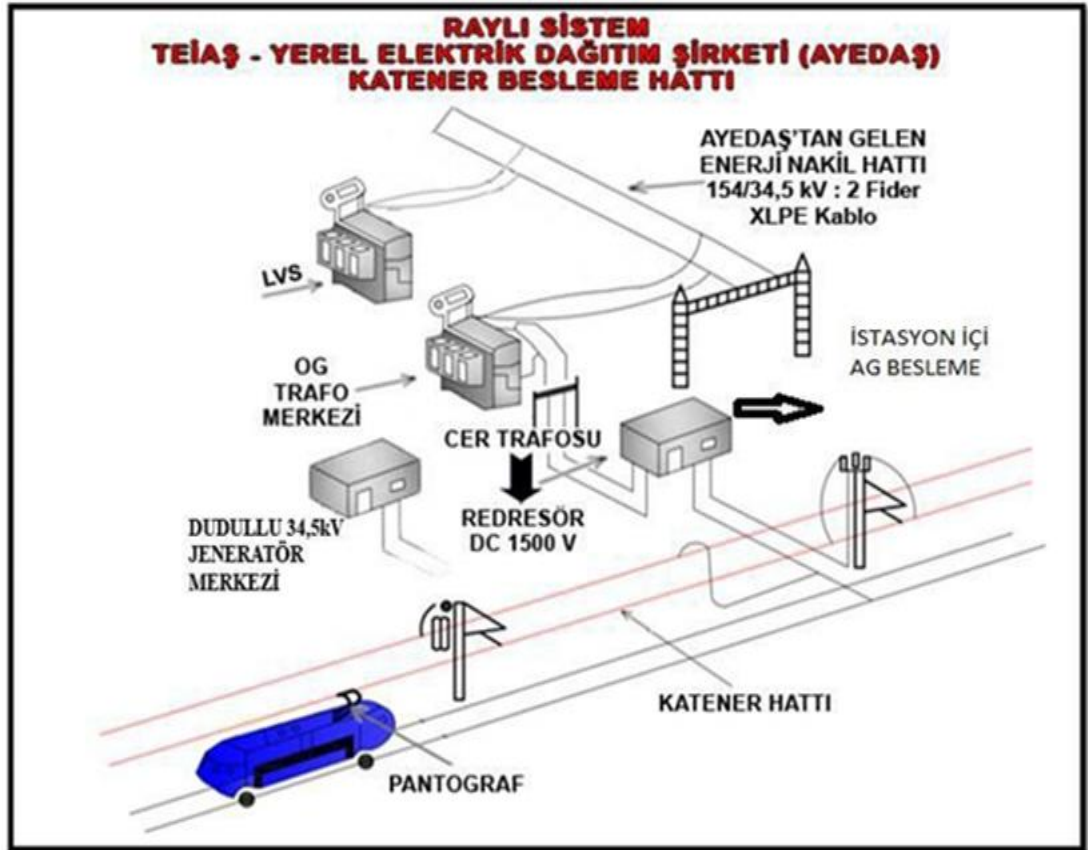
$U_{MAXI}$  (V): En büyük sürekli gerilim

Baktığımızda, şehir içi raylı ulaşım sistemlerinde genellikle 750V doğru akım enerji seviyesi kullanılmaktadır. Ancak, gün geçtikçe artan yolcu kapasitesi nedeniyle motorlu araçların sayısı artmış ve dolayısıyla güç tüketimi de artmıştır. Bu sebeple yeni yapılan hatlarda 1500V doğru akım gerilim seviyesi kullanılmaya başlanmıştır [60,86].

#### 4.2. Raylı Ulaşım Sistemlerinin Elektriksel Besleme Sistemleri

Raylı ulaşım sistemlerinin elektriksel besleme sistemlerine bakıldığında, raylı sistemlerde kullanılan enerji iletim sistemi gösterilmiştir. Bölgesel Elektrik Dağıtım firmasından alınan enerji istasyonlarda OG trafo merkezinden sonra cer trafosuna ve iç ihtiyaç trafosuna dağıtılır [60].

Raylı ulaşım sistemlerinin elektriksel besleme sistemleri açısından cer bakıldığında trafoları araçların iletim gücünü sağlamak için, iç ihtiyaç trafoları ise istasyon içi enerji ihtiyacını karşılamak üzere kullanılır. İç ihtiyaç trafolarında, istasyonda bulunan aydınlatma, yürüyen merdiven, asansör, havalandırma sistemlerinin enerji ihtiyacı karşılanır. Cer yani çekiş gücü sistemlerinde trafolarında araçların besleme seviyesine düşürülen AC elektrik enerjisi, redresörler vasıtasıyla doğru akım gerilime çevrilerek araçlarda kullanılmak üzere kataner hattına iletilir. Araçlar üzerlerinde bulunan pantograflar vasıtasıyla bu enerjiyi kullanarak cer motorlarının aracı hareket ettirmesi sağlanır [84].



Şekil 4.1. Raylı sistemlerde Enerji İletimi [63]

#### 4.2.1. Araç İçi Elektriksel Yapı

Genel olarak bakıldığında araç içi elektriksel yapının, elektriksel olarak raylı ulaşım araçlarında iki ana bölüm bulunmaktadır [30]:

- Cer yani çekiş gücü sistemlerinde tahrik sistemleri
- Yardımcı Tesisler

#### 4.2.2. Cer-Tahrik Sistemleri

- **Enerji İletimi:** İstasyonlarda CER merkezlerinde indirilen ve redresörler ile doğrultulan elektrik enerjisi üç yöntemle araçlara iletilir. Bu yöntemler aşağıda sırasıyla açıklanmıştır [29].
- **Üçüncü Ray Sistemi:** Üçüncü ray sistemi trenin gittiği raylardan hariç olarak diğer rayların yanına ayrı bir enerji hattı çekilerek yapılır Tren enerjisini bu üçüncü raydan akım kolektörleri vasıtasıyla alır [84].
- 
- Cer tahrik sistemlerine bakıldığında enerji iletimi ve ray sistemlerinde, cer odalarında diyotlar yardımıyla doğrultulan elektrik enerjisi üçüncü raydan, araçların yanında bulunan akım kolektörleri yardımıyla raydan trene aktarılır bu pabuçlar aracın her iki tarafında da vardır. Aracın hareket etmesi için bu akım pabuçlarından en az birinin üçüncü ray ile temaslı olmalıdır. Aksi halde araç hareket etmez. Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır [61].



Şekil 4.2. Üçüncü Ray Sistemi [28]

**Avantajları** [28],

- Üçüncü rayın kurulum maliyeti havai iletim hatlarına göre daha azdır.
- Üçüncü ray hatları havai hatlar gibi görüntü kirliliği oluşturmaz. Havai hatları oluşturan direk ve kablolar şehirde çirkin bir görüntü oluşturmaktadır.
- Üçüncü ray yönteminde elektrik iletimin sürekliliği havai hatlara göre daha iyidir.
- Havai hatlara erişim iletken raya nazaran daha zordur. Bu da üçüncü rayın bakım ve onarımının daha kolay olmasını sağlar.

**Dezavantajları;** [30]

- Raylara yakın olduğundan güvenlik sorunu vardır. Raya inme durumunda kazalara sebep olabilir.

***Kataner Sistemi:*** Şehir içi veya şehirler arası kullanılan raylı sistemlerde de lokomotiflerin akım alıcı pantografında ve kontak telinde aşınmayı en aza indiren, can ve mal emniyetine zarar vermeden elektrikli vasıtalara elektrik enerjisi sağlayan elektrikli cer hava hatlarıdır.

Genellikle hafif tramvay ve şehirlerarası raylı ulaşım sistemlerinde kullanılır. Standart bir kataner sisteminde iletkenler, direkler, taşıyıcı sistem, izolatörler, besleme sistemi,



ray bağlantıları bulunur. Sistem yapısı gereği üçüncü raya göre daha güvenli bir sistem olan kataner sistemi yüksek gerilim taşıması ve tünellerde daha fazla yer ihtiyacı gibi dezavantajlara sahiptir [31].



Şekil 4.3. Kataner Sistemi [31]

**Rijit Kataner Sistemi:** Rijit kataner, raylı sistemlerde kullanılan bir havai hat elektrikli besleme sistemidir. Rijit kataner sistemi, 750V doğru akım ve 1500V doğru akım hafif raylı ve metro sistemlerinde ve 3kV DC, 15kV AC ve 25kV alternatif akım sistemler içinde kullanılabilir [86].



Şekil 4.4. Rijit Kataner Sistemi [84]

**Avantajları;** [45]

- Rijit Kataner, havai hat olduğundan standart kataner malzemeleri bu sisteminde de kullanılabilir.
- Sağlam ve emniyetlidir. İletken kopma durumu yaşanmaz.
- Tek işleme kontak telinin değiştirilmesi ya da yenilenir.
- Akım taşıma kapasitesi ve kısa devre direnci rijit kataner sisteminde çok daha yüksektir.
- Rijit kataner sistemi için yükseklik olarak çok az bir mesafe gerekir o yüzden tünel inşaat maliyetini düşürmek için uygun bir sistemdir.

**Dezavantajları;** [84]

- İnsan sağlığı açısından daha fazla güvenlik önlemleri gerekir.
- Fazla ekipmanlı olduğundan, maliyeti daha fazladır.

Sürtünmelerden ötürü daha fazla bakım ister bu da maliyeti arttırır.

***Tahrik Sistemi:*** Tahrik sistemlerinde, 750V doğru akım gerilim ile çalışan bir aracın hareketlenmesini sağlayan tahrik sistemine ait blok şema gösterilmiştir. Tahrik sistemi esas itibariyle pantograf, ana izolatör anahtarı, ana devre kesicisi, hat filtresi, doğru akım tahrik motorları, endüvi devresi kısıyıcısı, uyarma alan çevirici ünitesi, motor kontaktları, frenleme direnci, aşırı akım koruyucusundan oluşmaktadır [64].



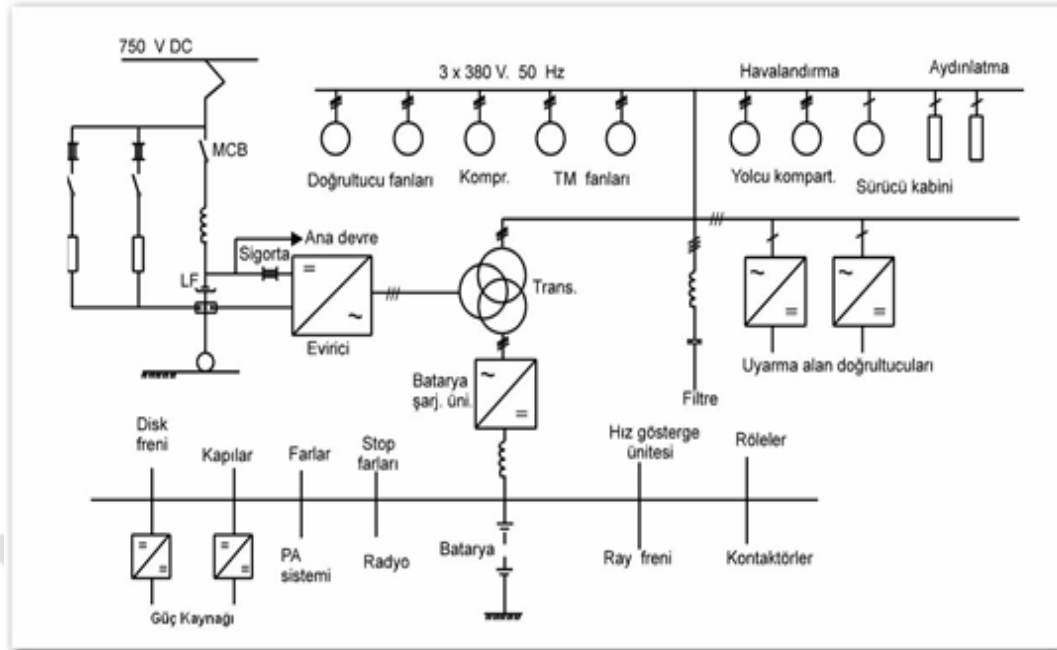
özel olarak projelendirilerek imal edilir, ancak son zamanlarda motor üreticileri bu motorların standartlaştırılması için çalışmalar yaparak çeşitli ulaşım ihtiyaçlarına hizmet verecek cer motor ürünlerini genişletmişlerdir. Her bir araçta iki adet doğru akım motordan oluşan iki adet cer motor modülü vardır. Motorlar armatür devrelerinden birbirlerine seri bağlı olup tek bir doğru akım kıyıcı ile beslenirler. Kıyıcılar hat gerilimini kontrol ederek cer motorlarına iletirler. Kıyıcılar GTO tristör/IGBT ve diyotlardan oluşurlar.

- **Fren Rezistörü:** Aracın elektrodinamik frenleme yaptığı esnada ortaya çıkan rejeneratif frenleme enerjisinin sınır değerine ulaşması durumunda kullanılmayacak olan kısmının ısıya çevrilerek harcanmasını sağlar. Aynı zamanda, aşırı gerilime karşı filtre kapasitörünün deşarj edilmesinde kullanılır [68].

#### 4.2.3. Yardımcı Tesisler

Raylı ulaşım hatlarında bulunan cer (çekiş gücü) sistemlerinde ekipmanlar haricinde birçok elektrikli alt sistem bulunmaktadır. Araçtaki yolcu konforunu sağlamak için kullanılan ısıtma/soğutma, havalandırma, aydınlatma ve 24V doğru akım gerilim devresine enerji sağlayan bu alt sistemler yardımcı güç sistemlerini oluştururlar.

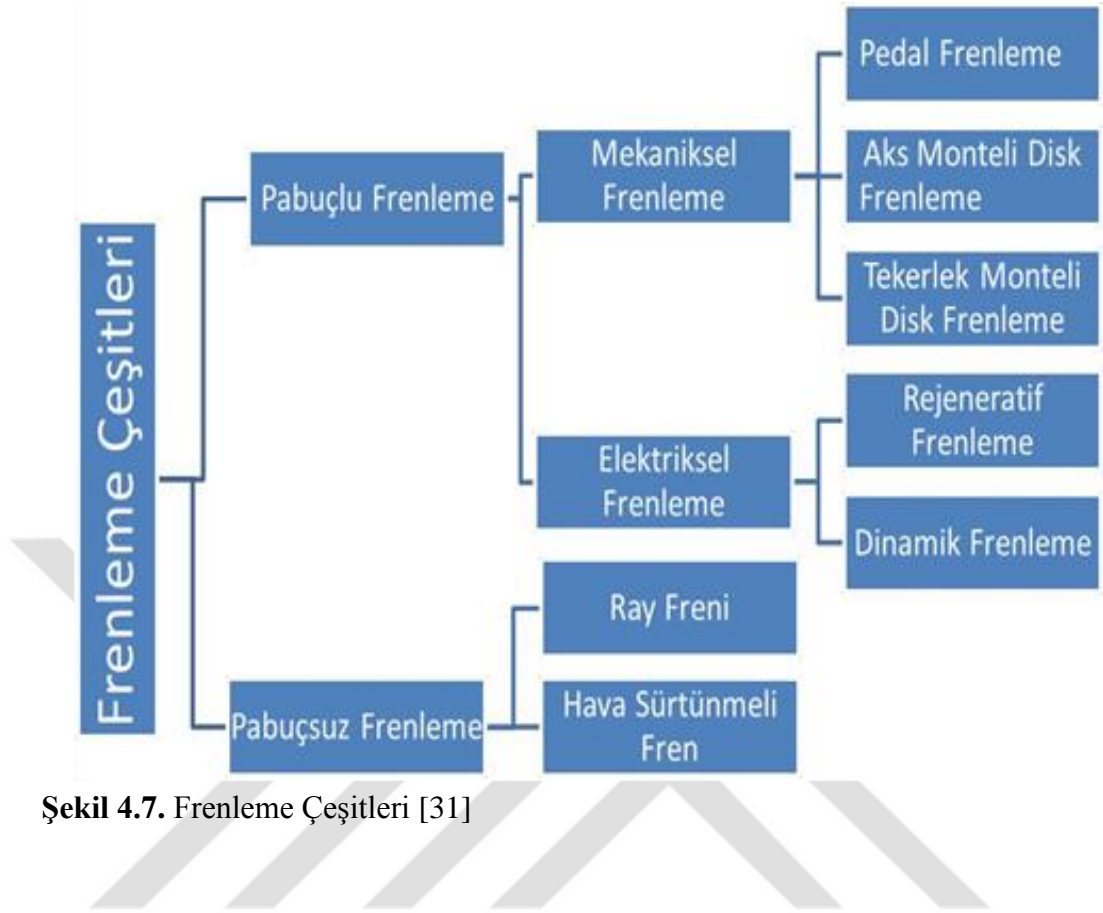
Bakıldığında yardımcı tesisler olarak da adlandırılan, katener ya da üçüncü raydan gelen enerji, sistem girişindeki doğru akımı veya alternatif akım dönüştürücüyle 3x380V, 50Hz lik bir alternatif akım gerilime çevrilerek yardımcı güç sistemleri beslenir [32,55]. Şekilde de görüleceği üzere trende bulunan yardımcı tesislerin şeması gösterilmiştir;



Şekil 4.6. Yardımcı Güç Sistem Şemasının Gösterimi [55]

### 4.3. Raylı Sistemlerde Frenleme Çeşitleri

Raylı ulaşım sistemlerinde frenleme çeşitlerini pabuçlu ve pabuçsuz olmak üzere ikiye ayırırlar. Hava sürtümlü ve ray freni olarak ikiye ayrılan pabuçsuz frenleme elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılmamaktadır. Metrolarda frenleme 80–15 km/h arası elektrikli frenleme 15–0 km/h arası mekanik frenleme şeklinde uygulanır. Bu bölümde elektrikli raylı sistemlerde kullanılan pabuçlu frenleme çeşitleri anlatılacaktır [31].

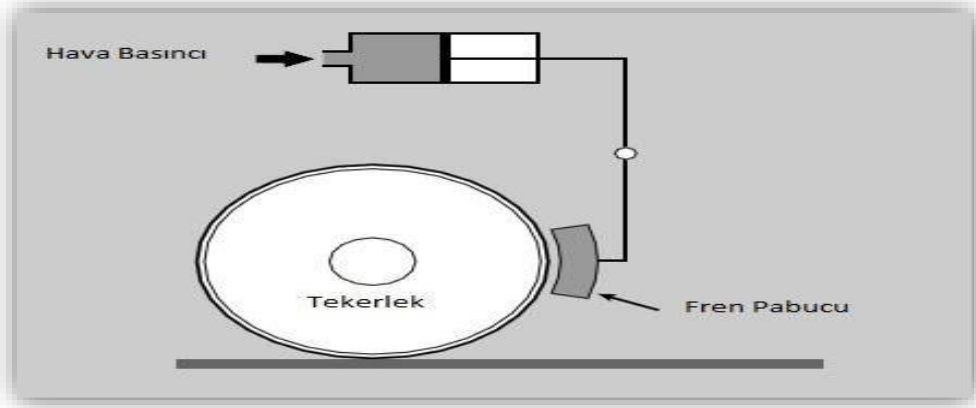


Şekil 4.7. Frenleme Çeşitleri [31]

#### 4.3.1. Mekanik Frenleme Sistemleri

Mekanik frenleme sistemleri, raylı sistem araçlarının güvenilirliği için gerekli olarak kullanılırlar. Temel olarak, pedal frenleme, aks monteli disk frenleme ve tekerlek monteli disk frenleme olarak üç kısma ayrılırlar. Bütün bu mekanik frenleme sistemlerinin hepsinde diskte sürtünmeyi sağlayan bir nesne yani fren pabucu, fren balatası kullanılır. Bu sürtünme ile uygulanan basınç ile frenleme gücünün kontrolü sağlanır [35].

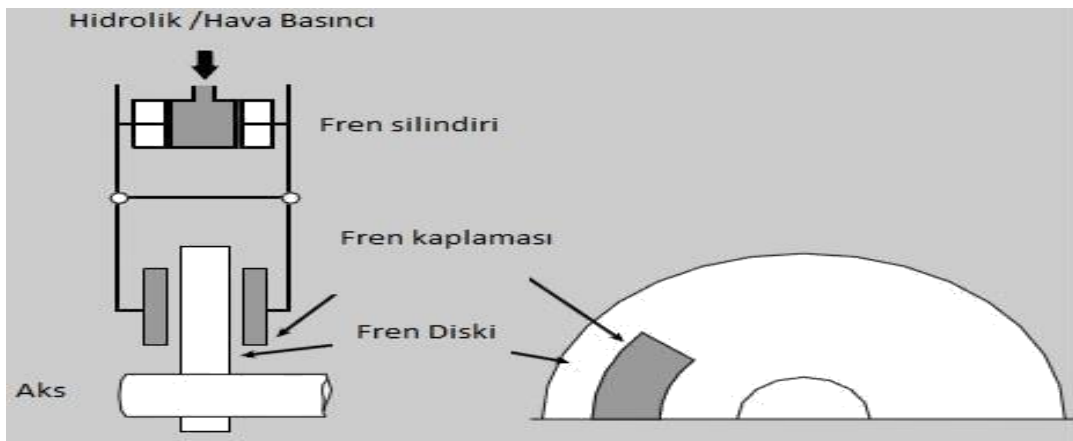
### *Pedal Frenleme*



**Şekil 4.8.** Pedal Frenleme [61]

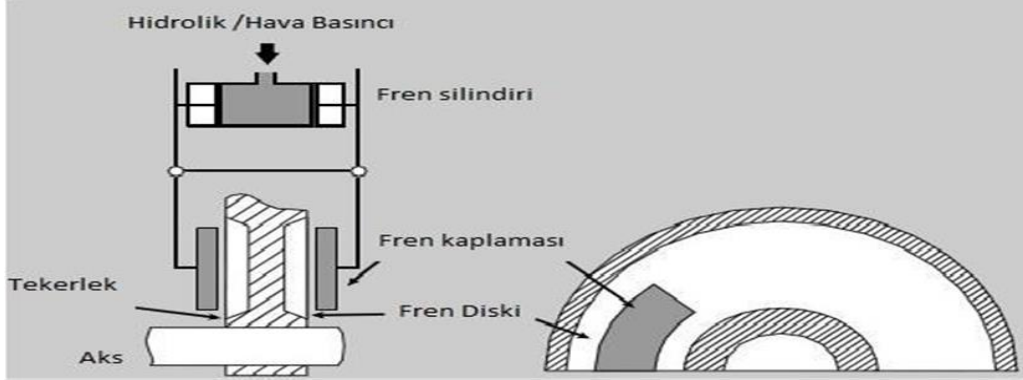
Pedal frenlemede, fren pabucu teker pedalına sürtünme kuvveti uygulayarak kayma efekti ortaya çıkarır. Yüksek hızlı trenler tekerlek pedalına fazla zarar vermesinden dolayı pedal frenlemeyi kullanamazlar. Bunu yerine aks monteli ya da tekerlek monteli disk frenleme sistemini kullanırlar. Her iki frenleme çeşitinde de fren balatalarının diske yapışmasını sağlayan fren silindirine sıkıştırılmış hava ya da yağ uygulanır [61].

### *Aks Monteli Disk Frenleme*



**Şekil 4.9.** Aks Monteli Disk Frenleme Gösteri [61]

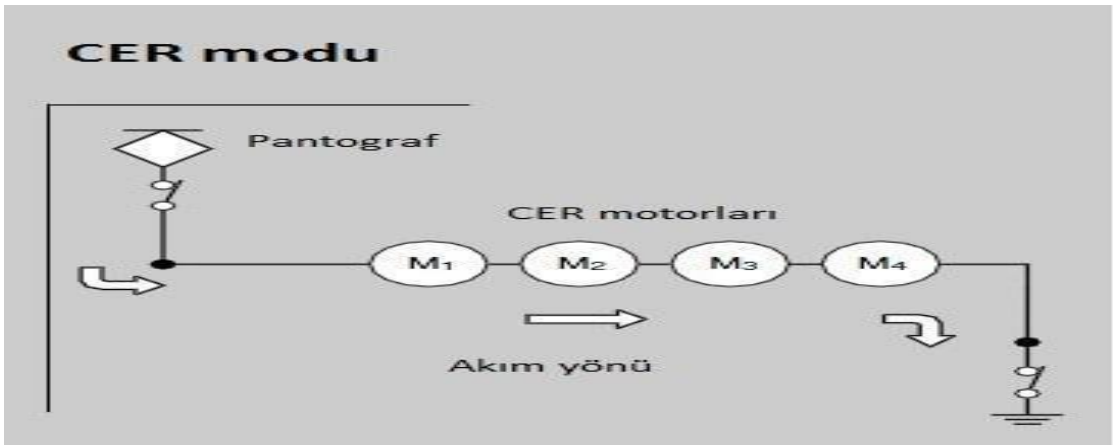
### Tekerlek Monteli Disk Frenleme



Şekil 4.10. Tekerlek Monteli Disk Frenleme [61]

### 4.3.2. Elektriksel Frenleme Sistemleri

Elektriksel Frenleme sistemlerinde, cer yan, çekme gücü sistemlerinde motorları trenlerin hızlanmasını ve hareketlenmesini sağlarken, elektriksel frenleme esnasında, cer motorları jeneratör modunda da çalışırlar. Regenerative frenlemede ortaya çıkan bu enerjinin, dirençlerde harcanması yerine enerjinin geri kazanımı sağlanır. Mekanik sistemlerdeki gibi frenleme esnasında sürtünen elemanlar kullanılmadığı için elektriksel frenleme mekanik frenlemeye göre daha ekonomik bir çözümdür. Ancak elektriksel frenleme sistemleri elektronik kontrol mekanizmalarına sahip oldukları için acil durumda kullanılması uygun değildir [18,39].



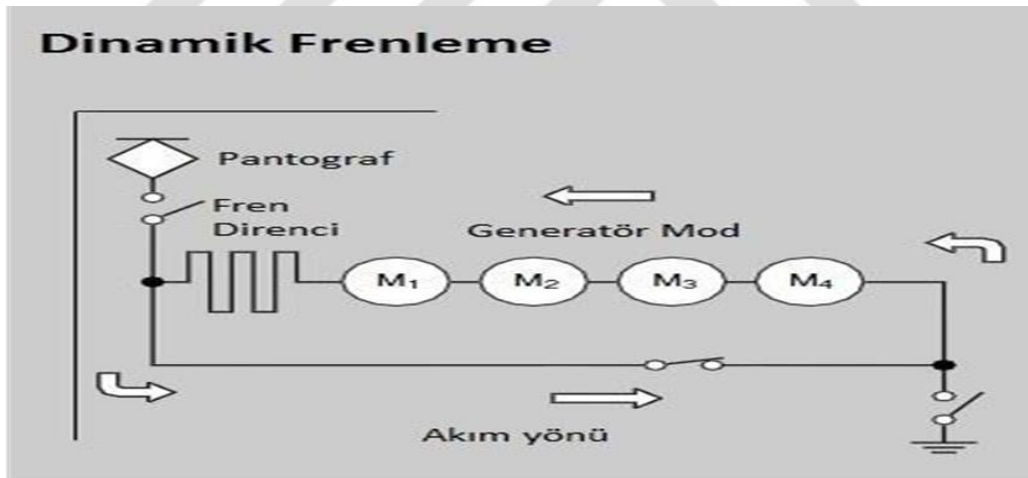
Şekil 4.11. Cer Yanı Çekiş Gücü Modu Modülü Gösterimi [18]



Elektrik dağıtım şebekesinden raylı ulaşım hattına gelen elektrik enerjisi hattın cer merkezlerinde uygun gerilim seviyesine indirilerek hattın besleme noktasına kataner ya da üçüncü raya aktarılır. Pantograf vasıtasıyla bu enerji trenin cer motorlarına iletilir. Aracın ivmelenme ve hareketi esnasında cer motorları aldıkları bu enerjiyle trenin hareketini ve hızlanmasını sağlarlar [65]. Şekilde de görüleceği üzere, cer modu şeması ve akım akış yönü gösterilmiştir.

#### 4.3.3. Dinamik Frenleme

Aracın hareketini sağlayan cer motorları frenleme esnasında jeneratör modunda çalışmaktadır. Aşağıdaki şekilde de görüleceği üzere dinamik frenleme modunda akım akış yönü gösterilmiştir. Bu çalışma modunda sistem, jeneratör olarak çalışan cer motorları, fren direnci ve besleme hattından oluşur. Frenleme esnasında motorlar ile üretilen enerji fren direnci üzerinde ısı enerjisi olarak harcanır. Ortaya çıkan ısı enerjisini tünellerden atmak için ekstra havalandırma gücüne ihtiyaç duyulur [43].

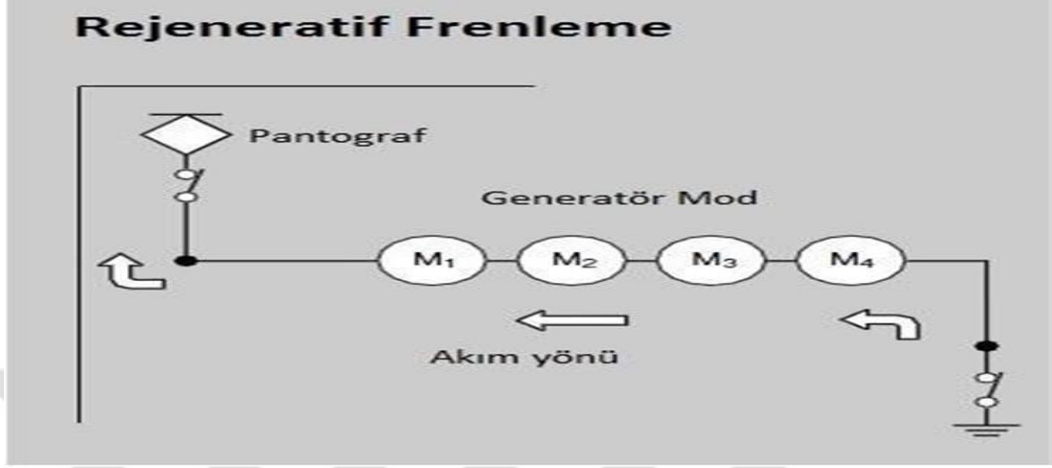


Şekil 4.12. Dinamik Frenleme Modülünün Gösterimi [38]

#### 4.3.4. Rejeneratif Frenleme

Dinamik frenlemeden farklı olarak rejeneratif frenlemede sistem üzerinde frenleme direnci bulunmaz. Frenleme esnasında ortaya çıkan enerji direnç üzerinde harcanmaksızın çeşitli yöntemler kullanılarak enerjinin geri kazanımı sağlanır. Bakıldığında ise sonraki bölümlerde bu enerjinin geri kazanım yöntemleri ve önemi

anlatılacaktır. Metro hatlarında dinamik frenleme ve rejeneratif frenleme hibrit olarak kullanılmaktadır [39,43].



Şekil 4.13. Rejeneratif Frenleme Sistemlerinin Şematik Gösterimi [43].

#### 4.4. Rejeneratif Frenleme Geri Kazanım Yöntemleri

Raylı sistem işletmeleri elektrik şebekesinin en büyük güç tüketen yükleri ihtiva eder. Dolayısıyla raylı sistemlerde enerji optimizasyonu enerji verimliliği açısından önemlidir. Rejeneratif frenlemenin geri kazanımı raylı sistemlerde yapılan bir enerji optimizasyon çalışmalarından biridir. Bu geri kazanım genel enerji tüketimini ve sera gazının azaltılmasının haricinde alt yapı gereksinimlerini azaltıp sistemin performansını ve güvenilirliğini artırır. Doğru akım raylı sistemde araç frenleme yaptığı zaman ortaya çıkan rejeneratif güç, aracın pantografı üzerindeki gerilimin yükselmesine neden olarak diğer güç rayları üzerinde güç değişimine olanak sağlar.

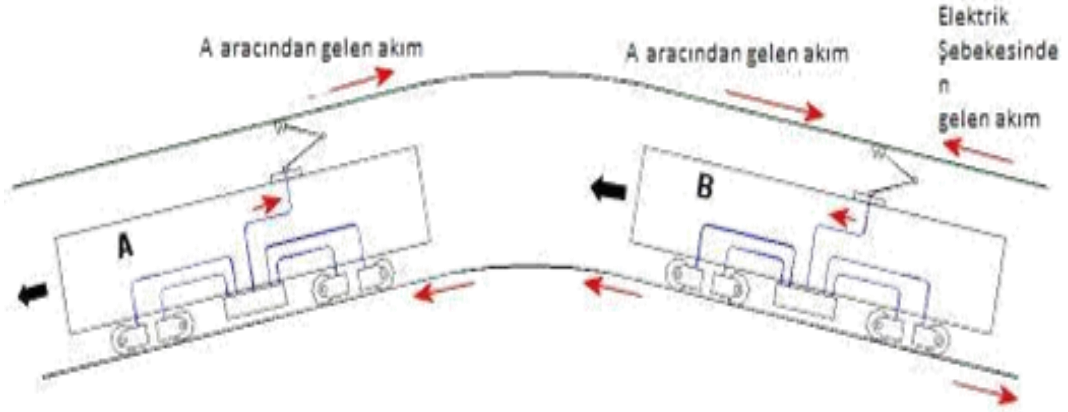
Bu güç, istasyonlarca desteklenen bir güç kaynağı olarak düşünülebilir. Eğer bir güç kaynağı gibi düşünülmez ise, bu güç hattın gerilim seviyesini yükseltir, sistemin stabilitesini bozar, tren üzerindeki ya da istasyonlardaki dirençlerde harcanarak ısı olarak ortaya çıkar. Aşağıdaki tabloda da belirtildiği üzere, rejeneratif enerjinin kullanılma yöntemleri gösterilmiştir [18,68].

**Tablo 4.2.** Rejeneratif Enerjinin Kullanımı [18]

Araç	Tüketim	Frenleme Direnci
İstasyon	Tüketim	Frenleme Direnci Yardımcı CER Gücü
	Depolama	Süper Kapasitör, Flywheel, Bataryalar
	Çevrim	Rejeneratif İnverter

#### 4.4.1. Rejeneratif Enerjinin Yardımcı Cer Gücü Olarak Kullanımı

Metro veya raylı ulaşım sistemlerinde yaptığımız gözlemler sonucunda, bir trenin hareketi için harcanan enerji raylı ulaşım sisteminin toplam enerjisinin %40-%50 si olarak kabul edilebilir. Araç bir istasyonda frenleme yaptığı zaman ortaya çıkan rejeneratif enerji, pantograf ya da üçüncü ray üzerinden kataner hattına geri verilir ve eğer o esnada istasyonda kalkışa hazır bir araç varsa o aracın cer gücüne ilave bir yardımcı güç olarak kullanılabilir.



**Şekil 4.14.** Rejeneratif Enerjinin Yardımcı CER Gücü Olarak Kullanılması [39]

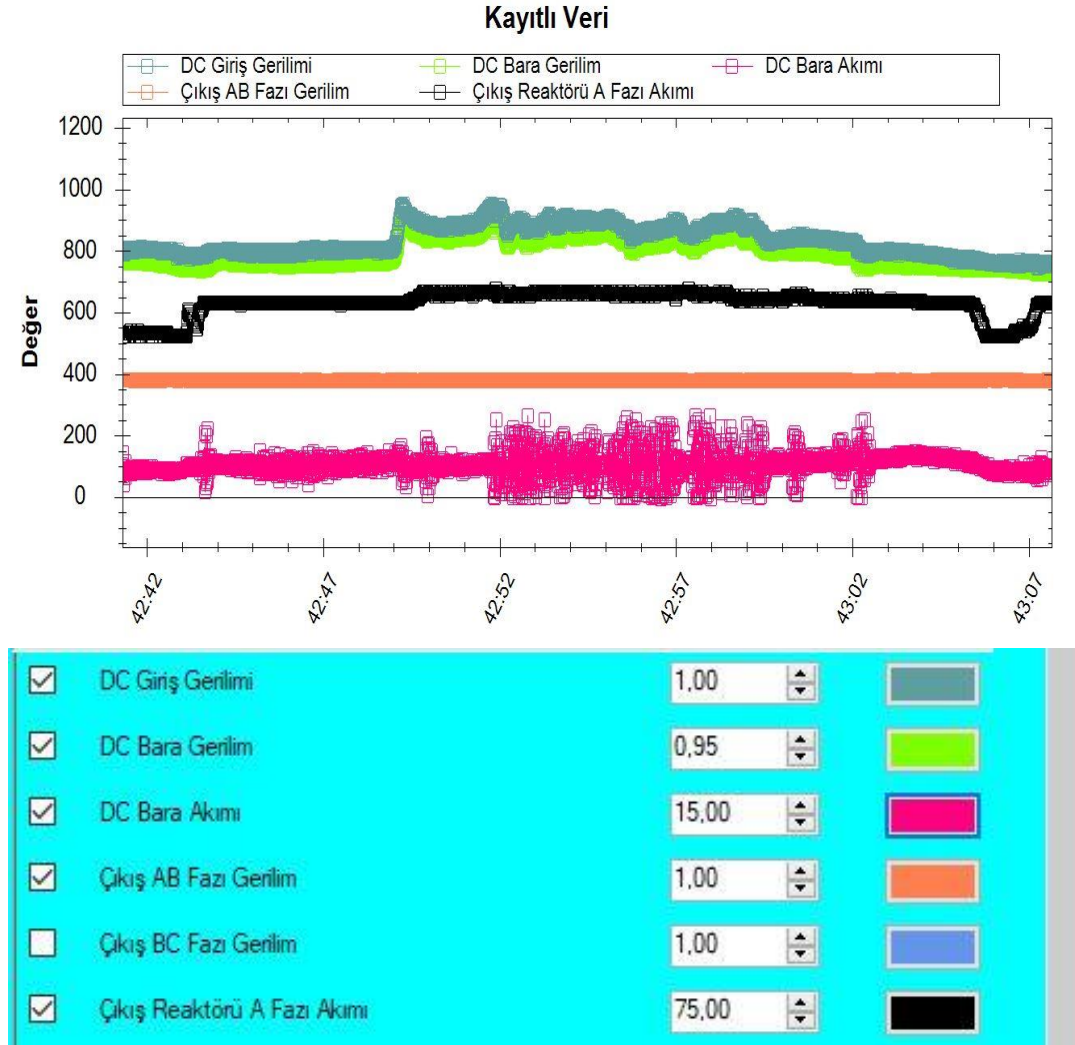
Rejeneratif frenleme enerjisi araçların kalkışına destek amacıyla yardımcı cer gücü olarak kullanılmaktadır [69].

#### 4.4.2. Rejeneratif Enerjinin Hatta Geri Verilmesi

Birçok doğru akım elektrikli raylı ulaşım sisteminde stabil doğru akım güç elde etmek için adapte edilmiş diyotlu doğrultucu sistemleri kullanılır. Ancak rejeneratif frenlemede üretilen ve kullanılmayan ya da yardımcı cer gücünde kullanılmayan artık enerjiyi hatta geri iletmek için ilave tristörlü çift yönlü bir invertör gereklidir [40].

Bununla ilgili olarak; Ankaray Hafif Metro'sunda hatta 4 dizi çalışırken yapılan çalışmada diğer araçları frenleme yaptırarak kendi bulunduğumuz araçta gerilim seviyesinin nasıl değiştiğini gözlemlemiş olduk. Nominal gerilimi 750 V olan metronun frenleme esnasında gerilimin ve akımın nasıl yükseldiğini analiz etmiş olduk.

Yapılan ölçümler, Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18 de verilmiştir;



Şekil 4.15. PC Ekran Görüntüsü



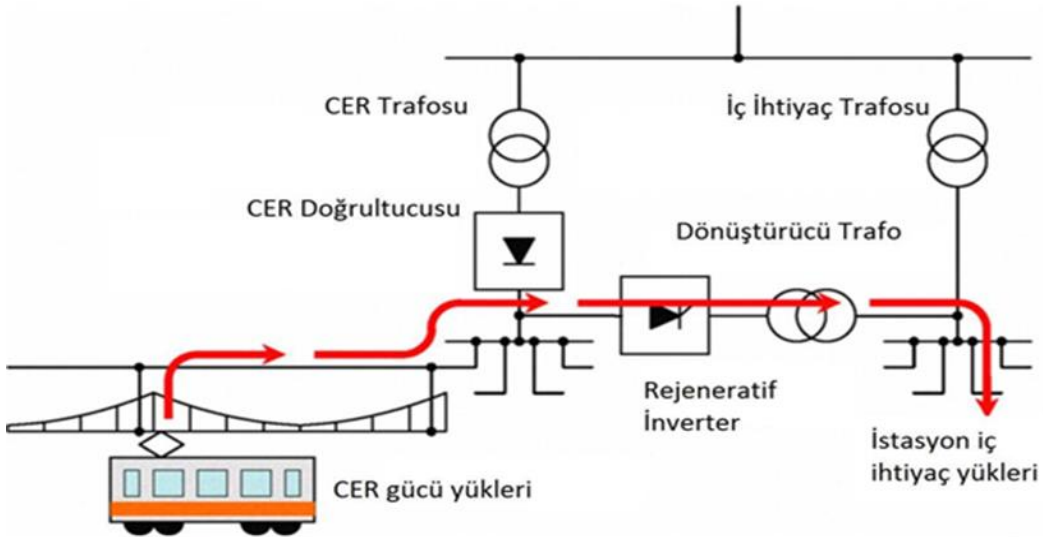
Şekil 4.16. Trenin Normal Seyir Hali Gerilim Değeri



Şekil 4.17. Diğer Araçların Frenleme Esnasındaki Gerilim ve Akım Seviyesi



Şekil 4.18. Ölçü Aleti Ekran Görüntüsü

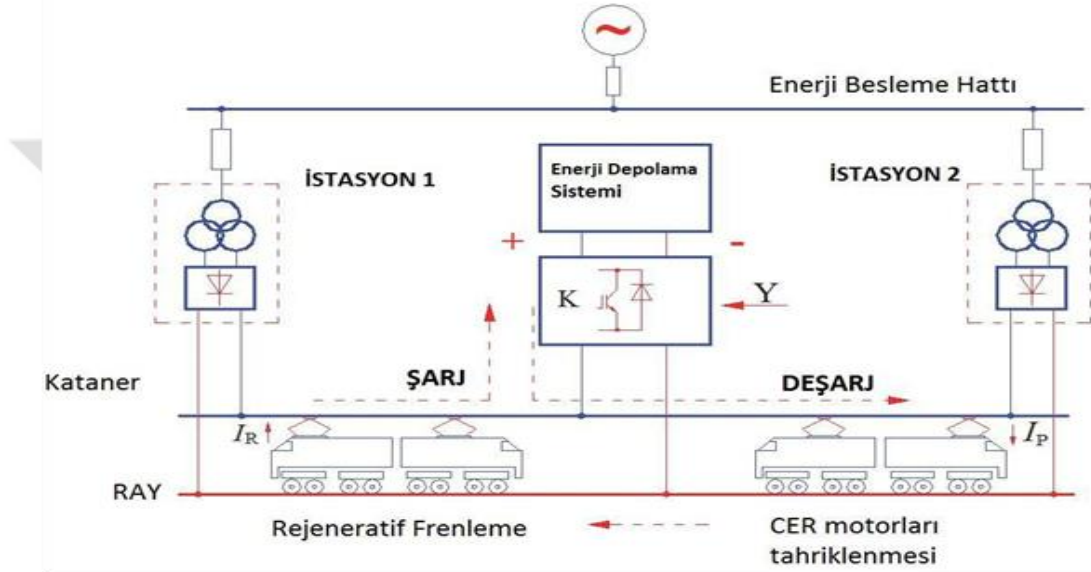


Şekil 4.19. Enerjinin Hatta Geri Verilmesinin Şematik Gösterimi [18]

Yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere enerjinin hatta tekrardan verilmesi olayı göstermiştir. Eğer üretilen rejeneratif enerji istasyonda kullanılacak enerjiden de fazla ise şehir şebekesine de aktarılabilir. Ülkemizde şehir şebekesine enerjiyi geri iletmek için gerekli lisansların alınması ve yasal düzenlemelerin yapılması gerekmektedir [18].

#### 4.4.3. Rejeneratif Enerjinin Depolanması

Rejeneratif frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin anında kullanılmasına yönelik metotlar yukarıda anlatılmıştır. Frenleme esnasında istasyonda kalkmakta olan herhangi bir araç olmadığı durumda ya da istasyonda ortaya çıkan enerjiyi harcayacak yeterli yük olmaması durumunda kalan enerji frenleme dirençlerine gönderilerek ısı olarak atılması sağlanır [39].



Şekil 4.20. Rejeneratif Frenlemede Enerji Depolama Sistemi Kullanımı [70]

Rejeneratif frenlemede çıkan enerjinin tamamının değerlendirilmesi açısından enerji depolama sistemleri geliştirilmiştir. Bu bölümde enerji depolama sistemlerinin nasıl entegre edildiğinin genel bir anlatımı olacaktır. İlerleyen bölümlerde enerji depolama sistemlerine detaylı olarak değinilecektir. Şekilde de görüleceği gibi; bir enerji depolama sisteminin raylı sistem hattına yerleştirilmesi gösterilmiştir. Frenlemede ortaya çıkan enerji hatta geri iletilmeden ya da bir kısmı araç kalkışı, istasyon yüklerinde harcandıktan sonra bir invertör vasıtasıyla depolama sistemine iletilerek depolanması sağlanır. Depolanan enerji ihtiyaç halinde yine araç kalkışında ya da alternatif akıma dönüşümü sağlanarak istasyon iç ihtiyaçlarında kullanılması sağlanır. İlerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacak olan depolama sistemleri;

- Bataryalar
- Süperkapasitörler
- Volanlar (Fly Wheel) olmak üzere üç kısımda incelenecektir [69,70].

#### 4.5. Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliğine Yönelik Diğer Yöntemler

Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı raylı sistemlerde enerji optimizasyonu için önemli bir yöntemdir. Harcadıkları güç açısından şehir enerji şebeke hattının en büyük müşterilerinden olan raylı sistem hatlarında enerji tasarrufuna yönelik başka çalışmalar da yapılmaktadır [69].

##### 4.5.1. Besleme geriliminin 1500V DC seçilmesi

Baktığımızda, raylı sistem besleme geriliminin 1500V doğru akım seçilmesinin daha düşük gerilim seviyelerine göre birtakım avantajları vardır [20].

- **CER trafo merkezi sayısının azalması:** Hat geriliminin 1500VDC seçilmesi durumunda çekilen akım değeri yarıya inecek, komşu CER trafo merkezleri arasındaki mesafe artacaktır [73]. Dolayısıyla daha az sayıda cer trafosu kullanılabilir.
- **Bakım maliyetinde azalma:** Cer trafo merkezinin raylı sistem alt yapı sisteminin en önemli unsurlarından biridir. Sistemdeki bu önemli merkezin sayısının azalmasıyla yıllık bakım maliyetleri ve buna bağlı olan alt yapı elemanlarının maliyetlerinde azalmaya sebep olacaktır [73].
- **Kayıp enerji azalması:** Akım taşıyan iletkenler ve trafo merkezleri elektrik hattında oluşan kayıpların ana kaynaklarıdır [73]. Akım seviyesinin azaltılması kayıp enerjinin azaltılmasını sağlar.

##### 4.5.2. Verimli sürüş yöntemleri

Enerji tasarrufu için optimum hız profilinin seçilmesi, otomatik ve manuel sürüş prosedürlerinin enerji tasarrufuna yönelik ayarlanmasıyla %15 civarında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. En basit verimli sürüş yöntemi olarak, tren maksimum hızda belli bir sürede ilerledikten sonra boşta çalışma durumuna alınmakta ve araç karşı kuvvetlerin etkisinde yavaşlamaya bırakılmaktadır. Maksimum hız limitlerinin, inşaat limitlerinden daha az olması uygun yöntemlerden biridir. Verimli bir sürüş için hız profilinde [22].

- Başlangıç ivmesinin yüksek olması,
- İstasyonlar arası mesafeyi, yolcu yoğunluğuna, zaman çizelgesine ve hat geometrisini göze alarak en uygun düşük boşta alma hızı,



- Uzun boşta gitme süresi,
- Frenleme ivmesinin yüksek olması,
- Bekleme süresi düşük seçilmelidir.
- Manuel sürüş yapılan işletmelerde makinistlere verilen eğitimlerde yüksek ivme ile kalkış, uygun zaman diliminde aracın boşta gitmesini sağlanması ile enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

#### **4.5.3. Cer Gücü İhtiyaçlarında Optimizasyon**

Cer gücü ihtiyaçlarında optimizasyon kavramına bakıldığında, raylı sistem hat geometrisi, araç özellikleri, cer besleme ve dağıtım sistemi CER enerji tüketimini belirleyen önemli parametrelerdir. Bu parametrelerde yapılacak olan optimizasyon çalışmaları ile mevcut hattaki enerji tüketimi azaltılabilir. Boşta çalışmaya müsaade edebilecek bir hat geometrisi, düşük ağırlıkta araç seçimi, otomatik sürüş prosedürleri, rejeneratif frenlemeden faydalanma oranını yükseltecek işletme mantığı bu optimizasyon çalışmalarındandır [78,80].

#### **4.5.4. İç ihtiyaç hatlarında optimizasyon**

Raylı ulaşım hatlarında harcanan enerjinin %50-60'ı istasyonların iç ihtiyacı için harcanmaktadır. İç ihtiyaçlarda yapılacak enerji optimizasyonları genel enerji tasarrufuna önemli oranda katkı sunacaktır. İstasyonlarda aydınlatmalarının en optimum şekilde yapılması, aydınlatma elemanlarının yüksek verimli ürünlerden seçilmesi, asansör ve yürüyen merdiven motorları için frekans sürücülerinin seçilmesi, planlı bakım çalışmaları ile istasyonlarda önemli oranda enerji tasarrufu sağlanmaktadır [77].

#### **4.6. Frenleme Enerjisi Potansiyelini Belirlemeye Yönelik Çalışmaları**

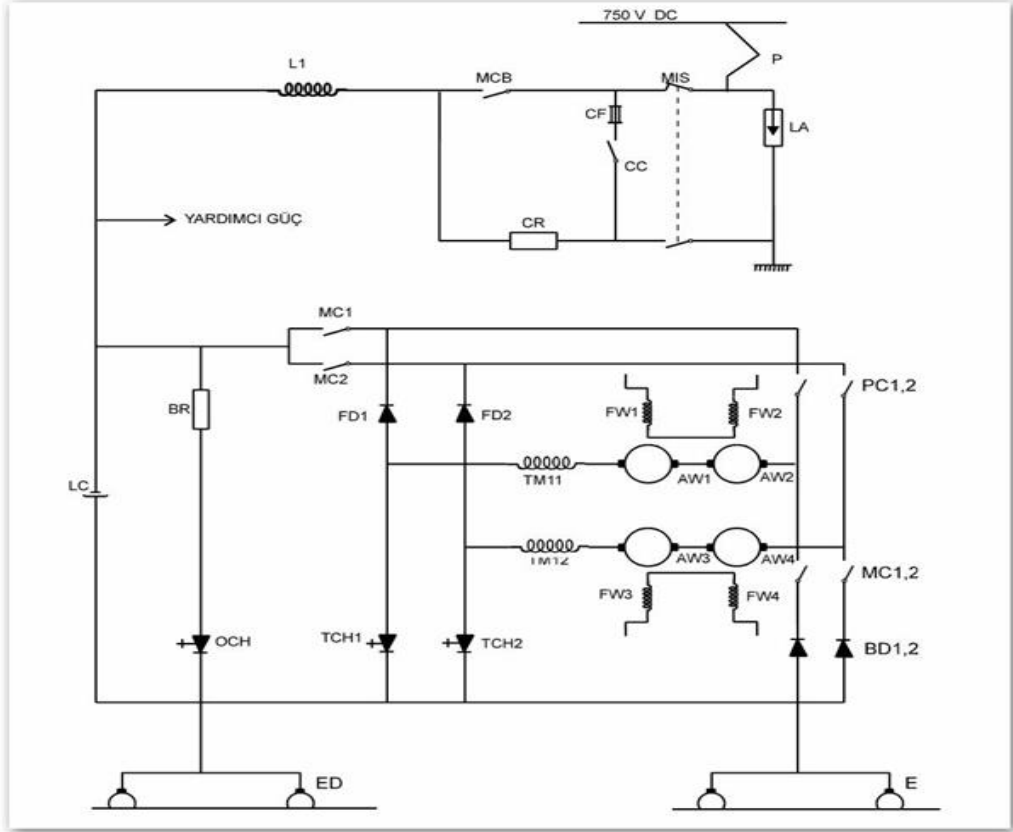
Çalışmada metro, tren gibi raylı ulaşım sistemlerinin önemli bir halkasını oluşturan metro ve tren sistemi araçları incelenmiştir [80].

##### **4.6.1. LRT Aracı Tahrik Sisteminin İncelenmesi**

Şehir içi raylı sistemlerde tahrik sisteminin incelenmesi aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

#### 4.6.2. Tahrik Sistemi

Bu kısımda esas itibariyle pantograf, ana izolatör anahtarı, ana devre kesicisi, hat filtresi, doğru akım tahrik motorları, endüvi devresi kısıyıcısı, uyarma alan çevirici ünitesi, motor kontakları, frenleme direnci, aşırı akım koruyucusundan oluşmuş bir tahrik sistemi incelenmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, bu yapıya sahip tahrik sistemi blok şeması gösterilmektedir. Yukarıdaki şekilde dört adet serbest uyarmalı doğru akım motorun kısıyıcı üniteleriyle birlikte çalışma düzeni gösterilmiştir. İkişer adet seri doğru akım motordan oluşan her grup ayrı bir motor modülünü oluşturmaktadır [24].



Şekil 4.21. Tahrik Sistemi Blok Şemasının Gösterimi [24]

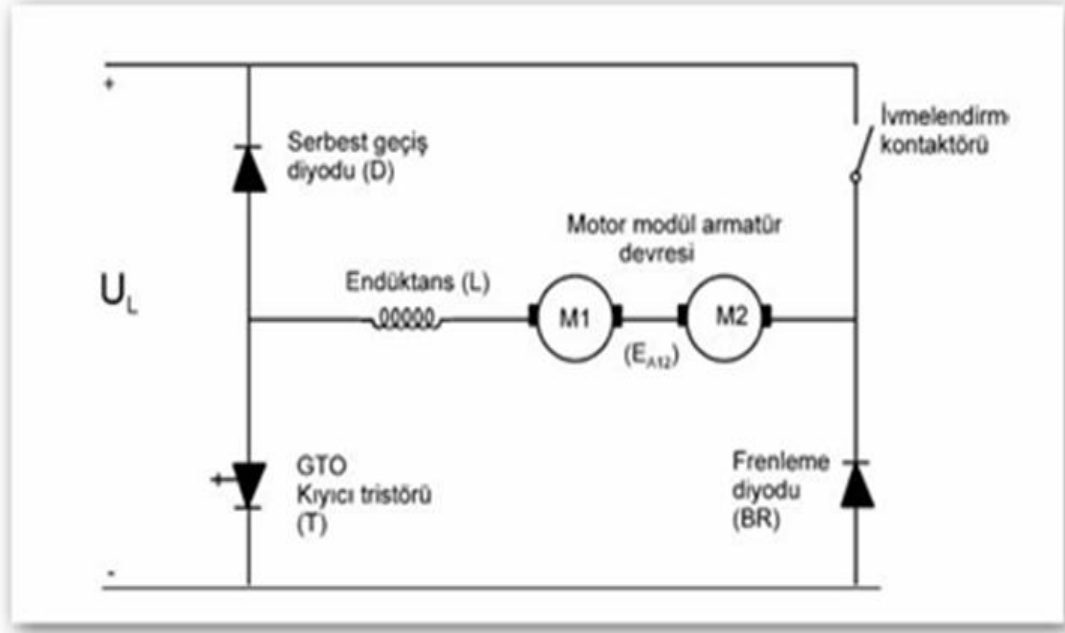
- OCH** : Yüksek gerilim kısıyıcısı
- LA** : Yıldırıma karşı koruyucu
- MC** : Motor modül kontaktörü
- MIS** : Ana izolatör ayırıcısı
- FD** : Serbest geçiş diyotu
- CF** : Şarj ünitesi koruma sigortaları

- TCH** : Ana kıyıcı  
**CC** : Şarj kontaktörü  
**TMI** : Tahrik motor endüktansı  
**CR** : Şarj direnci  
**AW** : Armatür sargıları  
**MCB** : Ana devre kesicisi  
**FW** : Uyarma sargıları  
**LL** : Hat endüktansı  
**PC** : Motor kontaktörü  
**LC** : Hat kapasitansı  
**BD** : Frenleme diyotları  
**BR** : Frenleme direnci  
**ED** : Topraklama ünitesi

Baktığımızda, pantograf, aracın üst kısmının arka bojisinin üzerine monte edilmiştir. Görevi ise, 750V doğru akım kataner hattından araca enerjinin iletilmesini sağlamaktır. Ana izolatör ayırıcısı, tipik elektrik devre ayırıcılarına benzer. Eğer araçta çalışma yapılacaksa ayırıcı açılarak pantografla ana devreyi birbirinden ayırır ve hat kapasitesini boşaltır. Ana devre kesicisi, araçtaki güç devresinin en önemli koruma elemanıdır. Temel vazifesi aşırı yüklenme veya herhangi bir arıza durumunda aracın güç sistemini besleme kaynağından ayırmada kullanılır. Esas itibariyle bir doğru akım kontaktörden ibarettir. Arıza durumunda beş ile dokuz ms arasında açılma emrini alır. Açılma emri akım seviyesinin belli bir değere ulaşmasına müteakip verilir. Yeniden kesici kapanmadan sürücü tarafından resetlenmesi gerekir. Reste sinyali ana devre kesicisindeki bir resetleme bobini ile sağlanır. Hat filtresi, bir endüktans bobini ile bir hat kapasitansından oluşur. Temel görevi, kıyıcı tarafından oluşturulan ve doğru akım bileşen üzerine binen harmonikleri azaltmaktır. Alternatif akım devre de oluşan harmoniklerin de toplam harmoniği artırıcı etkisi vardır. Toplam harmoniğin belli bir değer üzerinde çıkması durumunda haberleşme ve kontrol sistemlerinin olumsuz şekilde etkilenmesi olasıdır. Hat filtresi hem ivmelenme hem de elektrodinamik frenleme modunda devrededir. Ana devreler, aktif hale geçmeden önce hat kapasitesi doldurulur [24].

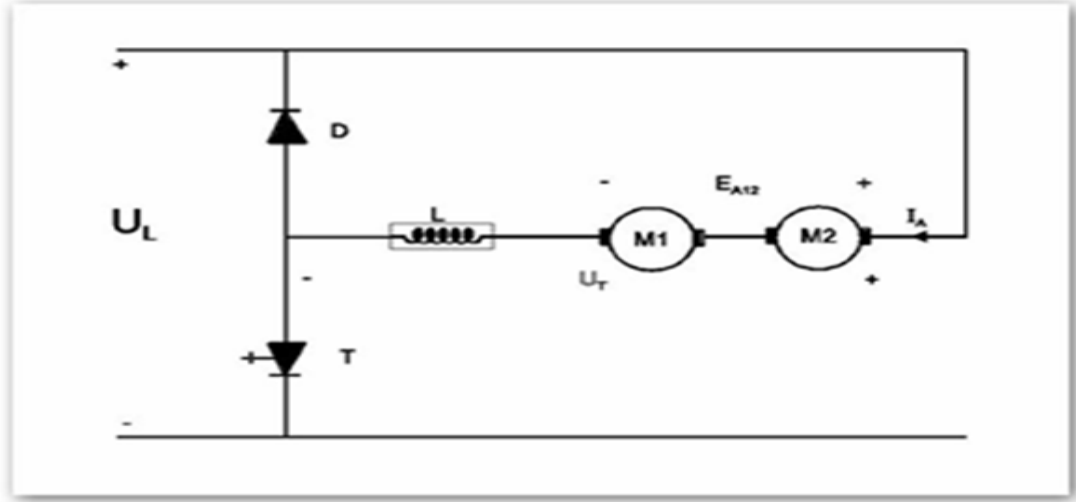
#### 4.6.3. İvmelenme Modunda Kıyıcının Çalışma İlkesi

Buradan baktığımızda ivmelenme modunda kıyıcı olarak adlandırılan modülün çalışma ilkesinde belirtildiği gibi, doğru akım olan hat gerilimini daha düşük ve kontrol edilebilir gerilim seviyelerine indirerek doğru akım motorların armatür sargılarını beslemektir. Bu darbeler motorun armatür devresini beslemeden önce filtre edilirler [26].



**Şekil 4.22.** LRV Aracı Motor Modülü İvmelendirme ve Frenleme Devresinin Modül Gösterimi [26]

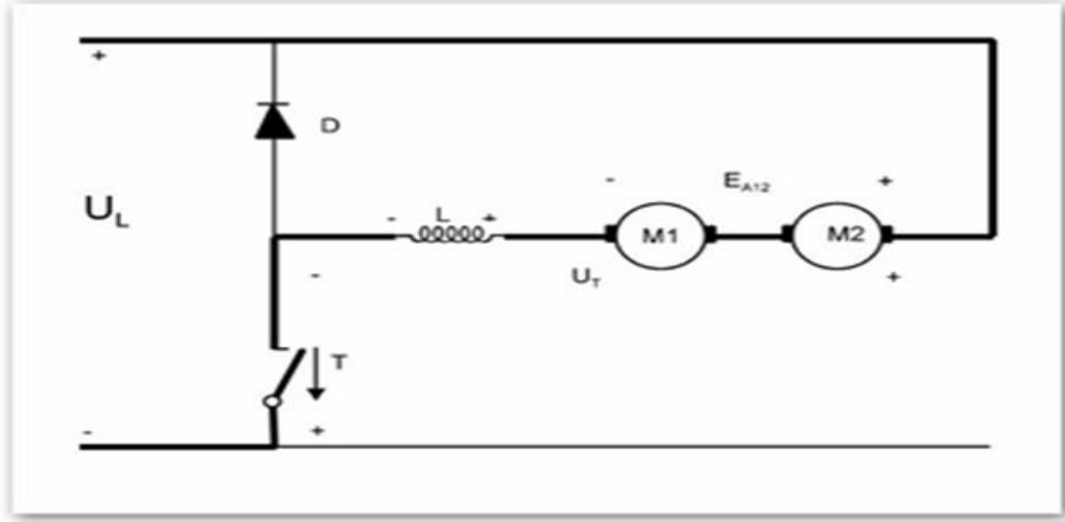
Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere, LRV aracı motor modülü ivmelendirme ve frenleme devresinin modül gösterimi verilmiştir. Araçların ana devresi, iki kıyıcı üniteden oluşmuş her bir motor modülünün armatür devresi bir kıyıcı ünitesinden beslenmektedir. Güç modu için basit bir kıyıcı devresi ise aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [3,55].



**Şekil 4.23.** İvmelenme Modunda Kıyıcı Eşdeğer Devresinin Modül Gösterimi [3]

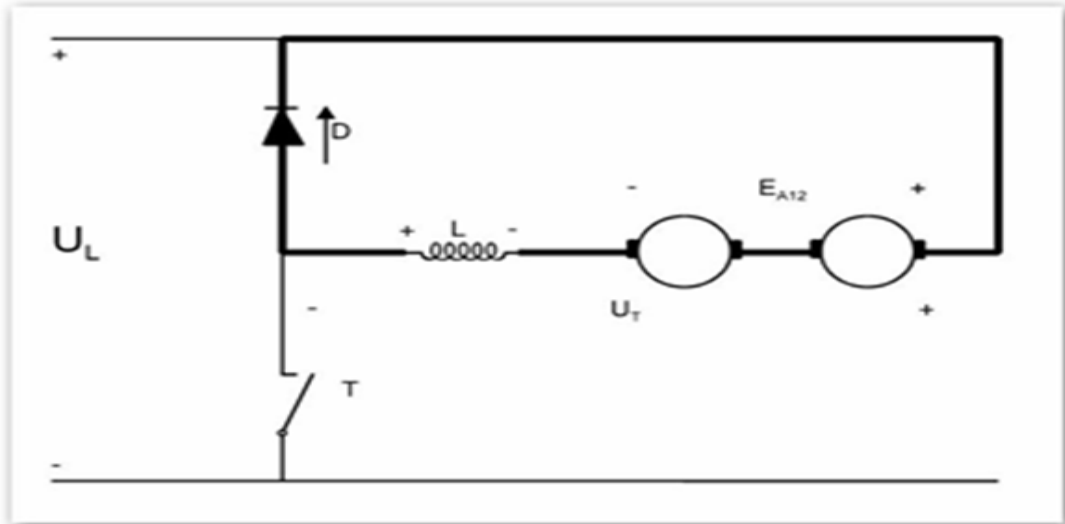
Yukarıdaki şekilde ivmelenme modunda kıyıcı eşdeğer devresinin modül gösterimi verilmiştir.  $U_L$  hat gerilimi olup, ünitenin giriş tarafına uygulanan gerilimdir. Kıyıcının çıkış gerilimi  $U_T$  gerilimidir.  $U_T$  geriliminin, motorda bir DC bileşeni ve L bobininden dolayı da alternatif akım bileşeni mevcuttur. Motorun armatür devresine, kıyıcı tarafından oluşturulan sert darbeleri filtre etmek için, bir L bobini seri bağlıdır.

Kıyıcı ünitesi, GTO tristörü T'nin iletim ve tıkama durumlarının, ortalama saniyede birkaç yüz devirle değişimlerine izin verecek şekilde çalışır. Motor durduğu zaman, sıfır hızda indüklenmiş EA gerilimi sıfırdır. Bundan dolayı kıyıcı, motoru sadece gerilim düşümünü karşılayabilecek kadar küçük bir gerilimle beslemelidir. Motordaki armatür akımı ve manyetik akı tarafından oluşturulan moment, aracın ivmelenmesini sağlar. Bundan dolayı motorun hızı ( $n$ ) ve EA gerilimi artar [3].



**Şekil 4.24.** İvmeleme Modunda Akım Yolunun Gösterimi [3]

Kıyıcı devresinin ivmelendirme durumunu yukarıdaki şekil göstermektedir. Kalın çizgiler GTO tristörü iletme geçtiği andaki akım yoludur. GTO, iletme çok kısa süre için geçirilir ve sonra tekrar tıkamaya sokulur. GTO tıkamaya girdiğindedir. Aşağıdaki şekilde de akım yolunu izleyen grafiğe yer verilmiştir [3].



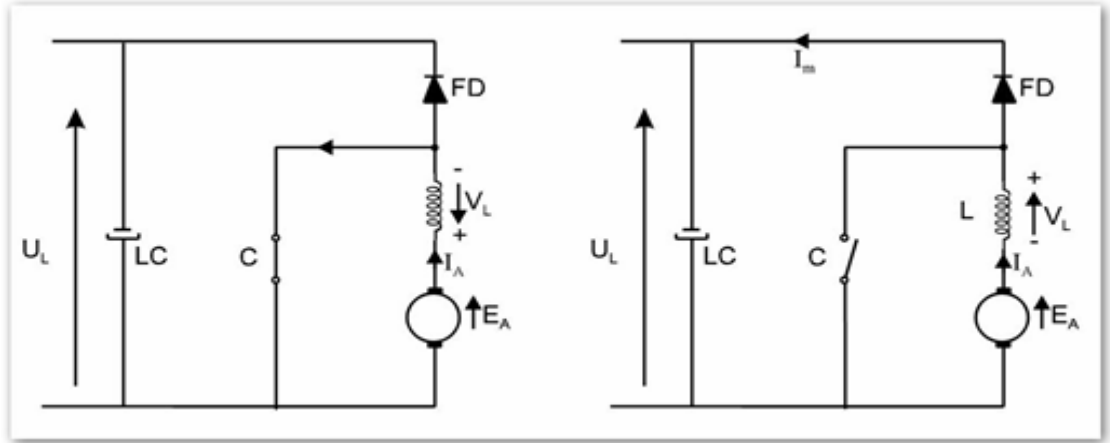
**Şekil 4.25.** Serbest Geçiş Aralığında Akım Yolu Grafiği Gösterimi [3]

Yukarıdaki şekilde de gösterildiği üzere, serbest geçiş aralığında akım yolu grafiği gösterilmiştir. Baktığımızda, GTO tıkamaya girdiği zaman, akım, yolunu serbest geçiş diyotu üzerinden tamamlar. Akım, GTO tıkamaya girdiğinde anında sıfır olmaz, çünkü

çok miktarda enerji bobinde depolanmıştır. Bundan dolayı akım, yolunu serbest geçiş diyotu üzerinden tamamlar. Bir başka deyişle armatür akımının filtre edilmesi sağlanmış olur [55].

#### 4.6.4. Frenleme Modunda Kıyıcının Çalışma İlkesi

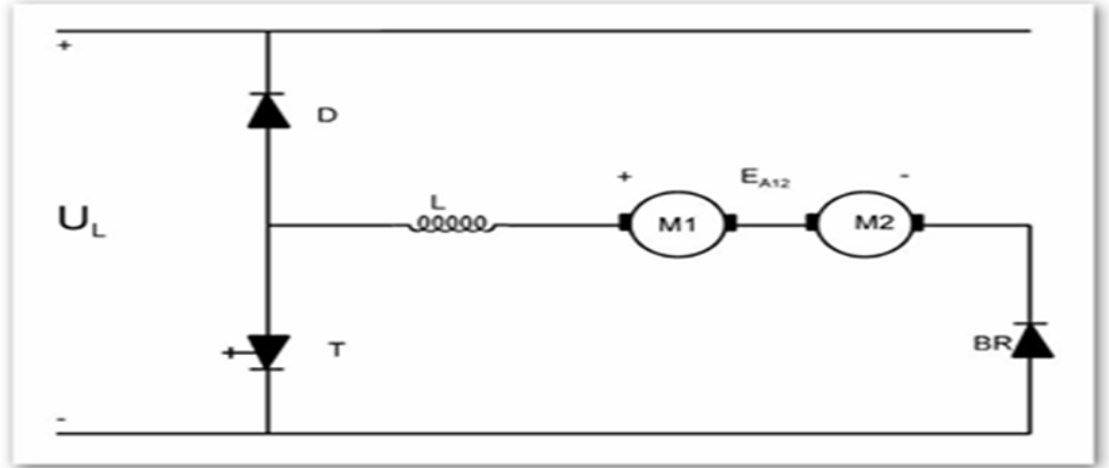
Kıyıcılar, frenlemede hat akımını kısa aralıklarla kıyarak endüktans bobini üzerinden motora uygularlar. Eğer EA armatür gerilimi, UL hat geriliminden küçükse, motor akımı hattı beslemeye başlar. Aslında baktığımızda, bu durum şekilde de görülebilir. Frenleme devresi ve gerilim, akımın zamana bağlı olarak değişim grafikleri verilmiştir. Bakıldığında, C kontağı kapalı olduğu zaman, motorun endüktansında (L) enerji depolanır. Akabinde, C kontağı açıldığı zaman bu enerji hatta geri verilir. Endüktans, C kontağının durumuna bağlı olarak polaritesini değiştirir ve üzerinden akım her zaman aynı yönde akar. Akabinde, C kontağı kapandığı zaman gerilim frenleme diyotundan yani; polaritesi değişmiş olan BD'den geçer ve motoru hattan ayırır [3,9,55].



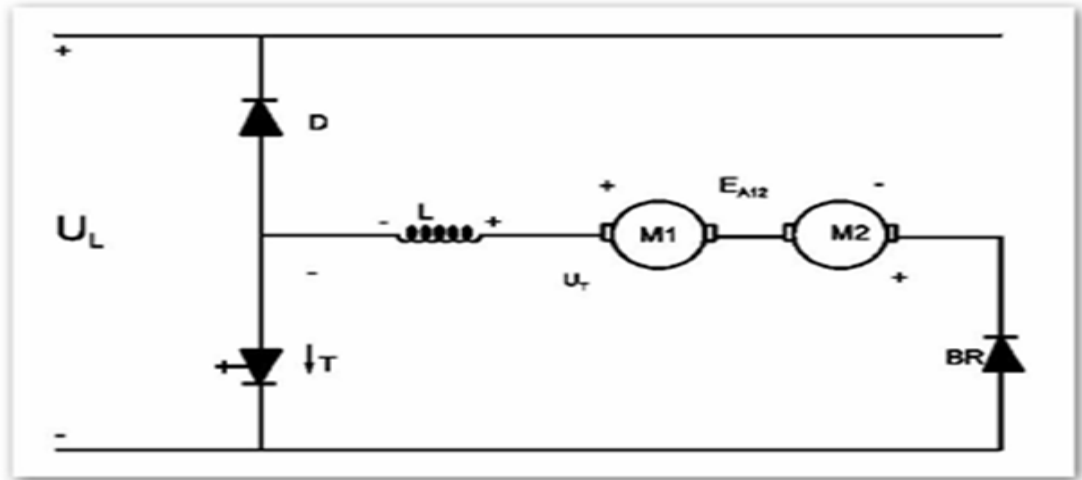
**Şekil 4.26.** C Kontaklı Kapalıyken  $I_A$  Şarj akımı, (b) C Kontaklı Açıkken Faydalı Frenleme Akım Gösterimi [7]

Yukarıdaki şekilde de gösterildiği gibi; elektrodinamik frenlemedeki kıyıcı devresinin çalışma prensibi, ivmelendirme modundaki gibidir. Frenleme modunun ivmelendirme modundan farkı, motor geriliminin polaritesinin ters olmasıdır. Motor yüksek devirdeyken uyarma alanına akım verildiğinde, motorun EA gerilimi yükselir ve GTO bobinle motora bağlanır. Baktığımızda, GTO iletme geçtiğinde armatür akımı ivmelendirme durumundaki gibi artar. Genel olarak da bakıldığında, bu durum şekil

üzerinde de çok rahat bir şekilde gösterilebilir. Örneğin; frenleme konumunda armatür akımının izlediği yol kalın çizgilerle ifade edilmiştir [7].



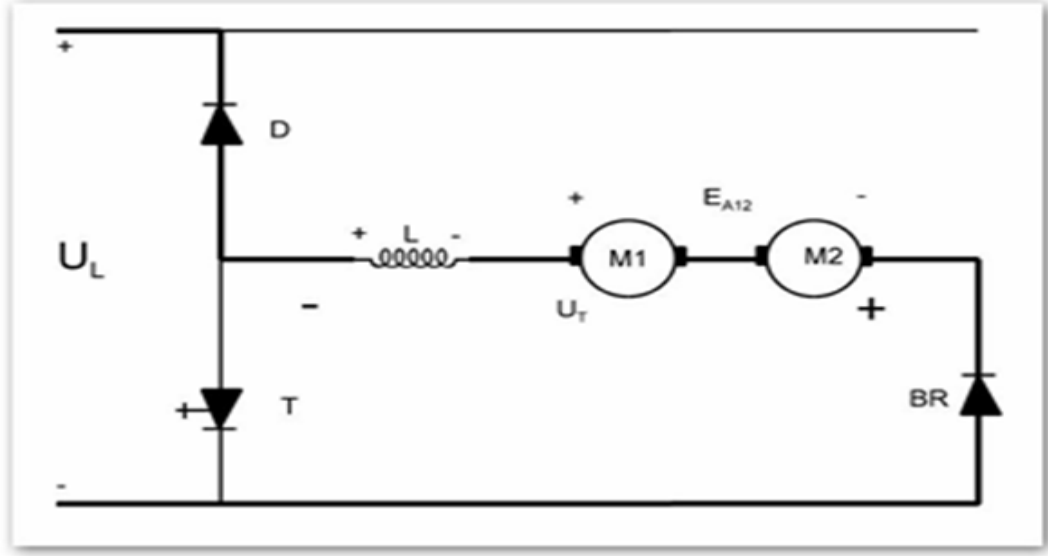
Şekil 4.27. Frenlemede Kıyıcı Devresi [59]



Şekil 4.28. Kıyıcının Frenlemede İzlediği Akım Yolu Gösterimi [5]

Kıyıcının frenlemede izlediği akım yolu gösterimi verilmiştir. Baktığımızda, GTO tıkamaya girdiğinde, armatür akımı bir miktar düşecek ve yolunu şekilde de gösterildiği gibi bitirecektir. Akımı serbest geçiş diyotundan tamamlar. Bunun sebebi de endüktif bobinde ivmelenme esnasında yüksek miktarda enerji depolanmış olmasıdır. Endüktif bobinde depolanan bu gerilim, geri besleme gerilimi olarak hatta geri verilir. Kıyıcı, istenilen hız konumuna göre motor için gereken akımı belirli periyottaki darbeleri uygulayarak sağlar [5].





**Şekil 4.29.** GTO Tıkamadayken Akım Yolu Gösterimi [8]

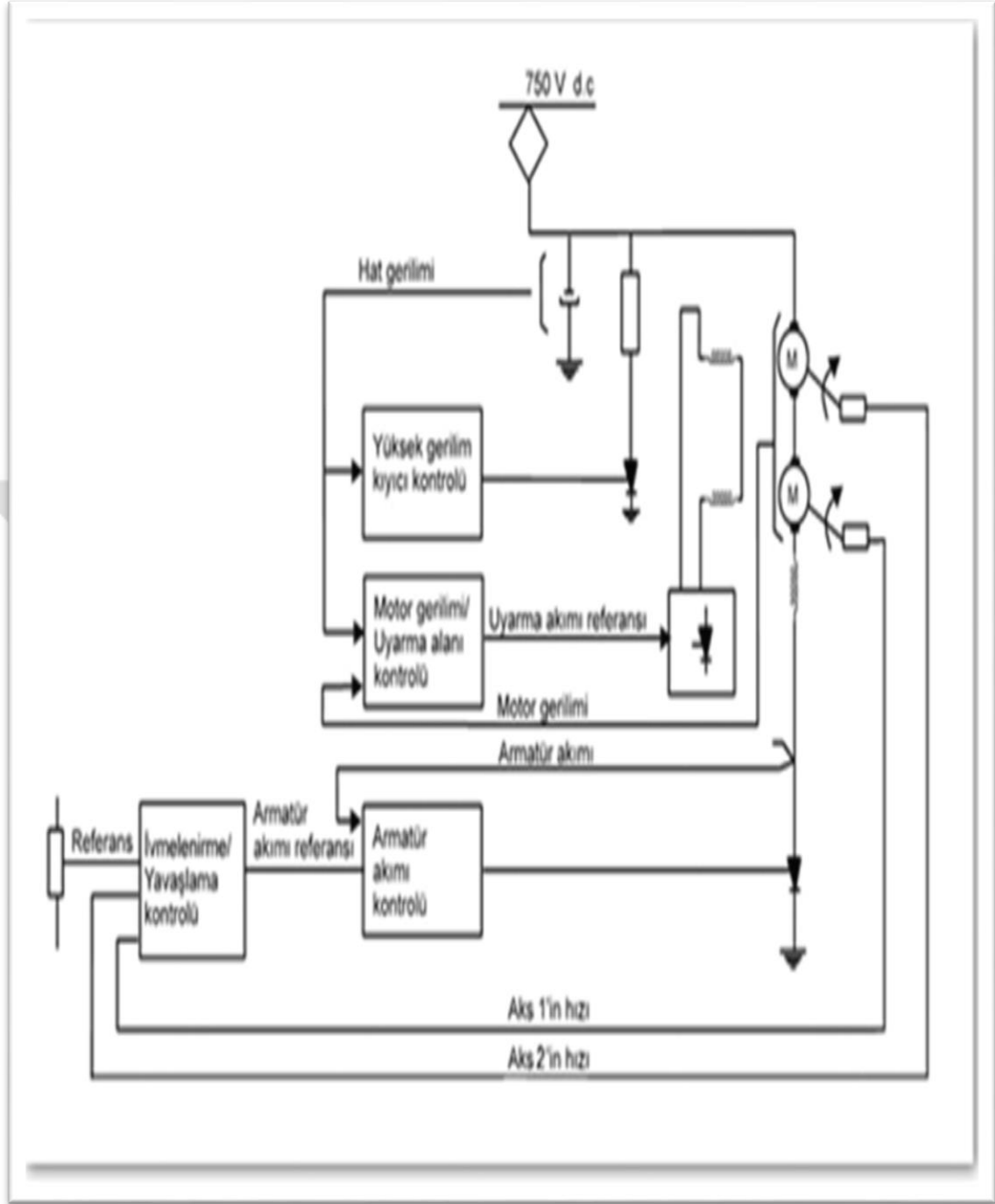
Frenlemede, hızla birlikte motor gerilimi de düşer. Talep edilen motor akımını devam ettirebilmek için kısıyıcı darbe genişliği motor EA gerilimi sıfır olana kadar artırılır. Uygulamada armatür akımı saatte iki ila beş km hızlarda sıfıra düşer ve elektrodinamik fren mekanik sürtünme freniyle yer değiştirir [8].

#### **4.7. Kontrol ve Denetleme Sistemleri**

Kontrol ve denetleme sistemleri maddeler halinde aşağıda açıklanmıştır.

##### **4.7.1. Kontrol Prensipleri**

Kontrol ve denetleme sistemlerinde, sürücü kabinindeki sürücü koluyla istenilen oranda değiştirilen hızlanma ve yavaşlama ivmesi bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Hızlanma yavaşlama durumundaki ivme referansları, armatür akım referansına dönüştürülür. Yavaşlama ivmesinde, mekanik frenleme referansı hesaplanır ve armatür akım referansı ile uyarma akımına bağlıdır. Düşük hızlarda uyarma alan akımı sabit tutulur ve moment armatür akımı vasıtasıyla değiştirilir [8,36].



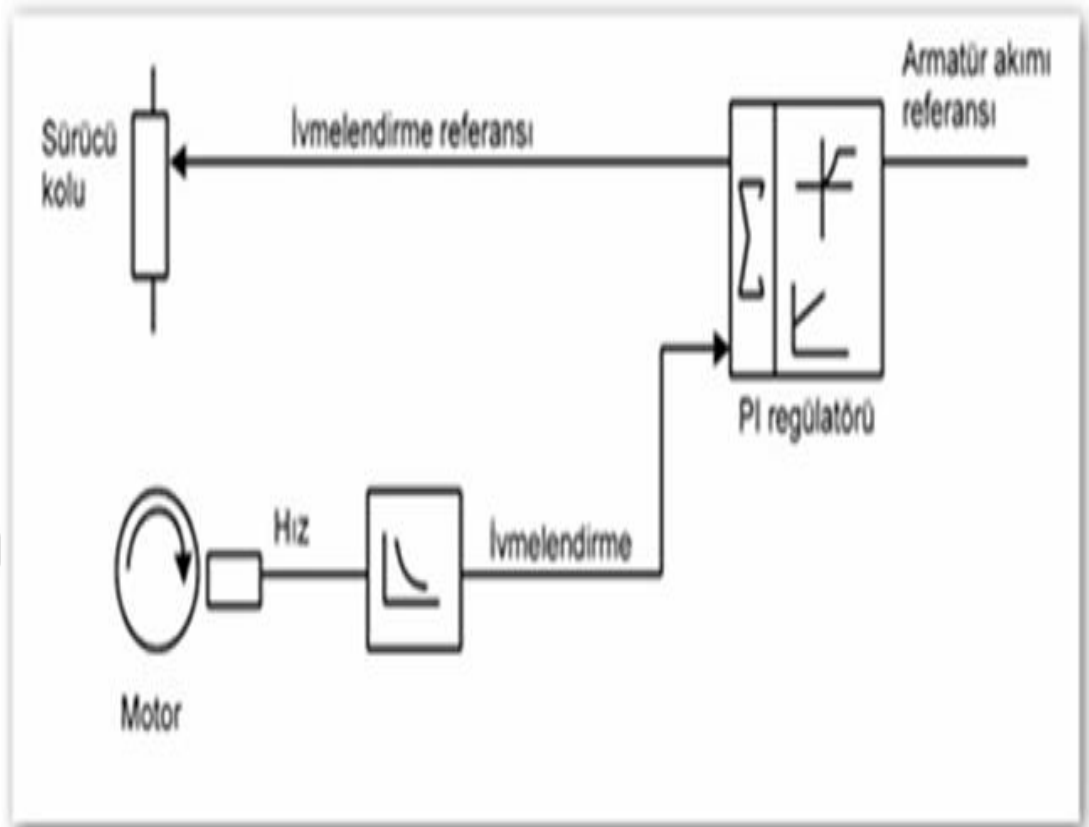
**Şekil 4.30.** Tahrik Sisteminin Kontrol Devresi [86]

Akının sabit tutulmasıyla motor gerilimi hızla artarak hat gerilimi değerine ulaşacaktır. Aslında motor geriliminin yani; temel hız bazında hat gerilim seviyesine erişmesine izin verilmez. Her iki büyüklüğün arasında küçük bir fark her zaman için bırakılır ki; Motor gerilimi hat gerilimi seviyesine ulaştığında kıyıcı çıkış gerilimi maksimum değerine ulaşır ve hız artırılamaz. Bunun nedeni ise motor geriliminin hızla artmasıdır. Aracın hızının temel hız değerinin üstüne çıkarılabilmesi için uyarma alan akımı temel hız seviyesinin üstünde azaltılır. Bu durumda motor gerilim değeri düşmeye başlar.

Frenleme modunda mekanik frenleme kontrol altına alınır. Elektriksel frenleme yani; elektrodinamik frenleme sistemlerinde maksimum seviyede uygulanır. Yetersiz olduğunda buna mekanik frenleme de eklenir. Elektriksel frenleme süresince motordan hatta geri verilen enerji nedeniyle hattın gerilimi yükselir. Hattın geriliminin fazla yükselmesini engellemek için yüksek gerilim kısıyıcı ünitesi bulunmaktadır. Bu ünite yüksek gerilim kısıyıcı kontrol ünitesiyle kontrol edilir. Şekilde de tahrik kontrol sistemi gösterilmiştir. Şekilde sadece bir motor modülü içindir şeklinde gösterilmiştir [86].

#### **4.7.2. İvmelendirme Kontrolü**

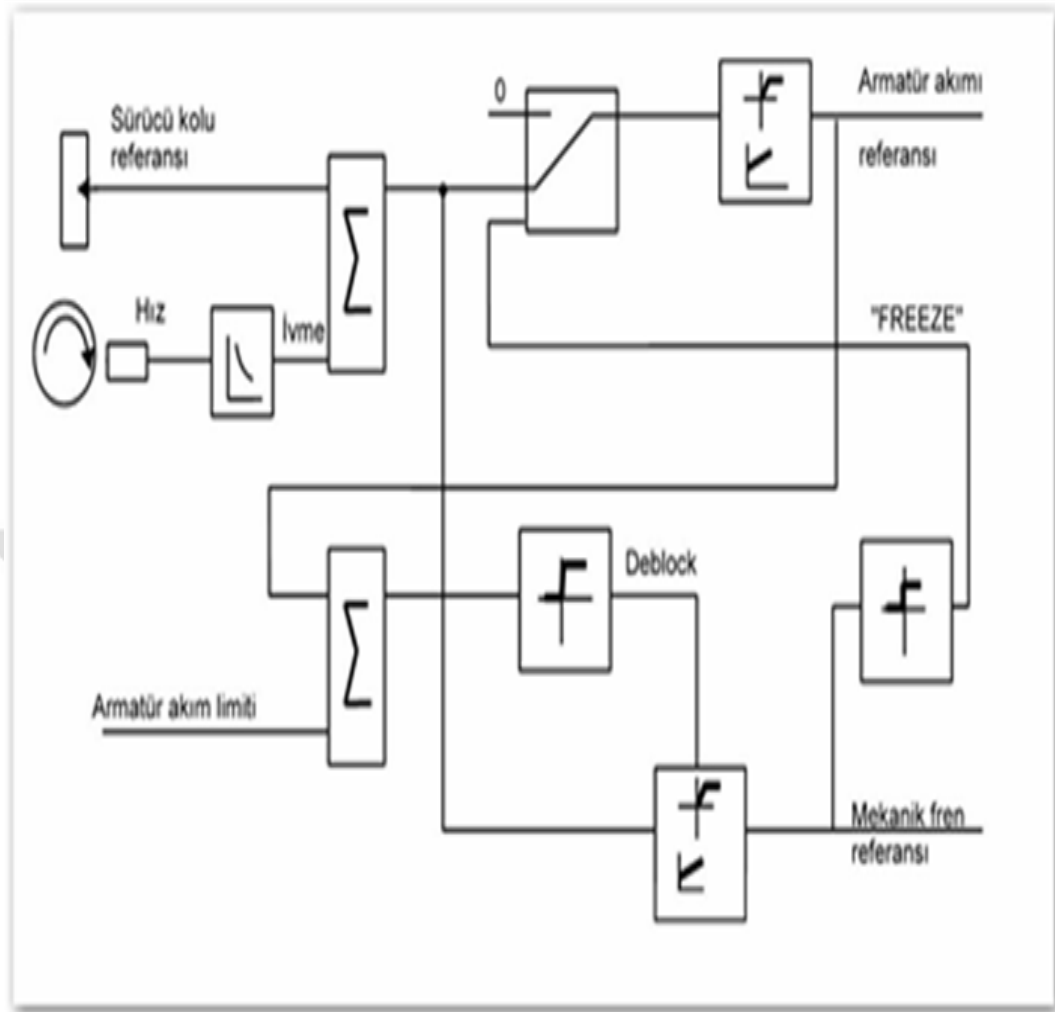
İvmelendirme kontrolünde, ivmelendirme kavramı ivme PI regülâtörü ile kontrol edilir ve sürücüden gelen referansa göre hızın türeviyle karşılaştırılarak PI regülâtörüne gönderilir. İvmelendirme modunda regülâtörün çıkışından alınan armatür akım referansı armatür akım kontrol ünitesine gönderilir. İvme kontrolü için kullanılan hız üçüncü ve dördüncü aksların maksimum hızlarıdır. Bunun sebebi üçüncü ve dördüncü aksların tahrik edilmemeleri nedeniyle serbest olmaları ve bu nedenle de kaymaya sebebiyet vermemesidir. Genel olarak değerlendirildiğinde; ivmelendirme kontrolü bilgisayardaki ivmelendirme kontrol lojjiğiyle oluşturulmuş programla kontrol edilir [28,59].



**Şekil 4.31.** İvmelendirme Kontrolü [28]

#### 4.7.3. Yavaşlatma İvme Kontrolü

Yavaşlatma ivme kontrolü açısından baktığımızda, fren modunda yavaşlatma ivmesi PI regülatörü tarafından kontrol edilir. Sürücüden gelen referans hızın türevi ile karşılaştırılmakta ve PI regülatörüne gönderilmektedir. Frenleme sırasında regülatörün çıkış seviyesi armatür akımını belirler ve bu akımla frenleme armatür akım kontrolünü besler. Bu da izin verilen maksimum akıma ulaşıldığında daha fazla yavaşlama ivmesi gerekiyorsa mekanik frenleme de devreye sokulur [28,29].

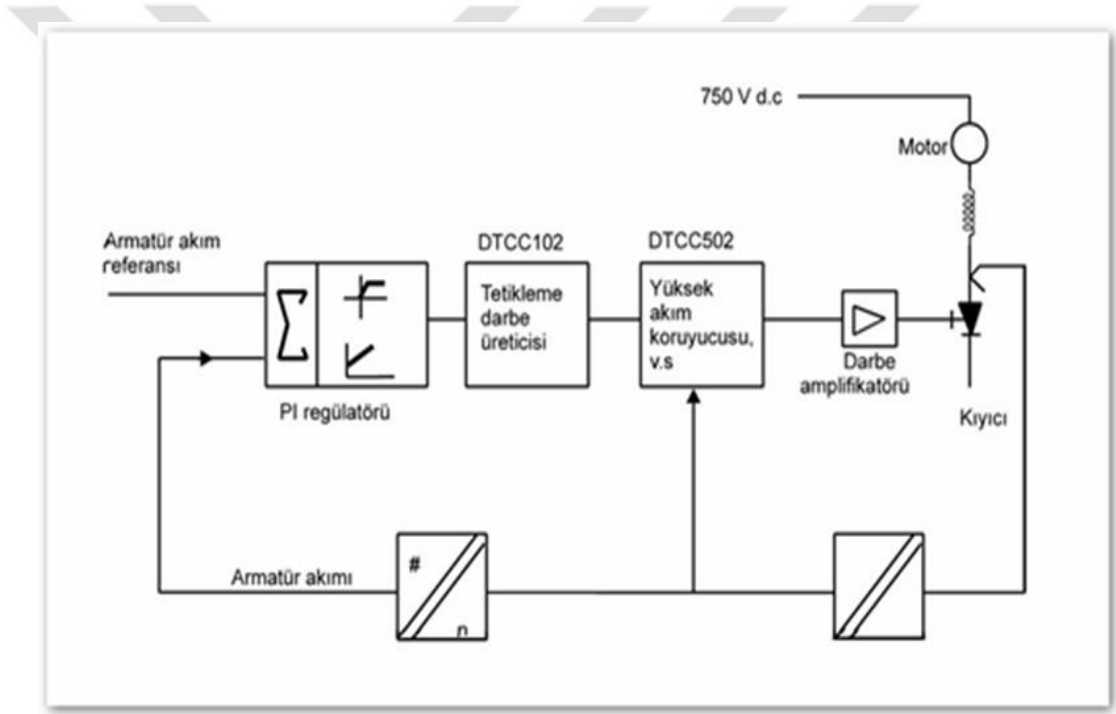


**Şekil 4.32.** Yavaşlama İvmesi Kontrolü [29]

Yukarıdaki şekilde de gösterildiği üzere, yavaşlatma ivmesi kontrolünde debloc sinyali gerçekleşerek mekanik fren kontrolü serbest bırakılır. Mekanik fren referansı sıfırı geçer geçmez freeze sinyali gerçekleşir. Bu sinyal armatür akım referansını sabit tutarak mekanik frenleme referansının tekrar sıfır olmasına kadar sürer. Bunun bu şekilde olmasının nedeni yavaşlamayı kontrol edecek iki regülatörün aynı anda birlikte çalışmasının mümkün olamamasındandır. Bu nedenle elektriksel fren etkili olduğu sürece uygulanır ve ihtiyaç olduğunda mekanik fren devreye sokulur. Mekanik fren devreye girdiğinde armatür akımı sabit tutularak yavaşlama ivmesinin kontrolü için kullanılan hız bütün aksların maksimum hızıdır. Bunun sebebi kullanılan hızın kayan bir akstan gelmesini önlemektir. Yavaşlatma ivmesinin kontrolü bilgisayardaki yavaşlatma lojiji programıyla kontrol edilir [29].

#### 4.7.4. Armatür Akım Kontrolü

Armatür akım ve kontrolünün sağlanmasında, hızlanma ve yavaşlama ivmelerinin kontrolündeki armatür akım referansı armatür akım kontrolüne gönderilir ve ölçülen armatür akımıyla karşılaştırılır. Elde edilen sonuç PI regülatörüne gönderilir. PI regülatöründen gelen çıkış kıyıcıdaki GTO'nun iletme girme süresiyle orantılı olmalıdır. Tetikleme zamanı armatür akım kontrolü ünitesinden gelir ve bu sinyal DTCC 102-A bilgisayar bordundan üretilir. Bu bordtan GTO için tetikleme darbeleri üretilir. Bu tetikleme darbeleri DTCC 502 A borduna gider ve bu bord aynı zamanda aşırı akıma karşı korumayı sağlar [29].



Şekil 4.33. Armatür Akım Kontrolü [31]

Yukarıdaki şekilde; armatür akım kontrolü grafiği göstermiştir. Şekilde de görüleceği üzere; DTCC-502A kartından alınan darbeler kıyıcıdaki GTO'ya bağlanmış olan bir darbe amplifikatörüne gönderilir. Akım kontrolü bilgisayar tarafından aşağıdaki düzende oluşturulur [31]:

**IA12P:** Güç konumunda motor modül 1'de armatür akım kontrolü

**IA34P:** Güç konumunda motor modül 1'de armatür akım kontrolü

**IA12B:** Frenleme konumunda motor modül armatür akım kontrolü

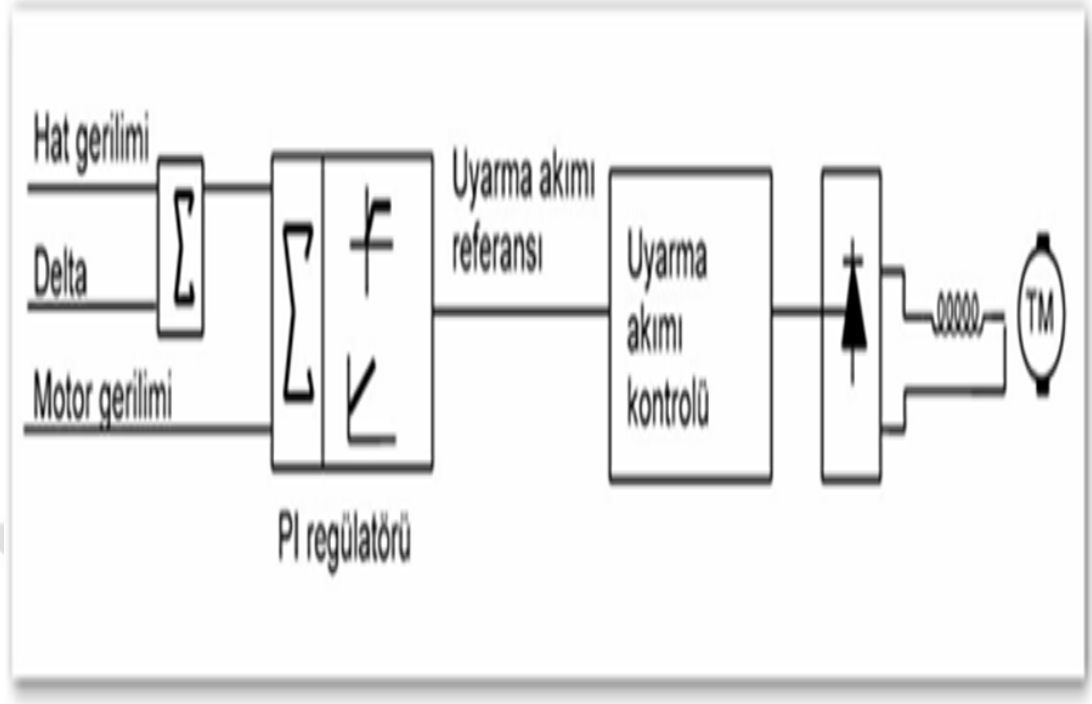
**IA34B:** Frenleme konumunda motor modül armatür akım kontrolü

#### **4.7.5. Motor Gerilimi Kontrolü Uyarma Alanı Kontrol**

Motor gerilim kontrolü uyarma alanı kontrolüne baktığımızda, önceki bölümde belirttiğimiz üzere tahrik motorunun gerilimi motor hızı ve akısıyla orantılıdır. Akı veya uyarma alanı akımı sabit tutularak motor geriliminin hızla birlikte artması sağlanır. Motor geriliminin hat gerilimini geçmesine müsaade edilmemelidir bu nedenledir ki kontrol sistemi motor gerilim kontrol sistemini kapsamı içine alır. Kıyıcı ünitesi tetiklendiğinde kıyıcının çıkış gerilimi uzun bir süre artırılamayacaktır. Motor gerilimi hızla birlikte artar. Dolayısıyla eğer bir sinyal alınmazsa hız da artmayacaktır. Hızın temel hıza kadar artmasına izin verilir. Bu kontrol sistemi uyarma alanının kontrol sistemini de içerir [28,29].

#### **4.7.6. İvmelendirme ve Frenleme Durumunda**

İvmelendirme ve frenleme durumunda ise, motor gerilimi hattın gerilimiyle karşılaştırılır ve elde edilen karşılaştırma değeri PI regülatörüne gönderilir. Eğer motor gerilimi hat gerilimi değerini aşana kadar bir azalma sinyali gönderilerek PI çıkışındaki uyarma akımı referansı azaltılır ve buna bağlı olarak da motor gerilimi azaltılır. Baktığımızda, PI çıkışındaki uyarma akımı referansı uyarma alanı akım kontrolünü besler. Motor geriliminin ivmelendirme ve frenleme konumundaki kontrolü bilgisayar tarafından aşağıdaki sırayla kontrol edilir [32].



**Şekil 4.34.** Uyarma Alanı Güç ve Frenleme Modu Kontrolü [55]

**VC12P:** Motor modülü 1'in motor gerilim kontrolü ivmelendirilme durumunda

**VC34P:** Motor modülü 2'nin motor gerilim kontrolü ivmelendirilme durumunda

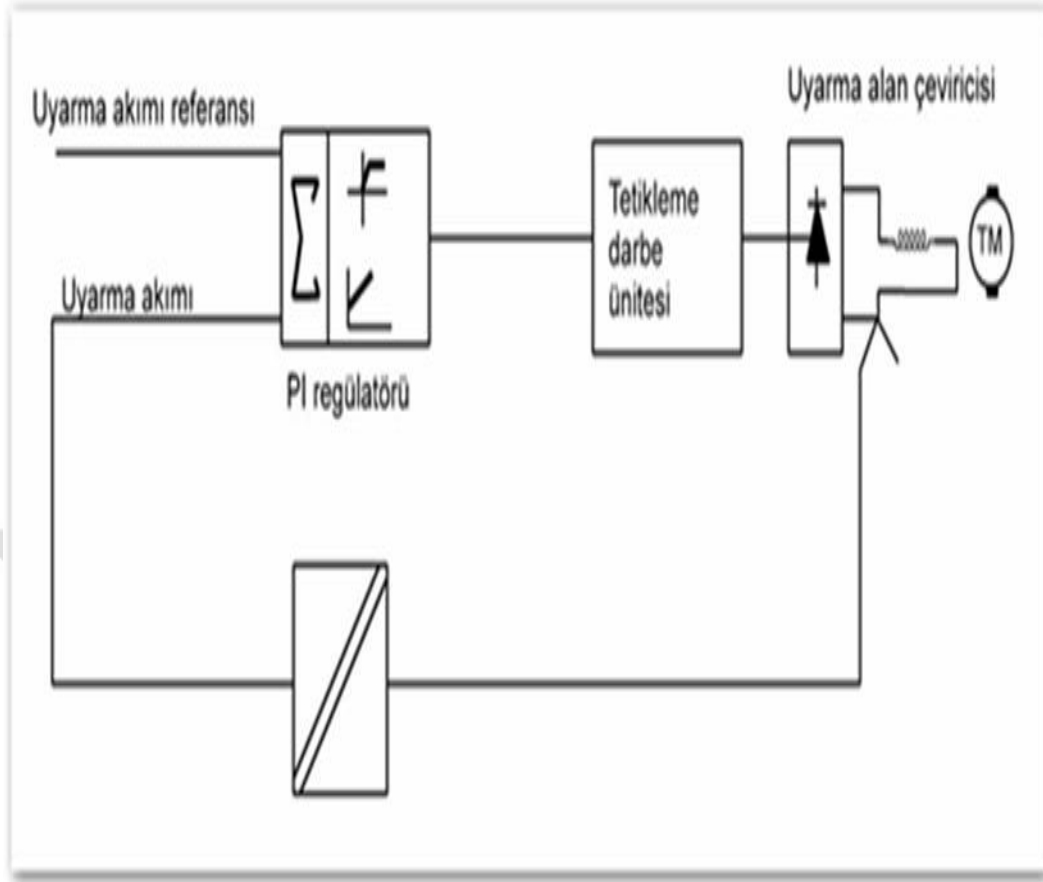
**VC12B:** Motor modülü 1'in motor gerilim kontrolü frenleme durumunda

**VC34B:** Motor modülü 2'nin motor gerilim kontrolü frenleme durumunda

#### **4.7.7. Uyarma Alan Akımının Kontrolü**

Uyarma alanı akımının kontrolüne baktığımızda ise, uyarma akımı kontrolü şekilde de gösterildiği üzere blok şemada da gösterildiği yapılmaktadır. Bu kontrol uyarma alanı çevircisinde bulunan analog yöntem kullanılarak yaptırılır. Bu sistem bilgisayar tarafından yapılmaz. Bunun nedeni ise, uyarma akım referansı bilgisayarın motor gerilimi ve uyarma alanı kontrolü kısmından gelecektir [61,84].





**Şekil 4.35.** Uyarma Alanı Akım Kontrolü [84]

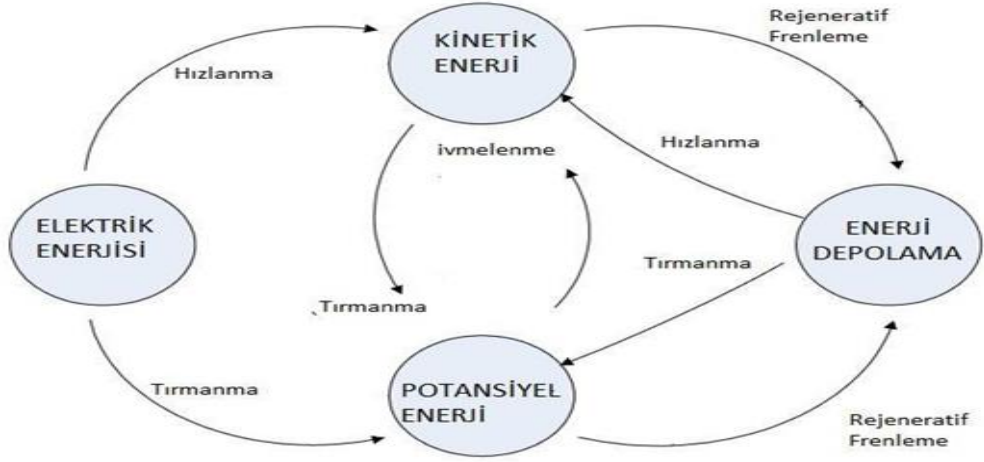
#### 4.8. Faydalı Frenleme Enerjisi Ölçüm Yöntemi

Frenleme sırasında motordan akım çekilerek jeneratör olarak çalışması sağlanmaktadır. Motorların frenleme yapabilmesi için moment yönlerinin değiştirilmesi gerekmektedir. GTO'dan sadece bir yönde akım akabileceği için momentin çarpımdaki diğer bileşeni olan uyarma akımının yönü değiştirilmelidir [84].

## 5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Enerjide istenilen başlıca nitelikler sürekli, kaliteli ve ucuz olmasıdır. Süreklilikten kasıt istenildiği anda hizmet vermeye hazır olması, kesintiye uğramadan üretimde ve hizmetlerde büyük kayıplara sebebiyet vermemesidir. Elektrik tesislerinde enerji depolama sistemi denilince enerjiyi istenilen niteliklerde depolayan, enerji kesintisi ya da enerji niteliğinin bozulması durumunda istenilen nitelikte enerjiyi kullanıcıya sağlamaya yardımcı olan tesisler akla gelmektedir [67].

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde frenleme sırasında dirençlerde ısıya dönüştürülerek harcanan kinetik enerji, tasarlanacak uygun enerji depolama sistemleri ile elektriğe geri dönüştürülebilir ve bu sayede sistemin enerji hareketliliği ciddi miktarda arttırılabilecektir. Enerji depolama elemanları hat boyu istasyon veya araç üstü olarak uygun bir yere monte edilebilir [20,39].



**Şekil 5.1:** Enerji Depolama Sisteminde Enerjinin Çevrim Şeması [20]

Enerji depolama sistemlerinde uygulama yeri ve özelliklerine göre değişik depolama tekniklerinden bahsedilebilir [20].

- Hidrolik güç depolanması
- Basıncılı hava ile enerji depolanması sistemleri
- Bataryalar
- Yakıt Hücreleri
- Süper iletken manyetik enerji depolayıcıları

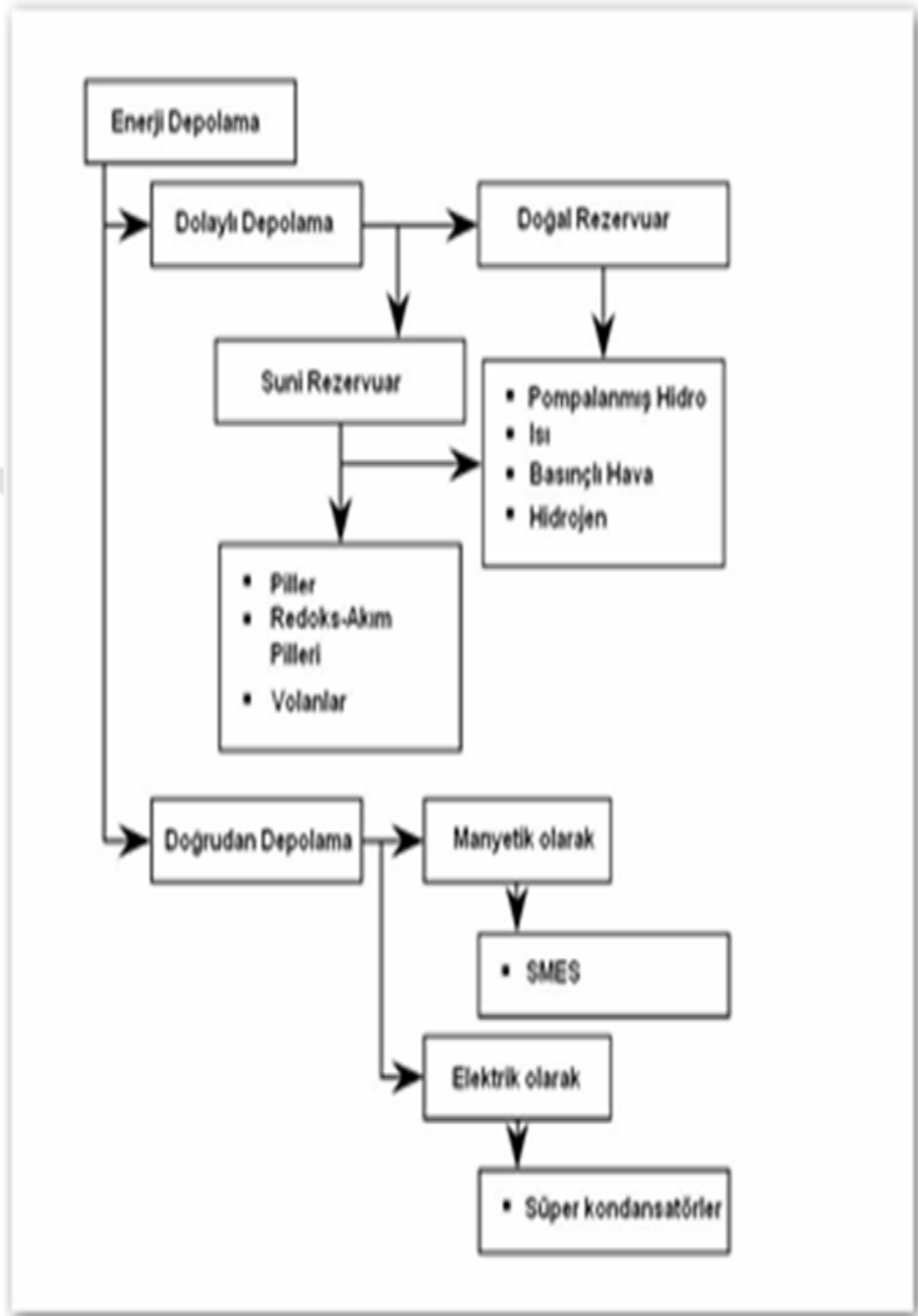
- Volanlar
- Metal film ve alüminyum elektrolitik kondansatörler -Süper kapasitörler

### **5.1. Enerji Depolamanın Nedenleri**

Elektrik tesislerinde enerji depolama sistemleri denilince enerjiyi istenilen niteliklerde depolayan, bu niteliklerin bazılarının kaybolması veya kesintiye uğraması halinde ise, kullanıcıya istenilen niteliklerde enerji sağlanmaya devam edilmesinde yardımcı olan sistemler akla gelmektedir. Enerjide istenilen başlıca nitelikler, sürekli, ucuz ve kaliteli olmasıdır. Süreklilikten kasıt, istenildiği anda hizmet vermeye hazır olması, kesintiye uğrayıp, üretimde ve hizmetlerde çok daha büyük kayıplara sebebiyet vermemesidir. Kaliteli olması gerilim ve akımlarda salınım ve harmonikleri içermemesi demektir. Bu tür şebeke problemleri, bilindiği üzere, özellikle elektronik cihazlar üzerinde daha çok etkili olmakta, arızalanmalarına ve devre dışı kalmalarına, hasar görmelerine sebep olmaktadır. Bu tür şebeke kaynaklı gerilim dalgalanmaları ve problemleri neticesinde devre dışı kalan cihazın arıza bakım masraflarının ötesinde belki de çok daha büyük bir problem, ticari değere sahip hizmet ve üretim sektöründe yol açtığı kayıplardır [18,54,65].

### **5.2. Mevcut Enerji Depolama Teknolojileri**

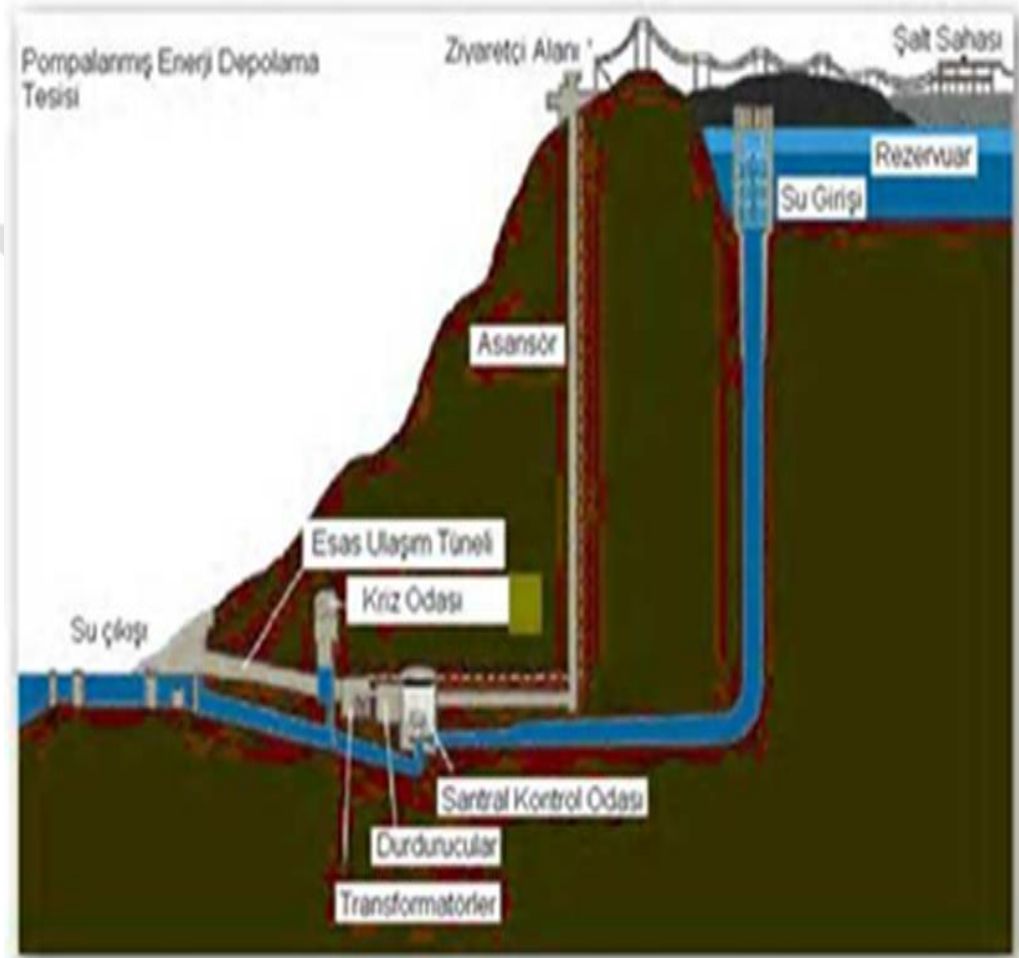
Enerji depolaması konusunda uygulama yeri ve özelliklerine göre değişik şekilde depolama teknolojileri vardır. Sırasıyla bu teknikler incelenecektir. Enerji depolama sistemleri elektriğin doğrudan veya başka enerjilere çevrilerek depolandığı yöntemlere göre temelde ikiye ayrılır. Doğrudan depolama elektrik alanda depolama yapan kondansatörler ve manyetik alanda depolama yapan süper iletken bobinler vasıtasıyla yapılır. Dolaylı depolamada ise elektrik enerjisi pillerde önce kimyasal enerjiye, volanlarda kinetik enerjiye, pompalanmış su tesislerinde potansiyel enerjiye, basınçlı hava ile depolama sistemlerinde mekanik enerjiye, ısı enerjisine dönüştürülür sonra da ters işlemle elektrik enerjisine geri kazanılır [49,75].



Şekil 5.2. Enerji Depolama Sistemleri [35]

### 5.2.1. Hidrolik Güç Depolanması

Hidrolik güç depolanmasına bakıldığında, bu sistem, 1929 yılından beri uygulamada olmakla beraber ticari olarak 1970 yılından itibaren kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekilde hidrolik güç sistemlerinin depolamasının blok şemasının gösterilmiştir [22].



**Şekil 5.3.** Hidrolik Güç Depolanması Blok Şemasının Gösterimi [68]

Sistem yapı itibarıyla, hidrolik gücün potansiyel enerji formunda saklanması için iki adet depodan oluşmaktadır. Depolardan biri zemin seviyesinde diğeri ise daha yüksek bir seviyede tutulmaktadır. Baktığımızda, depolanan enerji miktarı depo hacmi ve yükseklik yani net düşümü ile orantılıdır. İlke olarak, enerjinin ucuz olduğu saatlerde su, jeneratörlerin yani senkron makinelerin motor olarak çalıştırılmasıyla bir üst seviyedeki depoya basılmakta ve potansiyel enerji olarak saklanmaktadır. Enerjinin pahalı olduğu saatlerde depolanan su, tersine bir akışla senkron makinelerin jeneratör olarak çalışmalarıyla kinetik enerjiye, oradan da elektrik enerjisine

dönüştürülmektedir. Böyle bir sistemin iki açıdan faydası vardır. Birincisi, pahalı enerjiden tasarruf, ikincisi ise pik yük talebi nedeniyle ihtiyaç duyulan ekstra tesis kapasitesine cevap vermek, yatırım ve işletme maliyetlerine katkı sağlamaktır.

Galler'de 1976 ve 1982 yılları arasında inşa edilmiş olan Dinorwig Enerji Santrali bu konuda dünyada en iyi bilinen örneklerden biridir. Santral her biri 317MW enerji üretme gücüne sahip altı adet pompa veya türbin grubu ihtiva eder. 600m yüksekte depolanan altı milyon metre küp su 1800MW'lık bir güç üretme kapasitesine sahiptir. Bu konuda dünyada en büyük pompa veya türbin denilen grubu 337 MW gücüyle Çin'de Tianhuanping Santralidir. Tianhuanping Santralinin ek rezervuar kot farkı ise 50 metredir. Bu amaçla geliştirilen pompa veya hidroelektrik türbinlerin tam güçle yüklenmeleri on saniye gibi kısa bir sürede gerçekleşebilmektedir.

Öyle ki tam yükte şebekeye girmeleri için toplamda bir dakikalık süre bile yeterli olmaktadır. Büyük ölçekli enerji depolama yöntemleri içerisinde en etkin olanı pompalanmış hidroelektrik güçtür. En büyük enerji depolama kapasitesine (>200 0 MW) sahip olması yanında, uzun süreyle depoladığı enerjiyi saklayabilme özelliğine de sahiptir. Kaldı ki tipik bir tesis depolamış olduğu enerjiyi yarım yıldan daha uzun bir süre saklayabilmektedir. Hızlı devreye girebilme özellikleri sayesinde ani talep değişiklikleri gibi durumlarda yedek güç olarak kullanışlıdır. Göreceli olarak basit yapıları ve büyük ölçekli olmaları, birim enerji başına işletme maliyetleri diğer teknikler içinde en ucuzu olmalarını sağlamaktadır. Fakat işletme maliyetlerinin az olması yanında, genelde bu tip tesislerin ilk kuruluş maliyetleri baraj ve devasa yeraltı boru inşası nedeniyle oldukça yüksek olmaktadır. Depolanmış hidroelektrik enerji sistemlerinin olumsuz yanları da vardır

En temel sorunu özel coğrafi koşulları gerektirmesidir. İki yeterince büyük ve aralarında kot farkı bulunan, yapı maliyetlerinin ekonomik olacağı rezervuar alanının bulunması gereklidir. Bu tip coğrafi bölgeleri bulmak zordur. Bulunsa bile genelde kırsa bir alanda, yapı maliyetlerini artıran ve enerji şebekesi bulunmayan bölgelerdedir. Baktığımızda, depo yapımını zorlaştıran kısıtlar arasında ayrıca çevre koşullarını, yüksek yapım maliyetlerini, uzun süren inşaat dönemini saymak mümkündür. Genel olarak değerlendirildiğinde ise, 1997 yılında tüm dünya genelinde

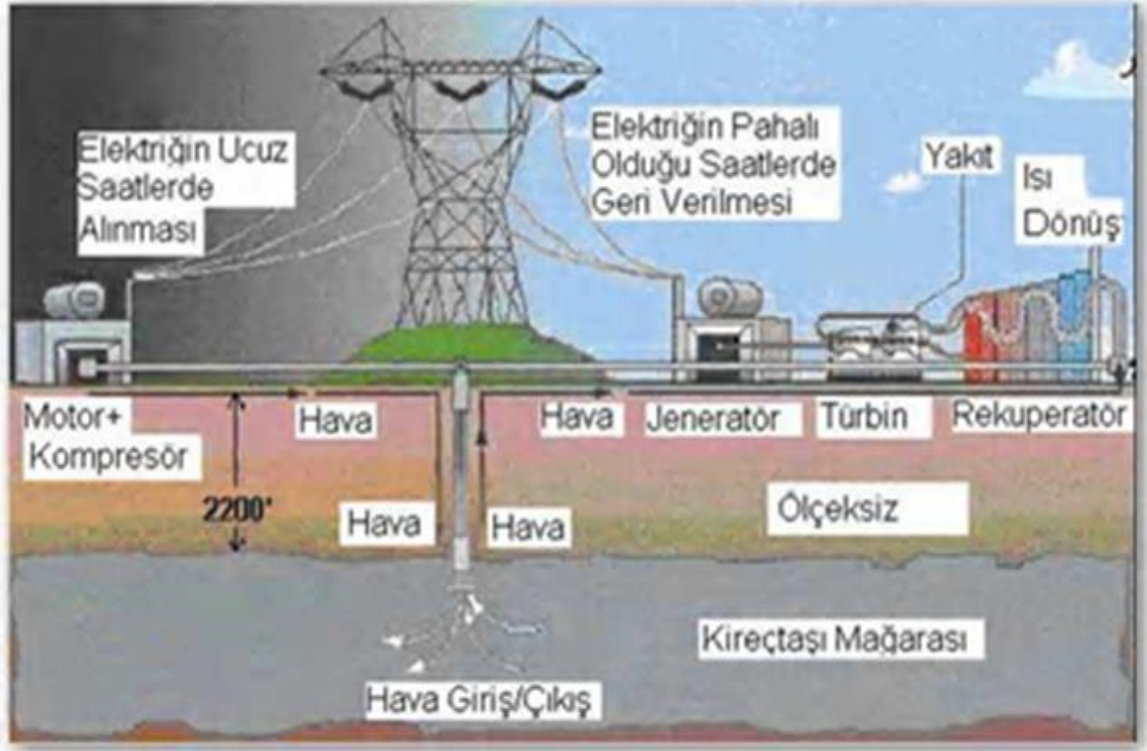
290 adet pompalanmış hidroelektrik enerji depolama santralının toplam enerji üretim gücü 82.8 GW olmuştur. Baktığımızda ise, 25 adet santral da yapım aşamasındadır denilebilir.

Ülkemiz açısından bakıldığında ise, 2019 yılı itibariyle toplam elektrik kurulu gücünün 90,420 GW olduğu dikkate alınacak olursa, bu değer oldukça büyük olduğu anlaşılacaktır. Genel olarak değerlendirildiğinde, 1998 yılında ise Japonya toplam enerji üretiminin %10'unu bu tip santrallerden karşıladığı söylenebilir. Günümüzde mevcut yer üstü rezervuara sahip tesisler den kaynaklanan sıkıntıları önlemek için artık yeraltında depo yapılması konusunda artan bir yönelim vardır. Bir diğer husus da düşük seviye rezervuar olarak denizi kullanmaktır. Fakat ekipmanlara yapacağı aşındırıcı etki gibi deniz suyunun tuzluluğundan kaynaklanan sorunların üstesinden gelme konusu hala aşılması gereken teknik bir sorun olarak çözüm beklemektedir [11].

### **5.2.2. Basınçlı Hava ile Enerji Depolama Sistemleri**

Basınçlı hava ile enerji depolanma sistemlerinde, CAES santralleri, pik saatler dışında şebekeden aldıkları talep fazlası enerjiyle sıkıştırdıkları havayı büyük, derin ve sızdırmaz mağaralarda ya da kullanılmayan tuz madenleri ve özellikle bu amaçla oluşturulmuş kaya galerilerinde depolarlar. Pik saatlerde artan talebi karşılamak için sıkıştırılan hava açığa salınır. Isınan hava genişler ve elektrik üretmek üzere bir türbinden geçirilir.

Basınçlı hava ile enerji depolamada, caes için kayaçlara mağara açma maliyeti tuz mağaralara göre %60 daha pahalıdır. Bu nedenle de en ucuz yöntem depo haznesi olarak doğal yeraltı yapılarını kullanmaktır. Diğer bir yaklaşım basınçlı havayı bir tank içerisinde saklamaktır. Bu maksatla çok yüksek basınca dayanıklı çelik tanklar imal edilir. Fakat günümüz teknolojisi ile bu tip tankları uygun fiyatla imal etmek mümkün olmamaktadır. Ayrıca böyle sistemler ölçek olarak çok daha küçük sistemlerdir [50].



Şekil 5.4. CAES Sistemi Elemanlar Gösterimi [50]

Enerji üretim çevriminde basınçlı havanın serbest bırakılarak jeneratörü tahrik etmesi yanında daha çok tercih edilen yöntem ise, basınçlı havanın doğal gaz ile karıştırılarak konvansiyonel türbin santrallerinde olduğu gibi yakılmasıdır. Bu yöntem basınçlı havanın daha az enerji kaybetmesini sağlayacağı için daha verimli bir yöntemdir. Bu yöntemde süreç şöyle çalışır. Caes sistemlerinde bir motor ile tahrik edilen kompresörler basınçlı hava için kullanılan depoda yani mağara, maden, tank ve benzeri enerjiyi basınçlı hava olarak depolarlar. Baktığımızda, sıkıştırma işleminde enerji talebinin üretimden daha az olduğu periyotlarda yapılır. Sıkıştırma işlemi öncesinde depolama haznesinden daha fazla faydalanabilmek için hava önce soğutulur. Sonra yaklaşık 75 bar basınçla sıkıştırılır. Sıkışmış hava yeniden elektrik üretmek için dışarı salınır, fakat öncelikle ısı dönüştürücüde ısıtılır. Genel olarak değerlendirildiğinde, dönüştürücü bu işlem için kompresör soğutucularının atık ısısından yararlanır. Isınan hava yakıcıda yakılmadan önce az miktar petrol veya gaz ile karıştırılır. Yakıcıdan ısınarak çıkan gaz genişler ve jeneratör türbinini döndürerek elektrik üretilmesine neden olmaktadır. Caes ünitelerine baktığımızda, daha çok içten yanmalı kombine çevrim santralleri için ekonomik olmaktadır. Dünyada sadece iki tane büyük ölçekli



Caes enerji üretim santrali vardır. Bunlardan ilki 1991 de Amerika Birleşik Devletleri'nde Alabama'da devreye alınan 110 MW gücündeki tesis ve Almanya Huntorf da bulunan 290 MW güce sahip tesistir. Bunlardan başka günümüzde 5–350 MW arası kullanımda olan tesisler de mevcuttur. [48].

### **5.2.3. Bataryalar**

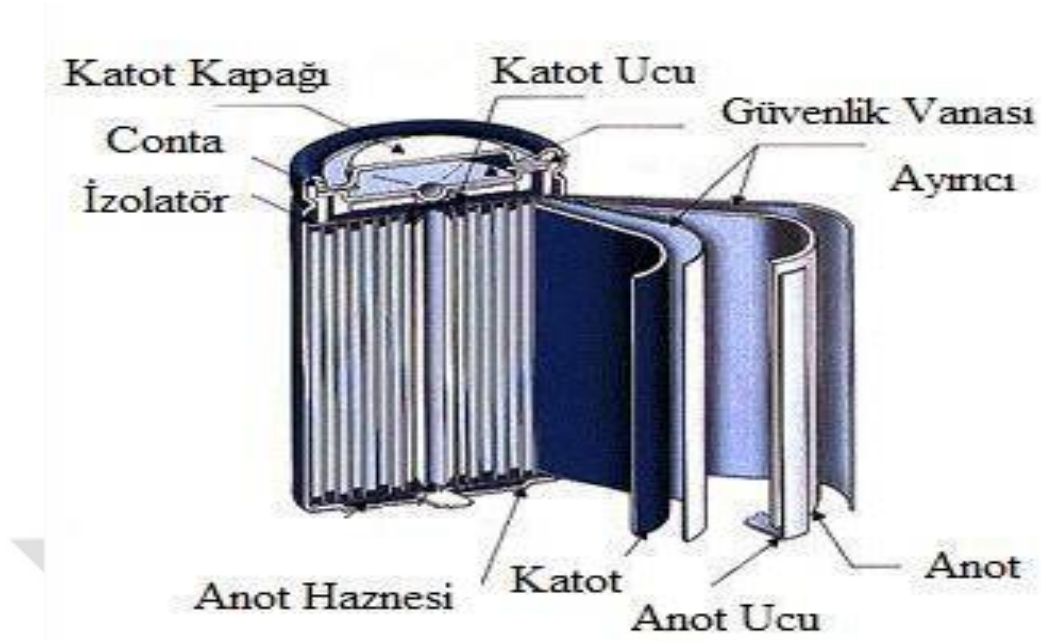
Bataryalar günümüzde portatif elektrik elektronik aletlerinden aydınlatma elemanlarına, iletişim araçlarından raylı sistemlere kadar birçok alanda 100 yılı aşkındır kullanılan elektrik şebekesine bağımlılığı azaltan güç kaynaklarıdır. Kullanım açısından avantajları şu şekilde sıralanabilir [22,25].

- Basit yapıda olmaları
- Kolay kullanım ve az bakım ihtiyacı
- Yüksek enerji yoğunluğu
- Uygun fiyat ve uzun raf ömrü

#### ***Lityum Bataryalar***

Lityum bataryalar ilk defa 1970'li yıllarda piyasaya çıkmıştır. Suda batmayan en hafif metal olan lityum çok yüksek elektrokimyasal potansiyele sahiptir. Yüksek enerji ve güç yoğunluklarında çalışabilmektedir. Dolayısıyla yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilmektedirler. Hızlı şarja uygundur ve on yıla kadar kapasitelerini korurlar [22].

***Lityum-iyon Bataryalar:*** Yüksek oranda reaktif özelliklere sahip li-ion bataryalar uzun ömürlü ve mükemmel deşarj performansına sahiptirler. Yüksek akımlarda çalışabilirler. Enerji depolama alanında geniş bir uygulama aralığında kullanılmaktadırlar.



Şekil 5.5. Lityum-İyon Batarya İçyapısı [14]

- **Lityum-iyon Polimer Bataryalar:** Lityum-iyon polimer bataryalarda sıvı yoktur, bu yüzden yapılarında koruyucu bir tabaka yoktur. Katı durum pilleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Birçok farklı boyutta tasarlanabilirler [41].

#### ***Nikel Kadmiyum Bataryalar***

Nikel kadmiyum bataryalara bakıldığında, küçük boyutlu ve yüksek deşarj kapasitesine sahip bu bataryalar düzgün deşarj karakteristiğine sahiptirler. Batarya kapasitesi tümüyle kullanılabilir, şarj esnasında ısınma olmaz ve yüksek kapasitelerde bulunabilir. Genel olarak baktığımızda, nikel kadmiyum bataryalar, 2003 yılında Golden Valey Elektrik firması tarafından 27 MW'lık bir depolama sistemi bu bataryalar kullanılarak yapılmıştır. 2010 yılında Bonaire adalarındaki rüzgâr santrallerine 3MW'lık enerji depolama sistemi kurulmuştur [41].

#### ***Sodyum Sülfür Bataryalar***

Sodyum sülfür bataryalara bakıldığında bu bataryaların, sodyum ve sülfür yapılı erimiş metal bataryaların bir türüdür. Bu tip bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek enerji verimliliğine yani; şarj veya deşarj %89-92 sahiptir ve uzun ömürlüdür. Lakin sodyum polisülfürlerin aşındırıcı doğası ve çalışma sıcaklıkları (300-350 C) nedeniyle

bu tip pillerin öncelikle büyük ölçekli mobil olmayan uygulamalarda kullanımı daha uygundur [25].

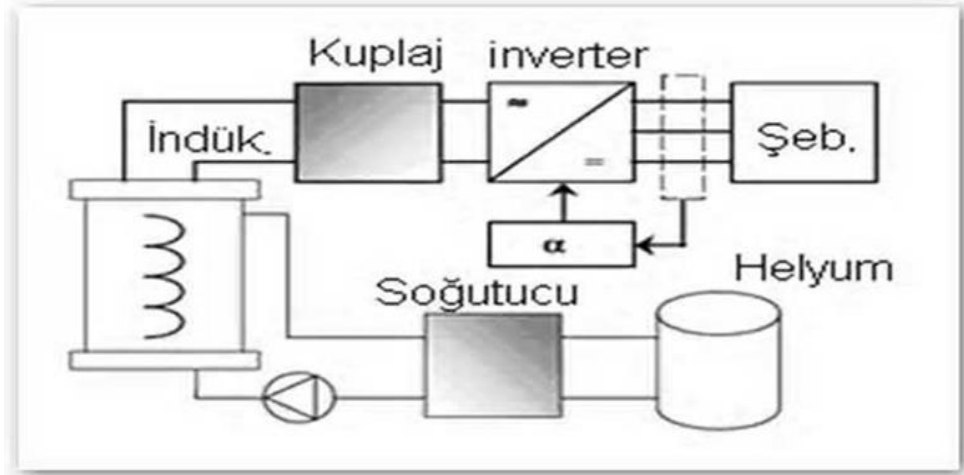
#### **5.2.4. Yakıt Hücreleri**

Yakıt hücrelerinin geçmişi bataryalardan daha eskidir. İlk olarak İngiltere'de Grove tarafından 1839'da hidrojen oksijen hücre prensibi tanıtılmıştır. Bataryalar gibi elektrokimyasal enerji depolama cihazları değildir. Çünkü onlar yakıt ve yakıcılarını bünyelerinde yoktur. Bunun yerine bu iki kimyasal depo edildikleri harici bir kaynaktan sürekli olarak alırlar [72].

#### **5.2.5. Süper İletken Manyetik Enerji Depolayıcıları**

Soğutma sistemlerinin kontrolü ve çalışılması ile ilgili teknolojilerdeki gelişmeler SMES sistemlerinin hızlı bir şekilde piyasaya girmesine ve kullanımda olan diğer depolama sistemlerinin rakibi haline gelmelerine neden olmuştur. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemlerinde ana yapı üç temel unsurdan oluşur. Bobin, bağlantıları ve soğutma tankından oluşan soğuk komponentler soğutma ünitesi ve şebekeye bağlantısı yani güç elektronik dönüştürücüdür. Bobin, bağlantıları ve soğutma tankından oluşan soğuk komponentler, soğutma ünitesi ve şebekeye bağlantısı yani güç elektronik dönüştürücüdür.

Bakıldığında, emes sistemleri enerjiiyi, çok yüksek bir şekilde yalıtılmış bir şişede bulunan sıvı helyum gibi çok soğuk bir sıvı içerisine batırılmış süper iletken manyetik bir bobin ile depolar. Enerji bobin içinden doğru akım geçirilerek manyetik alan oluşturulmasıyla depolanmaktadır. Yüksek sıcaklık süper iletkenlerle ise sıvı nitrojen kullanılmaktadır. Süper iletken manyetik bobinlerin dirençleri 0'dır, bu yüzden elektrik akımı bir kez akmaya başladıktan sonra zamanla azalmayacaktır [77,78].



**Şekil 5.6.** Süper iletken Manyetik Alan Enerji Depolama Sistemi Basit Blok Diyagramı [24]

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere, smes sistemlerinin 700-1000\$/kg aralığında maliyetleri vardır. Bu sistemler çalışmada incelenen teknolojiler içinde en yüksek güç değerlerine sahip olan sistemlerdir. Öte yandan smes sistemleri, incelenen teknolojiler içinde yakıt hücrelerinden sonra en pahalı ikinci teknolojidir. Smes sistemlerinin maliyetleri kabaca %10'u soğutma, %30'u smes bobinine ve %60'ı güç dönüşümünden oluşur. Smes sistemlerin neredeyse sınırsız şarj deşarj döngüsü vardır.[24].

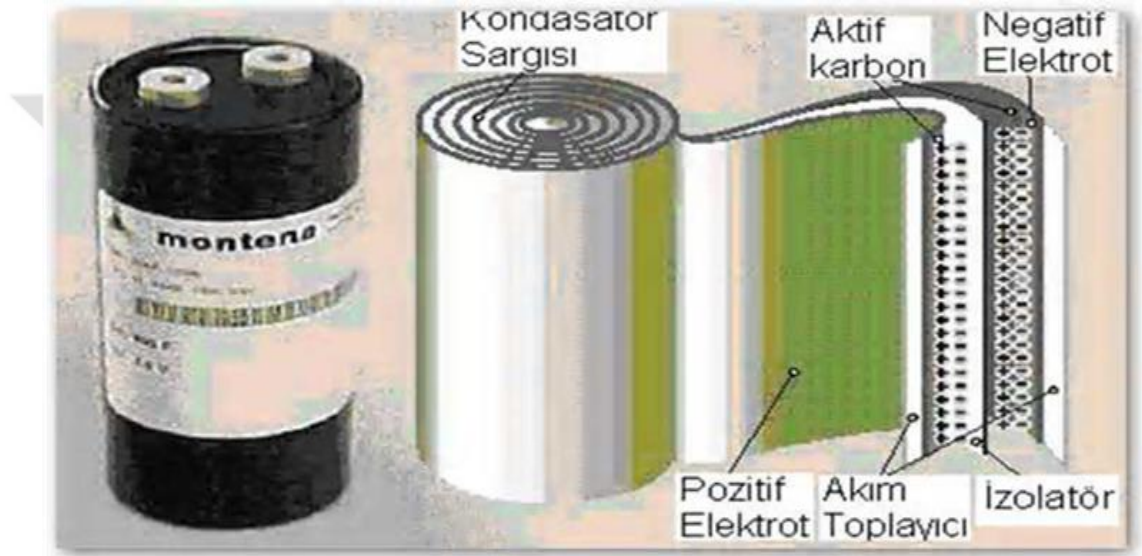
Bu sistemler herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadan veya yüksek verimlerini düşürmeden (>%95) tamamen deşarj olabilirler. Ayrıca özgül güç kapasiteleri açısından da tam olarak iki yönlüdürler. Yani hem şarjda hem de deşarjda aynı değeri gösterirler [10].

### 5.2.6. Metal Film ve Alüminyum Elektrolitik Kondansatörler

Bu cihazlar elektrik enerjisini plakaları arasında oluşturdukları elektrik alanda depo ederler. Elektrik alanda tutulan enerji, eşitliğine göre değişmektedir. Metal film kapasitörler basitçe aralarında kuru bir dielektrik madde olan iki metal plakanın rulo şeklinde sarılıp bir hazne içerisine yerleştirilmesiyle yapılırlar. Çok düşük iç empedansları vardır ve bu nedenle de çok yüksek yani 1 TW/m<sup>3</sup> güç yoğunluklarına ve özgül güç yani 100 kW/kg-1MW/kg değerlerine sahiptirler. İçlerindeki dielektrik malzeme elektrolitik bir işlemle oluşturulduğu için elektrolitik kapasitör olarak adlandırılırlar [20].

### 5.3. Süperkapasitörler

Süperkapasitörler, elektrokimyasal kapasitör, ultra kapasitör, çift katmanlı elektrik kapasitörler olarak da adlandırılmaktadır. Elektrikli cihaz uygulamalarında kullanılan ilk enerji depolama tekniklerinden biridir. Bir süperkapasitör elektrokimyasal bir cihaz olmasına rağmen, bünyesinde pillerdeki gibi kimyasal bir reaksiyon olmadığı için enerjii elektrokimyasal değil elektrostatik olarak depolar. Bir süperkapasitör hem bir batarya ve hem de bir kondansatördür [3,32].



Şekil 5.7. Süper Kapasitörlerin İç Yapısı Gösterimi [85]

Süper kapasitörler iki sınıftır; elektrokimyasal kapasitör ve çift katmanlı kapasitörlerdir. Çift katmanlı kapasitör çift katman mekanizmasına dayanır ve bu aktif karbonun elektrot yüzeyi veya karbon fiber ve elektrolitik çözümü arasındaki ara yüzdeki şarjların ayrılması sonucudur. Çift katmanlı kapasitörleri de simetrik ve asimetric olmak üzere iki kısma ayırabiliriz. Simetrik dizaynda pozitif ve negatif elektrotların aynı yüksek yüzeyli karbondan yapılmıştır. Asimetric dizaynda ise elektrotlar farklı materyallerden oluşmaktadır [85].

Elektrokimyasal kapasitörler hızlı Faradayoksidasyon ve redüksiyon reaksiyonuna dayanır. Metal oksit süper kapasitörler ve iletken polimer süper kapasitörlerden oluşur. Elektrot yüzeyinde oluşan ters çevrilebilir. Redox reaksiyonunun veya elektrot potansiyeline bağlı olarak kapasite üretmek için hepsini kullanırlar. Kapasiteleri temelde aktif elektrot malzemesinin uygulamalarına dayanır. Bakıldığında, klasik

kapasitörlerin güç yoğunlukları çok yüksektir yani yaklaşık olarak  $1012\text{W}/\text{m}^3$ 'dür. Fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür bu bağlamda yaklaşık olarak  $5\text{Wh}/\text{m}^3$ 'dir. Klasik kapasitörler genel olarak elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Süper kapasitörler ise klasik kapasitörlerin geliştirilmiş olanlarıdır [3].

Bu kondansatörlerin güç yoğunlukları  $106\text{W}/\text{m}^3$  ve enerji yoğunlukları  $104\text{Wh}/\text{m}^3$  değerindedir. Enerji yoğunlukları az fakat deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha yüksektir. Tam deşarjın yaklaşık 1-60s boyunca gereken durumlar için uygun kaynaktır. Bundan dolayı süperkapasitörler depolama cihazları olarak kısa dönem ile uzun dönem enerji depolama cihazları arasındadırlar ayrıca süperkapasitörler  $100\text{kW}$ 'a kadar güç geçişini sağlayabilen tek uygulanabilir malzemedir [85].

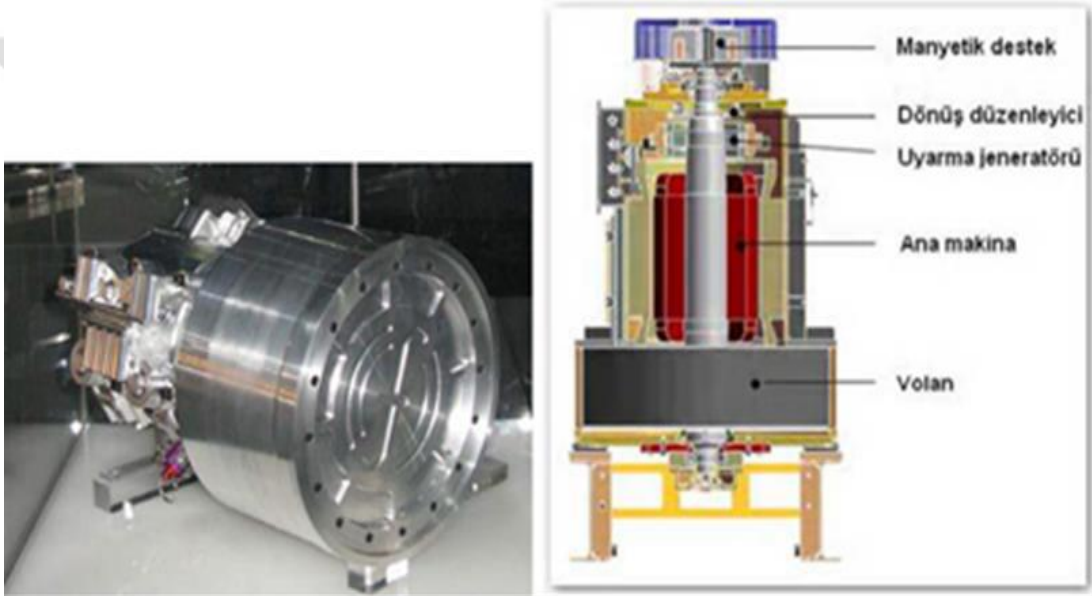
Genel olarak bakıldığında, süper kapasitörler tamamen tek yönlü olup uzun ömürlüdür. Fakat kapasitörlerin asıl olarak boyut problemleri vardır. Kapasitörlerin kapasitesi ve dielektrik malzeme arasında lineer bir bağlantı vardır. Bu yüzden büyük kapasite gerekli olduğunda zorunlu olarak dielektrik malzeme de büyük olmak durumundadır. Süperkasitörler yapıldıktan sonra çok büyük kapasiteler gayet küçük boyutlardaki kapasitörlerle yüksek enerji depolamaya elverişlidir [88].

#### **5.4. Volanlar (Fly Wheel)**

Temel, basit volanların kullanımı ile kinetik enerji depolanması uzun yıllardır uyguladığı bilinir. Volan, mekanik sistemlerde darbeli çalışan yüklerde, tahrik gücünün fazla olduğu periyotlarda fazla enerjiyi üzerine alır, yük talebinin arttığı periyotlarda bu enerjiyi yüke aktararak dengeleme yapar. Özellikle doğrusal hareketin dönme hareketine çevrildiği mekanik tahrik sistemleri için idealdir. Bundan dolayı volan, mekanik bir batarya görevi üstlenmektedir.

Günümüzde önemli bir tekniktir çünkü yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin ve düşük kayıplı rulmanların geliştirilmiş olmalarıdır. Volanlar günümüzde, iki ana amaca hizmet için kullanılmaktadır. Bunların birincisi ve en eskisi, volanın kütlelerinden yani ataletinden faydalanarak, depoladığı enerjiyi, mekanik olarak bağlı olduğu hareket sisteme aktarmaktadır. Bu sistemler özellikle içten yanmalı motorlar,

barajlarda kullanılan jeneratörleri gibi, titreşimleri, düzensiz girdileri ve ani hız değişimlerini, düzenlemek ve yumuşatmak amacıyla kullanılmaktadırlar. İkinci amaç ise, son yıllarda teknolojiye gelişmelere paralel olarak yaygınlaşan ve önemi artan volanların, akü, ultra kapasitörler gibi, kinetik enerjinin elektrik makinesi yardımıyla, elektrik enerjisi olarak depolanmasıdır. Birinci örneğe göre en büyük fark, bağlantının mekanik değil elektrikseldir. Bu yöntemde, volan ataletinin önemi, birinci yöntemdeki amaçların dışında olduğu için, daha azdır. Şekilde de görüleceği üzere, modern yüksek hızlı volan sistemi verilmiştir.



**Şekil 5.8.** Volanlar [56]

Volanların mobil ulaşım sistemlerinde uygulanması İkinci Dünya Savaşı sonrasında Avrupa’da ortaya çıkan petrol kıtlığı sorununa çözüm olarak geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Modern volan örneklerinden biri 1953’ten 1960 yılına kadar İsviçre’de hizmet veren Gyrobus isimli otobüstür. 1990’lı yıllarda Rosen Motors firması genel kontrüksiyonu titanyum, karbon veya fiber alışımdan meydana gelen ve dakikada 50.000 devirden daha fazla hıza ulaşabilen volan geliştirmiştir. Benzer bir şekilde Nasa uzay mekikleri ve uydularda kullanılmak üzere 2004 yılında 50.000 dev/dk hıza ulaşabilen güneş enerjisini kinetik enerji olarak depolayıp gerektiğinde elektrik enerjisine çeviren volan tasarlamıştır.

Genel olarak baktığımızda aslında, 2011 yılında Formula-1 yönetmeliğinde frenleme enerjisinin geri kazanıma izin verilmiş ve Kinetik Enerji Geri Kazanım Sistemi adı

verilen 60kW gücüne varan volan mekanizması kullanılarak motor verimliliğinin geliştirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Volanlar, döner kütle elemanının malzemesine göre iki grup altında sınıflandırılabilir. Bu malzemeler çelik veya kompozit elemanlardır. Demir malzemedeki yapılanlar geleneksel tipte yapılan ve ilk örnek volanlardandır. Demir malzeme ile yapılan volanlar düşük hızda çalışırlar, genelde 8000rpm'e kadar kullanılırlar. Bu tip volanlarda depolanan enerji, rotorun momentumuyla orantılı değil, açısal momentumun karesiyle orantılıdır.

Baktığımızda, diğer malzeme türü olan kompozitler ise yeni nesil yüksek hızda çalışan volanlarda kullanılırlar. 25000-90000 rpm hızlarına dönecek şekilde tasarlanmaktadır. Yukarıda kullanım alanlarından verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere geçmişte çok eskilere dayanan bu depolama sistemi yüksek hızda dayanabilen malzemelerin gelişmesiyle günümüzde kullanımı yükselişe geçmiştir [2,3,57].

#### **5.4.1 Volanların Fiziksel Prensibi**

Volanda enerji dönüşümü aşağıda ifade edilen bağıntılarla açıklanır. Depolanan enerji yani volanı oluşturan döner kütlelerin kinetik enerjilerin toplamı ise aşağıda gösterilmiştir.

$$E_k = 1/2 J \omega^2 \quad (5.1)$$

Burada  $E_k$  cismin sahip olduğu kinetik enerjiyi,  $J$  cismin dönme hızını değiştirmeye olan direncini ifade eden atalet momentini,  $\omega$  cismin dönme hızını göstermektedir:

$$J = K.m.R^2 \quad (5.2)$$

İfadesi ise bize  $J$  atalet momentini vermektedir. Burada  $m$  cismin kütlesine,  $R$  ise yarıçapını ifade etmektedir,  $K$  ise cismin geometrisine bağlı atalet sabitidir. Ağır malzemedeki yapılmış sistemler, yukarıdaki denklemde de yer alan ifadede de görülebileceği gibi daha fazla enerji toplar, ancak daha büyük merkezkaç kuvvetleri ile maruz kalırlar [26,35].



### 5.4.2. Volan Tipleri

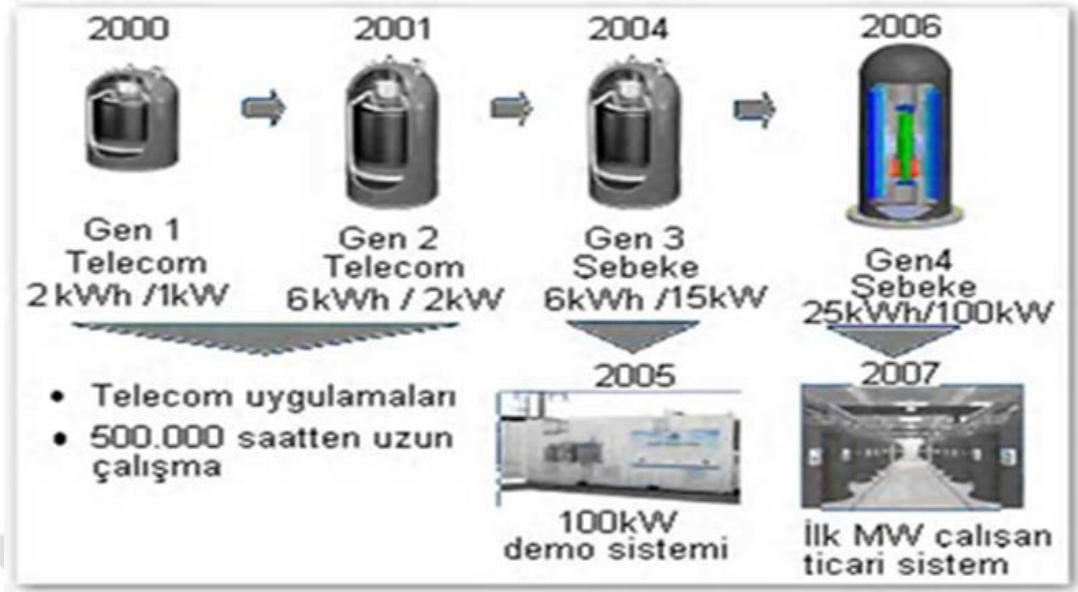
Volanlar, yapıldıkları malzeme türüne göre iki gurup altında sınıflandırılırlar. Bunlar döner kütle elemanının çelik veya kompozit malzeme türü olmasına göre değişir. Demir malzemededen yapılanlar, geleneksel tipte yapılan ilk örneklerden olup, kompozit tiptekiler yeni nesil olarak isimlendirilirler. Bunlar, aynı sınıflandırma çerçevesinde demir malzemeler için düşük hızlı, kompozit olanlar için ise yüksek hızlı olarak da adlandırılırlar [35,55].



Şekil 5.9. Yüksek ve Düşük Hızlı Volan Enerji Depolama Sistemleri [27]

### 5.4.3. Klasik ve Yeni Tip Volanların Karşılaştırılmaları

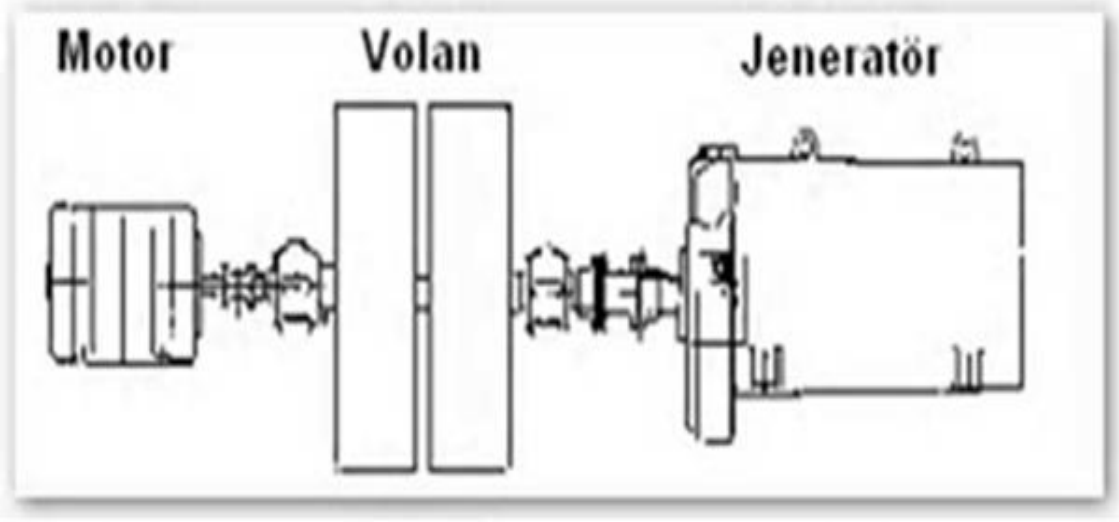
Klasik ve yani sayılabilecek volanların karşılaştırılmasına bakıldığında, son zamanlara kadar, güç kalitesi endüstrisinde volan uygulamaları beslemenin kesildiğinde daha uzun süreyle kesintisiz hizmet vermesini sağlayan kinetik enerji depolayıcı çelik kütle bağlantılı motor jeneratör grupları ile sınırlıdır. Baktığımızda, bu tür sistemlerde anma yükü altında çalışma süresindeki artış nadiren bir saniyeyi aşmaktadır. Bu süre yaklaşık volanda depolanan ek enerjinin %5'inden daha az bir miktarına karşılık gelmektedir [27].



**Şekil 5.10.** Volanın Evrim Süreci [88]

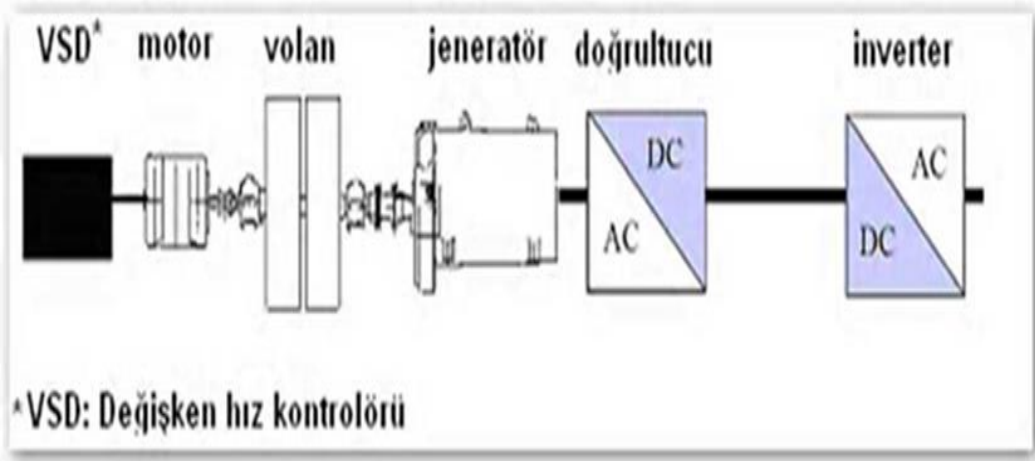
Yukarıda da görüleceği üzere, volandan daha fazla enerjinin çekilmesi, dönme hızının azalması ve buna bağlı elektrik frekansının düşmesi sonucunu doğurur ki bu istenmeyen bir durumdur. Bu tip sistemler geniş boyutlardaki güç düşümlerine ve kesintilerine karşı yeterli koruma sağlamalarına rağmen sistemde tam bir güç geri kazanımını sağlamaya yeterli değildirler [88].

Genel olarak bakıldığında şekilde de görüleceği üzere geleneksel volan sisteminde yapılan birkaç iyileştirme ile depolanan enerjiden geri kazanılacak miktarın artırılması mümkün olmaktadır. Bir jeneratörden elde edilen gerilimin ve frekansın düşmesi, beslemekte olduğu hayati öneme sahip yükler için kabul edilemez bir durumdur. Bu durumu engellemek için volan çıkışı ile jeneratör arasına yerleştirilen bir doğrultucu ile volanın sahip olduğu enerjinin %75'i geri kazanılabilmektedir. Üretilen doğru akımın tekrar şebeke frekansına dönüştürülmesi gerekmektedir. Baktığımızda, sisteme eklenen değişken hız sürücüsü sayesinde büyük ataletle motorların düşük hızlardan başlayarak daha yüksek hızlara verimli bir şekilde çıkarılmasını ve bu sayede bir stadya kaynağı olarak daha küçük motorların kullanılabilmesini mümkün kılar [55].



**Şekil 5.11.** Geleneksel Jeneratör veya Motor ile Aküple Edilmiş Çelik Volan Uygulaması [59]

Şekilde de görüleceği gibi, üzerinde iyileştirilme yapılmış bir volan sistemi, klasik sistemlere göre daha iyi koruma sağlamaktadır. İşletme süresindeki iyileştirmenin yanı sıra ilave devre elemanı maliyeti ve daha fazla yer ihtiyacı ise olumsuz taraflarını oluşturmaktadır [36].



**Şekil 5.12.** Değişken Hız Kontrollü Tahrik ve Evirici veya Çevirici Elektronik Devreler [38]

Yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere, klasik volan sistemlerinin yapım şekilleri dikkate alınmazsa modern teknoloji ile yapılmış olan benzerlerine göre bazı üstünlükleri vardır. Klasik volanlarda kullanılan çelik malzeme, mühendislikte çok

bilinen ve bulunması kolay bir malzemedir. Bu çerçevede, çeliğin bu üstünlüğü tasarımcılara maliyetleri düşürme imkânı sunarken yeterli güvenlik faktörlerinin göz önüne alınmasını da gerekli kılmaktadır. Çelik volanlar kompozit volanlara göre daha ağır fakat daha düşük malzeme dayanımına sahip oldukları için daha karışık yataklama sistemleri kullanılması ve nispeten daha düşük hızlarda döndürülmeleri gerekir. Genel olarak bakıldığında aslında, klasik volanlar modern kompozit volanlara göre daha düşük enerji ve güç yoğunluklarına sahiptir. Klasik volanlar, genellikle hava ortamında çalışırlar. Bu nedenle daha çok aerodinamik çekme kuvvetlerine ve yüksek gürültüye sebep olmaktadır [38].

#### **5.4.4. Volanların Genel Üstünlükleri ve Kullanım Yerleri**

##### ***Kullanım yerleri*** [9]

- Elektriksel araçlarda enerji depolama cihazları olarak kullanılırlar.
- Hibrit kullanımları
- Kurşun asit bataryalarla otomobillerde,
- Kırsal elektrifikasyon sistemleri özellikle telekomünikasyon

##### ***Üstünlükleri***

- Enerjiyi yüksek verimlilikte depolarlar,
- Kimyasal bataryalara göre çok daha fazla enerji depolarlar,
- Daha uzun ömürlüdür,
- Çevre sıcaklığından etkilenmezler,
- Daha kısa şarj zamanı ile daha fazla güç verebilirler,
- Elektrikli araçlarda, şarj zamanının bir saat seviyesinden birkaç dakikaya kadar düşürülmesi gereken uygulamalarda tercih edilirler.

##### ***Dezavantajları***

- Mevcut volanların özgül enerjisi düşüktür.
- Güvenlik sıkıntıları vardır.
- Yüksek motor hızlarına sahiptir.
- Kırılma olasılığı ve bütün enerjinin kontrolsüz bir şekilde çevreye dağılma riski vardır.

- Teknolojileri henüz olgunlaşmamıştır.
- Ticari rekabet için maliyetleri henüz yüksektir [6,7,9].

### 5.5. Enerji Depolama Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Kullanılacak bir uygulamada hangi depolama teknolojisinin seçileceği teknolojilerin sahip olduğu ortak anahtar özelliklerin karşılaştırılması ile belirlenebilir. Teknik olarak özgül enerji, özgül güç değerleri, enerji kapasitesi ve maksimum depolama süresi bakımlarından farklılık gösterirler. Baktığımızda, maliyet bakımından ise kurulum ve işletme maliyetleri büyük farklılık vardır. Yeni bir seçim yapılacağı zaman her bir enerji depolama sisteminin ilgili uygulamaya uygunluğu dikkatli bir şekilde analiz edilmelidir [7,83].

**Tablo 5.1:** Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması [7]

Depolama Yöntemi	Yatırım Maliyeti/MW	Ağırlık/MWh	Verim	Bakım Maliyeti/MWh	Kapasite	Ekonomik Ömür
Volanlar	25.000.000\$	3000kg	0,93	4\$	750 kWh	20 yıl
SMES	10.000\$	10kg	0,97	1\$	0,8 kWh	40 yıl
Süperkapasitörler	28.000.000\$	10.000kg	0,95	5\$	0,5 kWh	40 yıl

Volanlar, özellikle otomobil, elektrikli raylı ulaşım sistemleri, ticari/endüstriyel asansör vinç uygulamaları gibi kısa sürede büyük güçlerin üretilip tüketilmesine uygun karakteristikli yük sistemlerinde önemli gelişme sağlayacaktır. Ancak geniş çaplı enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamaktan uzaktırlar. Performansları dönme hızına bağlı olduğu için bu hıza dayanacak malzemelerden imal edilmeleri gerekmektedir [7].

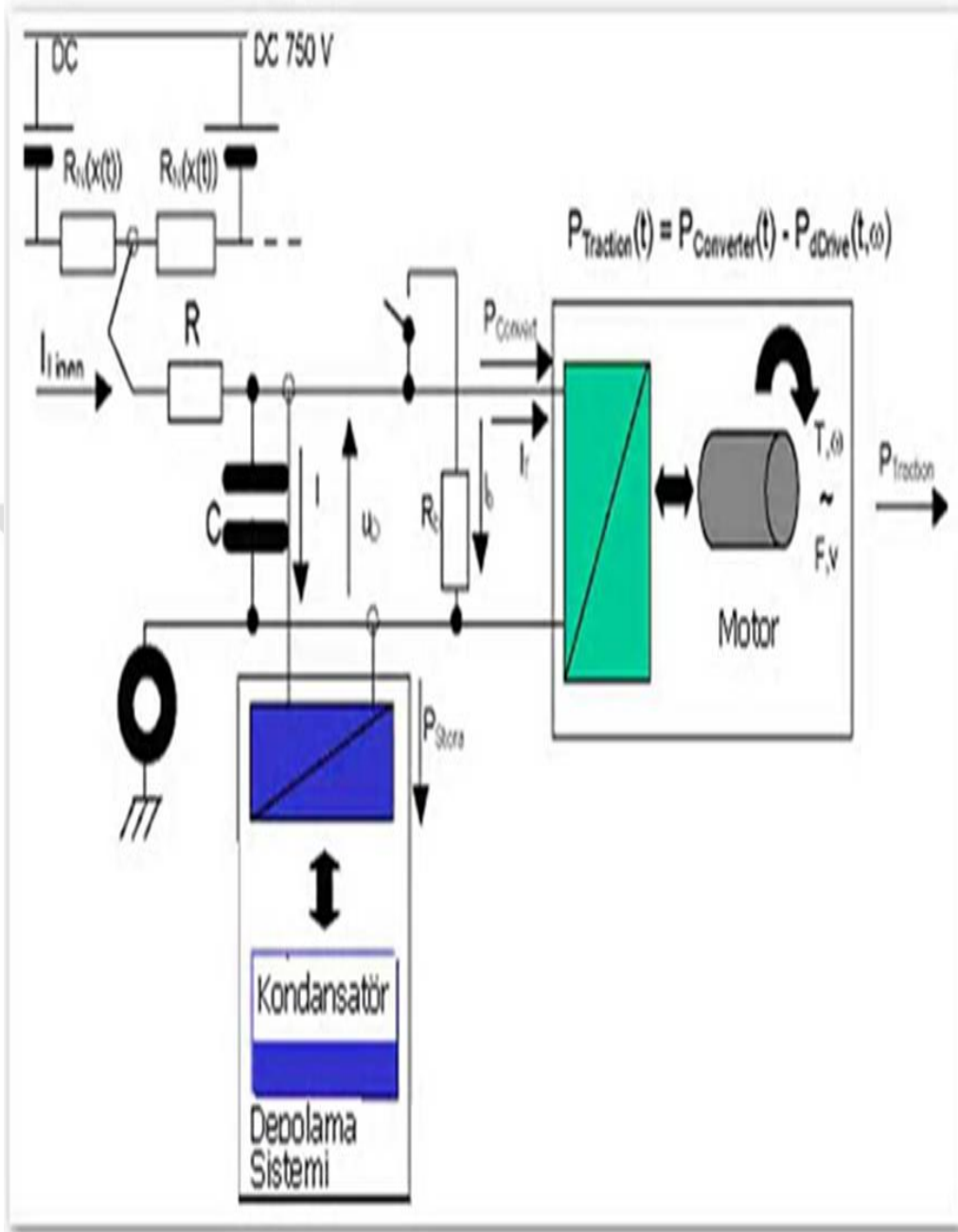
Bakıldığında, çevreye zarar vermeyen bir teknoloji olması, uzun ömürlü olması ve yüksek verimlilik gibi avantajları bulunurken, büyük boyutlu olmaları, kısa süreli depolamaları ve yüksek kurulum maliyetleri gibi dezavantajlara sahiptirler. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri, gerilim değişimlerine karşı çok hızlı cevap verebilmeleri ve büyük özgül enerji ve özgül güç değerleri nedeniyle kısa süreli

yüksek miktarlarda akım verme veya alma kabiliyetlerinin olmasından dolayı depolama ihtiyacını karşılamaktan öte enerji kalitesini yükseltme amacıyla kullanılmaktadır [83].

Süper iletkenliği sağlayan sıcaklık değerini aştığında büyük kayıplar ve önemli tehlikeler olabilir. Soğutma ihtiyacı olması, düşük verim ve yüksek kurulum maliyeti dezavantajlarındandır. Bataryalarda olduğu gibi toksinler, ağır metaller gibi tehlikeli atıklar üretmezler. Hareket eden parçaları yoktur. Bakım masrafları düşüktür [83].

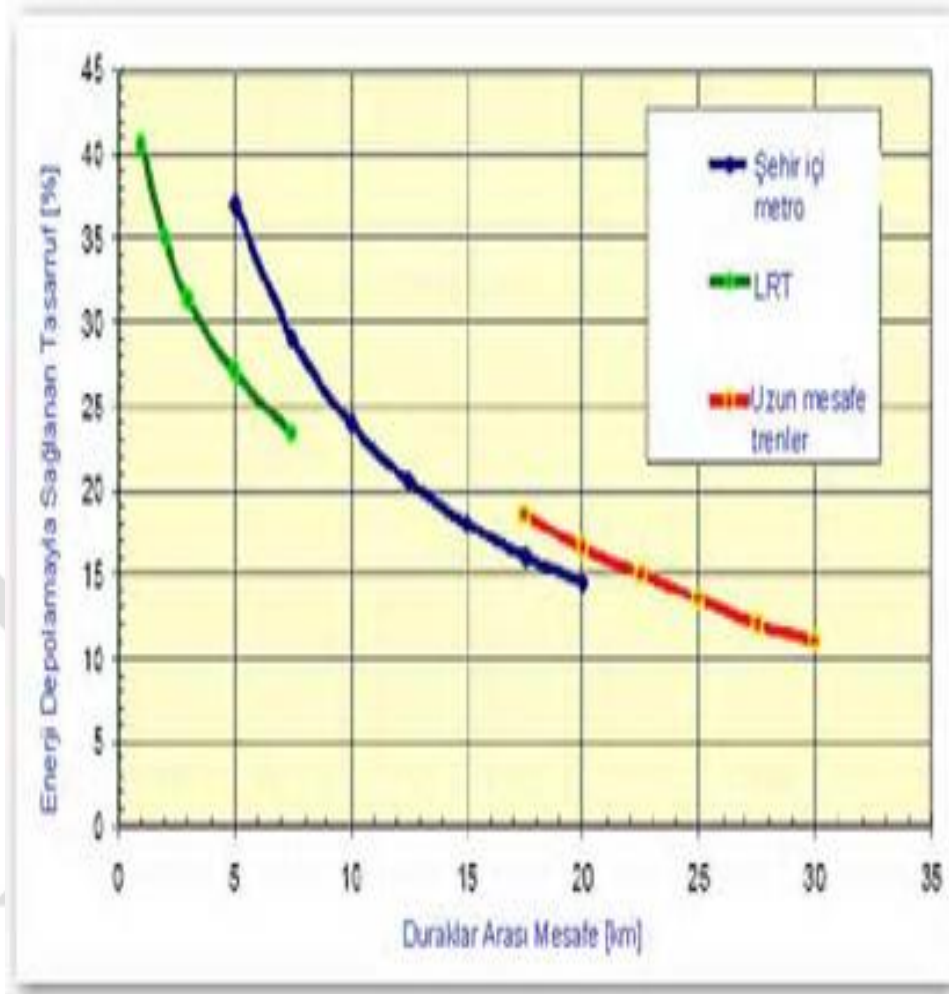
#### **5.6. Enerji Depolama Sistemlerinin Demiryolu Uygulamaları İçin İncelenmesi**

Raylı sistemlerde enerji depolama sistemleri, araçların frenlemesi esnasında elektrik motorlarının dinamik frenlemede üretilen elektrik enerjisinden yararlanmak amacıyla kullanılırlar. Ortaya çıkan enerji, aracın frenleme ihtiyacına göre belirir. Modern doğru akım sürücülü hız kontrollü makine ve tezgahlarda da benzer sebeplerden ötürü, açığa çıkan bu enerjiyi tüketen frenleme dirençleri kullanılmaktadır [84].



**Şekil 5.13.** Bir Metro Aracında Enerji Depolama Sistemi Bağlantısı [84]

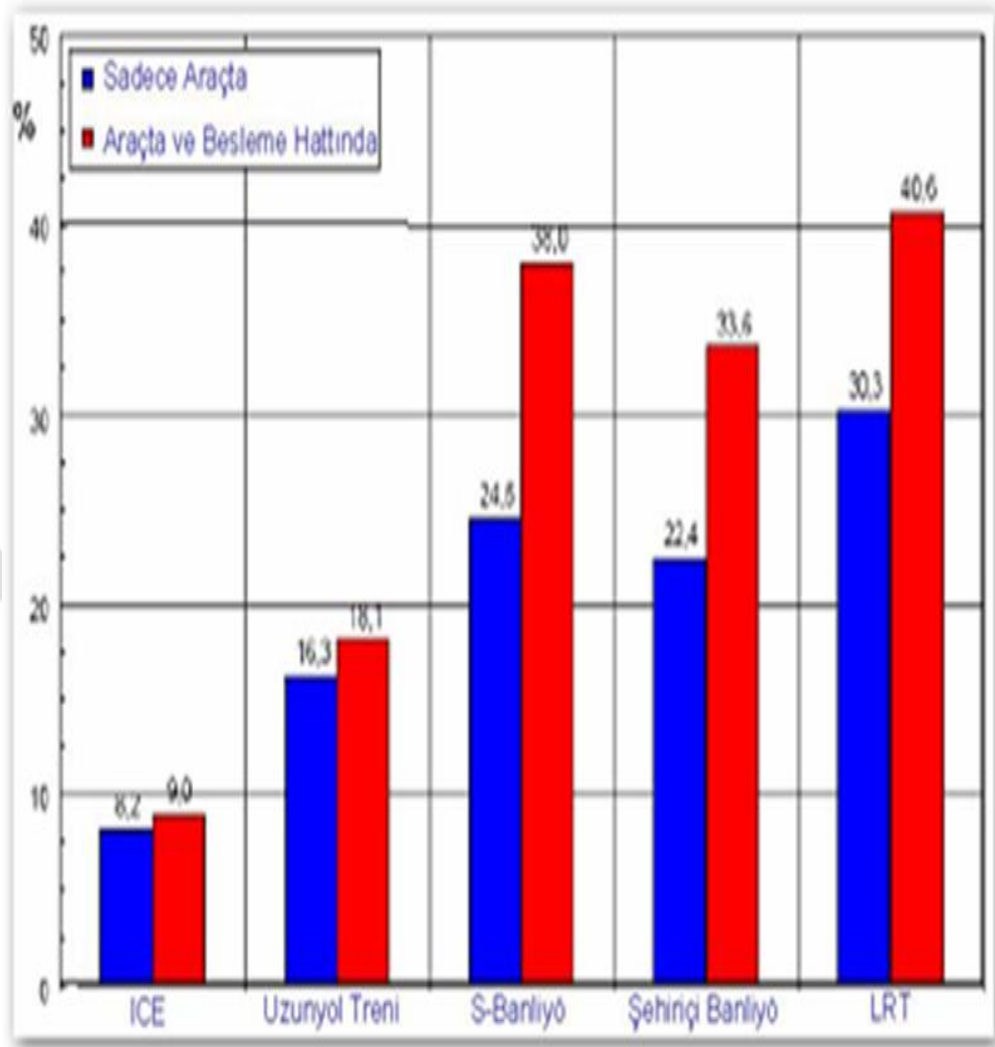
Yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere; enerji depolama sistemleri, bu noktada üretilen fazla enerjiyi depolamak ve bir sonraki ivmelenmede harcanacak enerji karşılamak için kullanılırlar.



**Şekil 5.14.** Duruş Frekansları Farklı Olan Raylı Ulaşım Sistemlerinin Enerji Depolama Kapasiteleri [85]

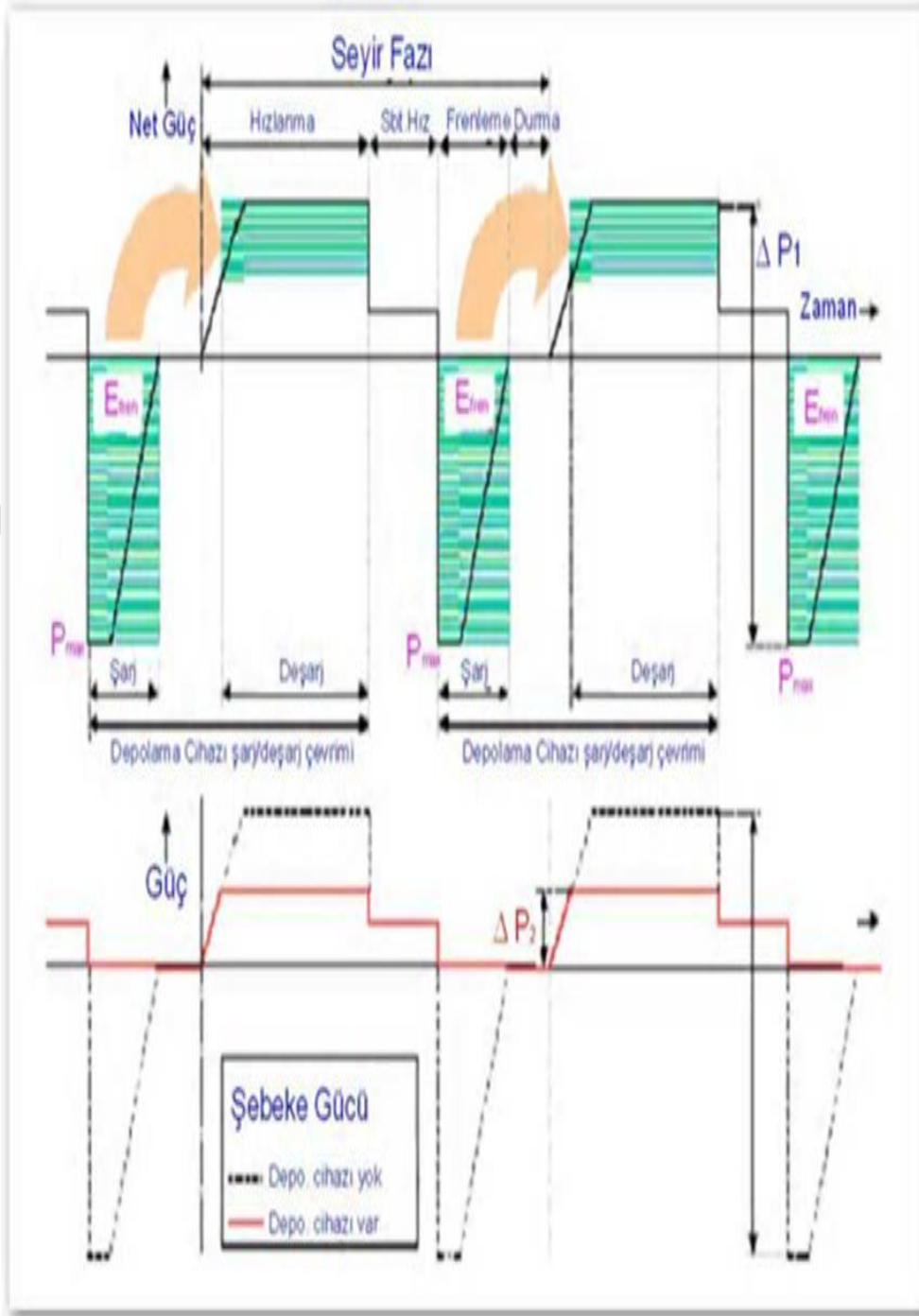
Yukarıdaki grafikte de görüleceği gibi, araştırmalara göre frenleme enerjisi geri kazanılması durumunda LRV araçları enerji tüketiminde yaklaşık %30 civarında tasarruf eder. Metro enerji ihtiyacının daha kararlı hale gelmesi nedeniyle sabit tesislerde sağlanan enerji tasarrufunun da dikkate alınması durumunda bu oran %40'lara yükselmektedir. Trenlere montaj yapılan depolama cihazları doğru akım sistemlerde besleme hatları üzerinde oluşan kayıpların önlenmesi ve pik yüklerin azaltılmasına etkilidir. Hafif metro hatlarında özellikle 750V doğru akım sistemlerde bu kazançlar daha fazladır. Bu durum şekilde de görüleceği gibi, LRV sistemi ve değişik tren grupları için de açıkça görülmektedir [85].





**Şekil 5.15.** Araçlarda ve Araçlarla Birlikte Tesisler Üzerinde Elde Edilen Kazançlar [85]

Yukarıdaki şekilde de görüleceği üzere, bir trende enerjinin depolanması ve aksi durumlar için güç veya enerji değişimleri gösterilmiştir.EDS sistemlerinin enerji besleme sistemi pik değerini ciddi bir şekilde azaldığı grafikten görülmektedir. Bir başka hususta elde edilen etkinin farklı işletme şartlarına sahip demiryolu sistemleri için farklı olacaktır.

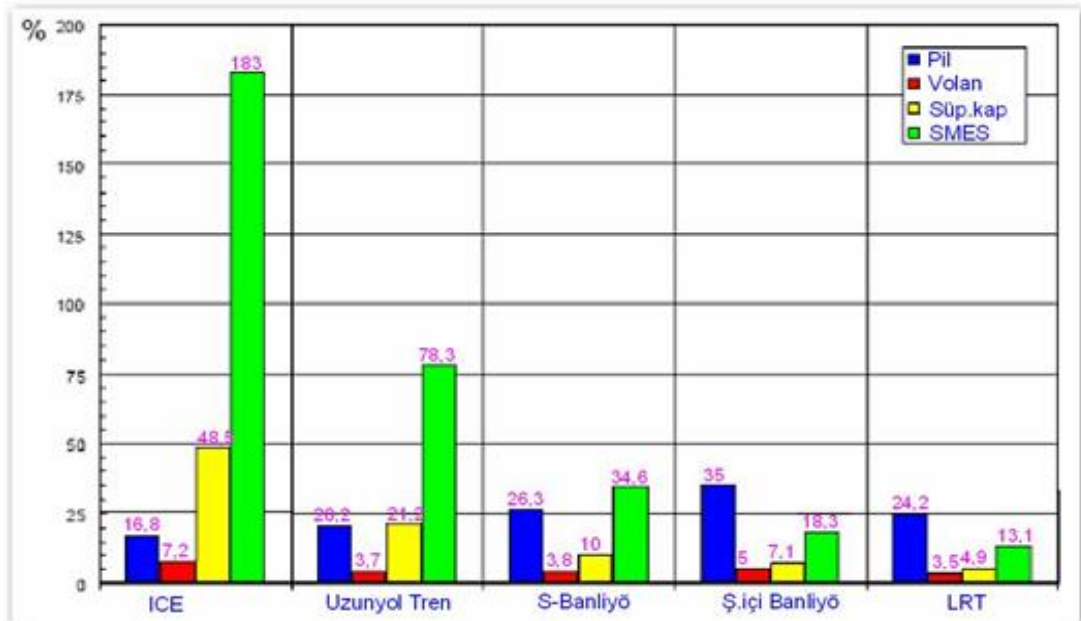


**Şekil 5.16.** Bir Metro Hareketi Sırasında Harcanan Enerji Depolaması [86]

Yukarıdaki tabloda elektronik denetim sistemlerinin çalışma prensibi vardır. Bu sistemleri çalışma periyotları tramvay, hafif metro ve metro gibi farklı demiryolu tipleri için ekonomik olmaktadır. Bu durumda enerji depolama sistemlerinin hafif metro sistemlerine uygulanması, daha karlı bir yatırım potansiyeli vardır. Baktığımızda, demiryolu uygulamalarında kullanmak için enerji depolama sistemi

tasarlanırken, enerji depolama sisteminin büyüklüğünün belirlenmesi için aracın kütlesinin, maksimum hızının ve ivmelenme ve frenleme karakteristiklerinin bilinmesi gerekir bu bilgiler depolanacak enerji miktarını ve bunu yapmak için gerekli olan gücü belirler. Frenleme enerjisi ve gücü aynı zamanda enerji depolama sisteminin şarj zamanını demek olan frenleme zamanını belirlenir. Aslında konuyla ilgili yapılan literatür araştırmalar frenleme enerjisi depolama uygulamaları için en iyi teknolojinin volanlar ve süperkapasitörler olduğunu göstermiştir. Bu durum şekilde de görülebilir; Şekle baktığımızda farklı tren gruplarında oluşmakta olan frenleme enerjisinin depolanabilmesi için gerekli olan elektronik denetim sistemlerin kütlesinin araç toplam kütlesine oranını vermektedir. Burada mavi renk elektronik denetim sisteminin içinde batarya, kırmızı renk volan, sarı renk süperkapasitör, yeşil renk ise Smes kullanılması durumunda trenin kütlesine oranla gerekli olacak elektronik denetim sistemlerinin kütlesini göstermektedir

Tren grupları için elektronik denetim sistemleri olarak kullanılacak en uygun sistemin volan olduğu açıktır. LRV uygulamalarında süperkapasitör ve volanın en iyi iki teknoloji olduğu ayrıca görülmektedir. Doğal olarak, tercih edilecek teknoloji ve sistem büyüklüğü söz konusu sistemin özellikleri ile belirlenecektir [86].



**Şekil 5.17.** Tren Gruplarına ve EDS Teknolojilerine Göre EDS Kütlesi veya Tren Kütlesi Karşılaştırması [86]

### **5.7. Raylı Sistemlerde Örnek Bir Volan Uygulaması**

Baktığımızda, raylı sistemlerde 2002 yılında Almanya Hannover’de yapılan bir çalışma elektrikli kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji depolama cihazlarının kullanımının büyük faydalar sağlayacağını göstermiştir. Çalışma işletme gerilimi 680V olan bir LRV sisteminde iki komşu istasyon arasında yapılmıştır. Her biri alternatif gerilim sürücü ile tahrik edilen dört ayrı vagondan oluşan iki trene birer adet piller firmasının üretmiş olduğu teknik özellikleri verilen volanlar monte edilmiştir [30].

### **5.8. Tren Üstü Enerji Depolama**

Enerji depolama sistemleri enerji tasarrufunu büyük oranda artırır. Frenleme fazında aracın kinetik enerjisi başka bir enerji çeşidine (kapasitörler için elektrostatik enerjiye) dönüştürülür ve depolama elemanında depo edilir. Araç hareketsiz konumda iken de bu elemanlar bir sonraki ivmelenme esnasında bu enerjiyi elde edebilmek için tam şarj edilmiş olmalıdırlar. Enerji depolama sistemi böyle bir yolla sağlanmalıdır ki bir sonraki ivmelenme esnasında araç gerekli olan enerjiyi dış enerji beslemesinden tamamıyla karşılama ihtiyacına gerek kalmamasın [88].

Elektrokimyasal piller ve süper kapasitörler tren üstü enerji depolama sistemi uygulamalarında yalnızca pratik bir uygulamadır. Elektrokimyasal piller ve süper kapasitörlerin birbirlerine göre artıları eksileri de olsa süper kapasitörler gücün pik yaptığı noktalarını karşılamada daha elverişlidir. Ayrıca süperkapasitörler çevrim ömürleri çok yüksektir. Bunun nedeni enerji depolama prensibinin elektrostatik şeklinde olmasıdır. Bundan dolayı en uygun araç üstü enerji depolama sistemi ultrakapasitörlerdir [88].

Depolama için ilk çözüm Bombardier Ulaşım tarafından Manheim’de bir prototip araçta yapılmıştır. Prototip modern bir hafif raylı araçtır ve depolama cihazı enerji içeriği 1kWh ve ağırlığı 450 kg olan süperkapasitörler kümesidir. Önemli dezavantajları trenin ağırlığını yaklaşık %2 arttırması, ek yere ve çift yönlü yükselticiye konvertör ve yüksek maliyete ihtiyacı olmasıdır. Bu sisteme Bombardier firması tarafından MİTRAC ismi verilmiştir. Bu sistemin enerji depolaması dışında da

birçok avantajları vardır. (Enerji verimliliği, ivmelenme sırasında pik güç ihtiyacını karşılama, altyapı kayıplarını düşürme ve gerilim stabilizasyonu) [88].



**Şekil 5.18.** Bombardier Ulaşım Tarafından Yapılan Manheim'deki Prototip Araç [88]

### **5.8.1 Gerilim Düşümünün Azaltılması**

Cer gücü sistemindeki arızalar dışında gerilim düşümü iki prensip doğrultusunda oluşur: Trafo merkezlerindeki gerilim düşümü ve trenler ile besleme istasyonları arasındaki besleme iletkenleri ve raylar boyunca olan güç kayıpları. Araç üstü enerji depolama sistemlerinin kullanılması ile araçların akım alış noktaları olan pantograflarda oluşacak gerilim düşüm değeri minimize edilecek (hat akımını %50'den daha fazla, bazen %80 düşürerek gerilim düşümlerinin önüne geçilmektedir ve bundan dolayı araçların performanslarında oluşacak bir düşüşün önüne geçilecektir [88].

### **5.8.2 Trafo Merkezlerinden Talep Edilen Tepe Güç Değerinin Düşürülmesi**

Gerekli gücün kısmının enerji depolamadan gelmesiyle hattın çekilen tepe güç talebi önemli derecede azalabilecektir. Bunun faydaları;

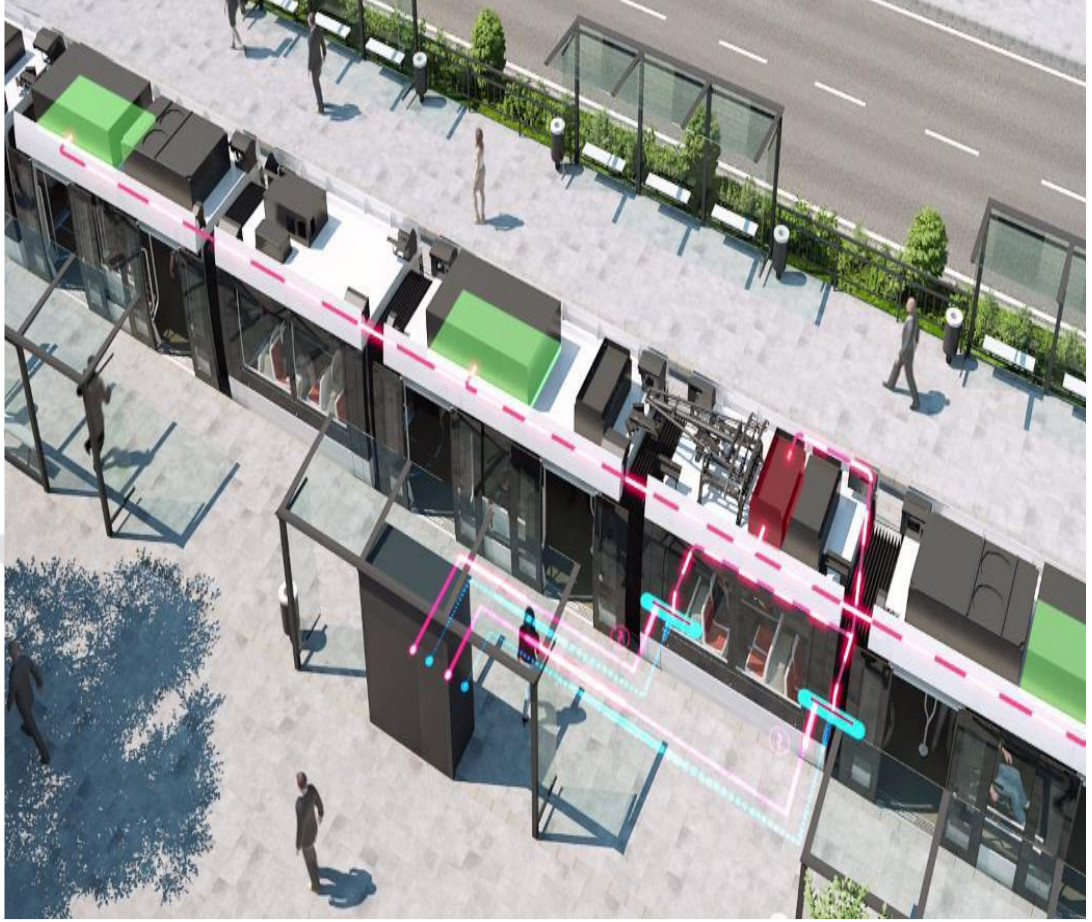
- Enerji maliyetinin azaltılması,
- Azaltılmış tepe güç için cer gücü sistemi tasarımı,
- Daha az besleme istasyonu,
- Küçük kesitli kablo kullanımı
- Mevcut altyapı sistemi için daha fazla veya daha güçlü araç,
- Zayıf hatlarda ivmelenme limitlerinde iyileştirme yapılmasıdır. [88].

### **5.8.3 Katanersiz Çalışma Olanasının Elde Edilmesi**

Enerji depolama sistemini araç üstüne monte etmek belli kısımlarda katanersiz işletme yapılabilir hale getirir. Enerji depolama sistemi kısa süreler için altyapının neden olabileceği enerji kesintilerinde aracın çalışmasını sağlar. Örneğin, 1 km'lik mesafeler, enerji kesintisinin olduğu durumlarda veya katanersiz bölgelerde (tarihi yerler vb.) enerji depolama sistemi tarafından sağlanan enerji ile ulaşılır. Katanersiz çalışma bölgesinin kesin uzunluğu birçok unsura bağlıdır. En önemlileri; depolama sisteminde depo edilmiş enerji, aracın maksimum hızı, hattın eğimi, en düşük yardımcı güç ihtiyacıdır [88].

### **5.9 İstasyon Tipi Enerji Depolama**

İstasyon tipi enerji depolanma sistemlerinin kurulumları hat boyunca gerilim düşümlerinin fazla olduğu ve çekilen net gücün fazla olduğu yerlerde olmalıdır. Depolanan enerji aynı veya farklı trenlerde kullanılabilir. Enerji tasarrufundan başka istasyon tipi depolama, zamanla güç talebini yumuşak bir şekilde sokar ve kataner geriliminde sabitleyici bir etki yapar. Bunun yanında yatırım maliyetleri de yüksektir. Bu yüzden ölçü olarak sistemdeki önemli noktalar belirlenerek kullanımı buralarla sınırlandırılabilir [88].



**Şekil 5.19.** İstasyon Tipi Enerji Depolama [87]

Bir tramvay bir tramvay durağına yaklaştıkça, sokak içi güç kaynağı ekipmanından kodlanmış bir sinyal alır. Tramvay durduktan sonra, 20 yıllık tecrübe geri dönüşü sayesinde kanıtlanmış tasarıma dayanan bir güç şarj ayakkabısı, %99,95'in üzerinde kullanılabilirlik sağlayan güç kaynağı rayıyla temas kurmak için indirilir. Süper kapasitör sadece 20 saniye içinde şarj edilir. Ağırlık ve büyüklükleri için alternatiflerden daha fazla enerji depolarlar ve üstün yaşam döngüsü performansı sağlarlar. Hızlı şarj, tramvay durağı sırasında istasyonda harcanan zaman üzerinde etkisi olmadan sigortalıdır [87].

Şarj ve çalışma modları arasındaki geçiş otomatiktir-sürücü için herhangi bir işlem yoktur. Güç şarj ayakkabıları yükseltilir ve kodlanmış sinyaller, tramvay hareket etmeden önce güç kaynağını kesmek için araç ile zemin arasında değişimdir.

Citadis Ecopack ünitesi tam olarak şarj edilmediğinde, frenleme enerjisi şarj etmek için kullanılır [87].

Bir tramvay, kataner içermeyen bir hat bölümünün sonuna ulaştığında, sürekli kataner güç kaynağına geçiş, bir transponder tarafından tetiklenen otomatik olarak yapılır.

Citadis Ecopack ayrıca karışık bir APS ve yerleşik özerklik çözümüne dayanabilir. Bu çözüm Rio de Janeiro'da Porto Maravilha entegre tramvay projesi için uyarlandı [87].

### **5.9.1. Araç Üstü ve İstasyon Tipi Enerji Depolama Sisteminin Karşılaştırılması**

İstasyon Tipi Enerji Depolama sistemlerin güç akış kontrolleri tren üstü enerji depolama sistemlerine göre daha karmaşıktır çünkü araç üstü sistemlerde girilen referans değeri aracın kinetik enerjisine bakılarak hesaplanır; istasyon tipi enerji depolamada ise hattın gerilimi ve o hattın şarj durumu esas alınarak hesaplanır. Ayrıca araç üstü enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılmada maksimum kinetik enerjiyi (dolayısıyla potansiyel enerjiyi) bilmek yeterliyken istasyon tipinde aracın rejeneratif frenleme oranını ve voltaj limitlerinden dolayı enerji transfer limitini de bilmek gerekir [88].

İstasyon tipi enerji depolama sistemlerinden alınan verimin yüksek olması için trafik yoğunluğunun az olduğu yerlerde kullanılması uygundur. Dolduğu zaman hemen deşarj olması gerekmektedir. Bu da ivmelenen araçlara zorluk yaşatmaktadır. Küçük olan tiplerde uzaktaki bir araç ivmeleme yaptığı zaman gerilim düşümlerine sebep olabilir. Enerji verimliliği açısından bir iyileştirme yapılmak istendiğinde hat geriliminde belirgin bir değişme olmaz iken, araç üstü enerji depolama da hat kayıpları düşer ve gerilim stabilizasyonu sağlanır [88].

Ayrıca istasyon tipi enerji depolama sistemlerinin maliyeti, diğer sisteme göre oldukça yüksektir.



## **6. ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE SİMÜLASYON YOLU İLE İNCELENMESİ**

Bu çalışmada Ankaray Hafif Raylı Sistem ve parametreleri biraz daha farklı olan iki adet LRT aracı için enerji tüketiminde etkili olan üç farklı parametreler olan; tren ağırlığı, işletme sıklığı ve maksimum hızlanma ivmelenme değerlerini değiştirerek talep edilen enerjinin ve rejeneratif enerjinin nasıl değiştiği simülasyon programı ile elde edilmiştir.

### **6.1. Test Hatları ve Simülasyonu**

#### **6.1.1. Test Treni 1: Ankaray Hafif Metro Hattı Özellikleri**

Yapılan simülasyon testlerinde Ankaray LRT araçlarının simülasyonda kullanılacak özellikleri aşağıdaki gibidir;

Maximum İvmelenme ( $m/sn^2$ ): 1.1

Maximum Frenleme İvmesi ( $m/sn^2$ ): 1,15

Max Hız (km/h): 88

Boş Ağırlık: 40.500

Dolu Ağırlık [kg]: 63068

Dönme Kütle Faktörü [%]: 11

Koltuk Sayısı: 60

Ayaktaki Alan [ $m^2$ ]: 40,3

Konfor Katsayısı [ $m/sn^3$ ]: 1.1

Ön alan ( $m^2$ ): 5,6

Uzunluk (m): 29

Aks Sayısı: 6

Simülasyon sonuçlarını Ek-1 ve Ek-2'de verilmiştir.

#### **6.1.2. Test Treni-2 Treni Özellikleri**

Maximum İvmelenme ( $m/sn^2$ ): 1.2

Maximum Frenleme İvmesi ( $m/sn^2$ ): 1,3

Max Hız (km/h): 79.9

Boş Ağırlık (kg): 46.667

Dolu Ağırlık [kg]: 67.037

Dönme Kütle Faktörü [%]: 10

Koltuk Sayısı: 50

Ayaktaki Alan[m<sup>2</sup>]: 40

Konfor Katsayısı [m/sn<sup>3</sup>]: 1

Ön alan (m<sup>2</sup>): 8

Uzunluk (m): 31,84

Aks Sayısı: 6

Simülasyon sonucunu Ek -3 ve Ek -4'te görebilirsiniz.

## **6.2. Raylı Sistem Simülasyon Programı: SimuX**

Günümüzde, doğru analizler ve işletme prosesleri ve bunları etkileyen değişik faktörlerin denemeleri simülasyon programları ile gerçekleştirilebilmektedir. Bunlarla birlikte tren işletmesinin bütün bir hat için bağıl analizleri yapılabilmektedir. Raylı ulaşım sistemlerinin tasarım ve analizinde simülasyonu çok önemlidir. Simülasyon ile güç sistemi boyutlandırılabilir, istenilen optimizasyon çalışmaları yapılır, olası problemler daha sistem inşa edilmeden görülerek çözülmekte ve sonuç olarak maliyette önemli azalmalar sağlanabilmektedir.

Simülasyon çalışmaları planlamanın doğru yapılıp yapılmadığının test edilmesinde ve tasarlanan sistemin optimize edilmesinde önemli bir yer tutar. Bunun dışında hazırdaki bir sistem üzerinde kullanılan araçların değiştirilmesi veya headway trenler arası süre zamanın kısaltılması gibi büyük modifikasyonlar yapılacağı zaman da simülasyon yapılmalıdır. Genel olarak bakıldığında simülasyon programlarının şu amaçlarla kullanılabilceği görülür [41,65].

- Tren performansının belirlenmesi
- Trafo merkezlerinin ve kesicilerin boyutlandırılması
- Havai hatların yeterliliğinin saptanması

- Bir trenin pantografındaki maksimum, minimum ve ortalama gerilim değerlerinin bulunması
- Enerji tüketiciminin ve kayıplarının bulunması
- Enerji tasarruf programlarının uygulamadan önce test edilmesi
- Ray Gerilimi ve kaçak akım analizi
- Farklı besleme şekillerinin test edilmesi
- Rejeneratif frenlemenin etkisi ve hattın üretilen bu frenleme enerjisini kabul oranının (receptivity rate) belirlenmesi
- Kısa devre akım ve gerilimlerinin analizi
- Araç zaman çizelgelerinin iyileştirilmesi

### **6.3. LRT Araçlarının Enerji Tüketime Etki Eden Bazı Parametrelerin İncelenmesi**

Tren ağırlığının, işletme sıklığının ve maksimum hızlanma ivmesinin trenin enerji talebinde ve rejeneratif enerjinin nasıl değiştiğini görebilmek için simülasyon yolu ile hem tablo hem grafik halinde incelenmiştir.

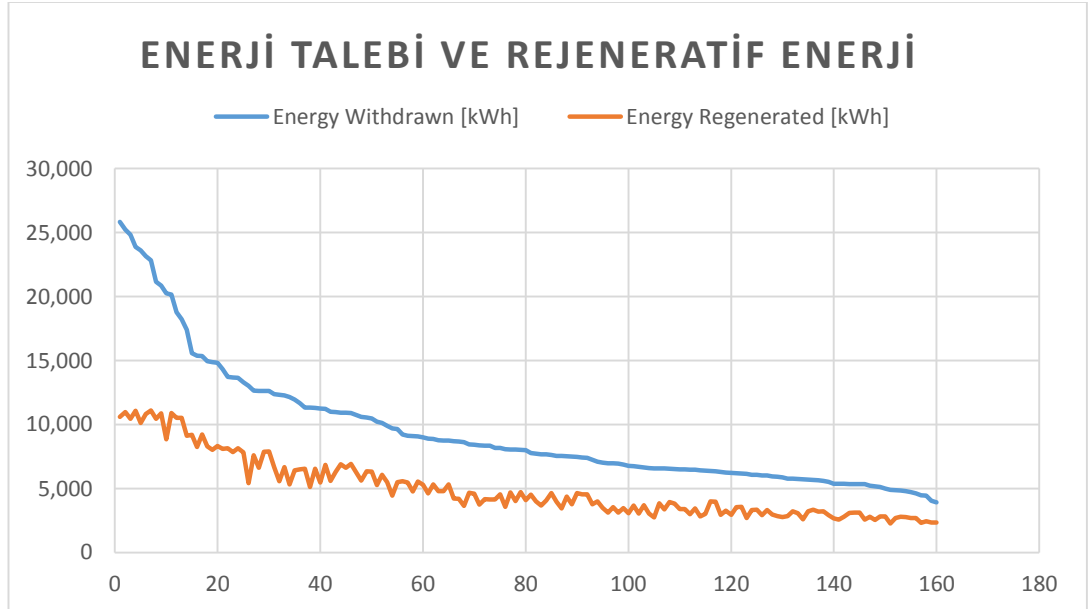
#### **6.3.1. İşletme sıklığının enerji tüketime etkisi**

Trenler normal olarak belli zaman aralıkları ile hatta gönderilir. Buna trenler arası süre (TAS) denir. Metro sistemlerinde bu 75 saniyeye kadar düşebilir, banliyö hatlarında ise 2.5–10 dakika arasındadır.

TAS hattaki enerji tüketimini etkiler. TAS'ın büyük olması, tanımlanmış bir güç bölgesinde az aracın var olması ve dolayısı ile ivmelenen, frenleyen trenlerin eş zamanlı bulunma olasılığının azalması demektir. Yani TAS ne kadar küçük olursa hem rejeneratif enerji daha çok kullanılır hem de yolcular için bir fırsattır. Bu çalışmada, 90 saniyeden başlayarak, 30'ar saniyelik artışlarla, 360 saniyeye kadar, toplam 10 farklı TAS için SIMUX yardımı ile simülasyon testleri yapılmıştır.

**Tablo 6.1.**Farklı TAS (Trenler arası süre) deki talep ettiği enerji ve rejeneratif enerjiye dönüşen kısmı

TAS (sn.)	Enerji Talebi (kWh)	Rejeneratif Enerji (kWh)
90	25.821	10.587
120	14.864	8.013
150	11.957	6.424
180	13.018	5.414
210	8.892	4.618
240	71.01	3.980
270	8.625	3.634
300	6.240	3.269
330	5.948	2.974
360	6.524	2.748



**Şekil.6.1.** Farklı TAS larda Enerji Talebi ve Rejeneratif Enerji

Görüldüğü üzere TAS uzadıkça talep edilen enerji ve rejeneratif enerji azalmaktadır. TAS ne kadar küçük olursa kullanılması yolcu konforu ile birlikte enerji verimliliğini

de maksimize eder. Bakıldığında, 90 sn ila 360 sn de TAS'lar için olan testler tekrarlanmış ve sistemin toplam enerji geri kullanım oranı hesaplanmıştır. Frenleme enerjisi ile talep edilen enerjinin oranını görmüş olduk.

### 6.3.2. Tren ağırlığının enerji tüketimindeki etkisi

Trenin ilk olarak sadece koltuk sayısı kadar yolcu durumundan başlanarak kademeli olarak artırılması ile tam yolculu ağırlıklarının enerji tüketimine etkisini temel alan bu çalışma, aracın (3'lü set) bir sefer süresinde, kişi ağırlığını 70 kg alarak her AW1, AW2, AW3 ve AW4 yüklü durumunda yani aracın tam dolu hale gelene kadar ki enerji tüketimi ilişkisi incelenmiştir. Bu araştırma simülasyon programı SIMUX yardımı ile yapılmıştır.

**AW1**, AW0 artı mürettebat dahil tam oturma yükü.

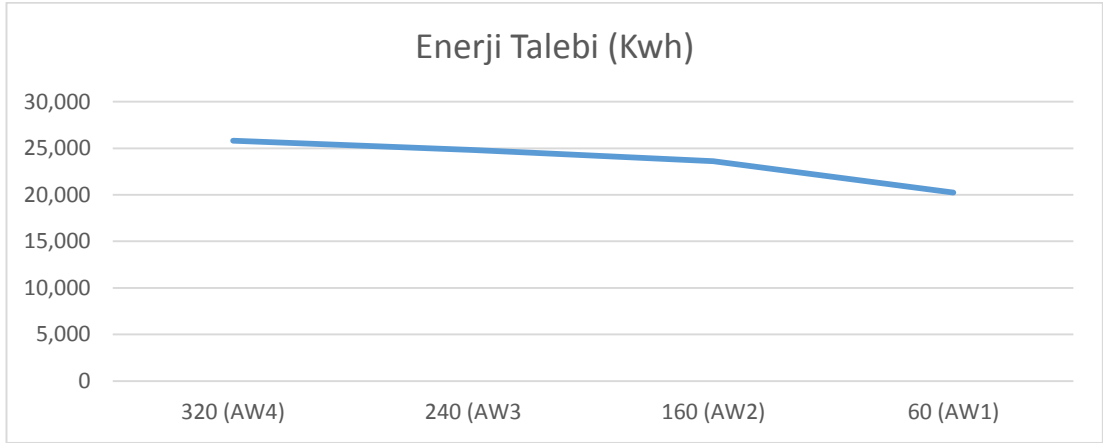
**AW2**, AW1 artı, 4 yolcu m2'sinde durur.

**AW3**, AW1 artı 6 yolcu m2'de duruşlar.

**AW4**, AW1 artı 8 yolcu m2'de duruşlar.

**Tablo 6.2.** Farklı Tren Ağırlıkları için talep enerji

Tren Ağırlığı (Ton)	Yolcu Sayısı (Kişi)	Talep Edilen Enerji (Kwh)
63.068	320 (AW4)	25.821
57.426	240 (AW3)	24.820
51.784	160 (AW2)	23.602
44700	60 (AW1)	20.251



**Şekil 6.2.** Yüke Bağlı Enerji Talebi Değişimi

Şekilde de görüldüğü üzere AW4 yükünden AW1 yüküne doğru geldiğimizde enerji sarfiyatı düşmektedir. O yüzden tren alımlarında ağırlıklarına çok dikkat edilmelidir artık dünyada enerji tasarrufu için tren gövdesinde hafif malzemeler kullanılmaktadır.

**Tablo.6.3.** Kişi Başına Düşen Enerji Sarfiyatı

Yolcu Sayısı	Kişi Başı Enerji Sarfiyatı(kWh)
60 (AW1)	187.216
220 (AW2)	60.240
300 (AW3)	47,43

Yolcu sayısı azaldıkça kişi başına düşen enerji miktarı artmaktadır.

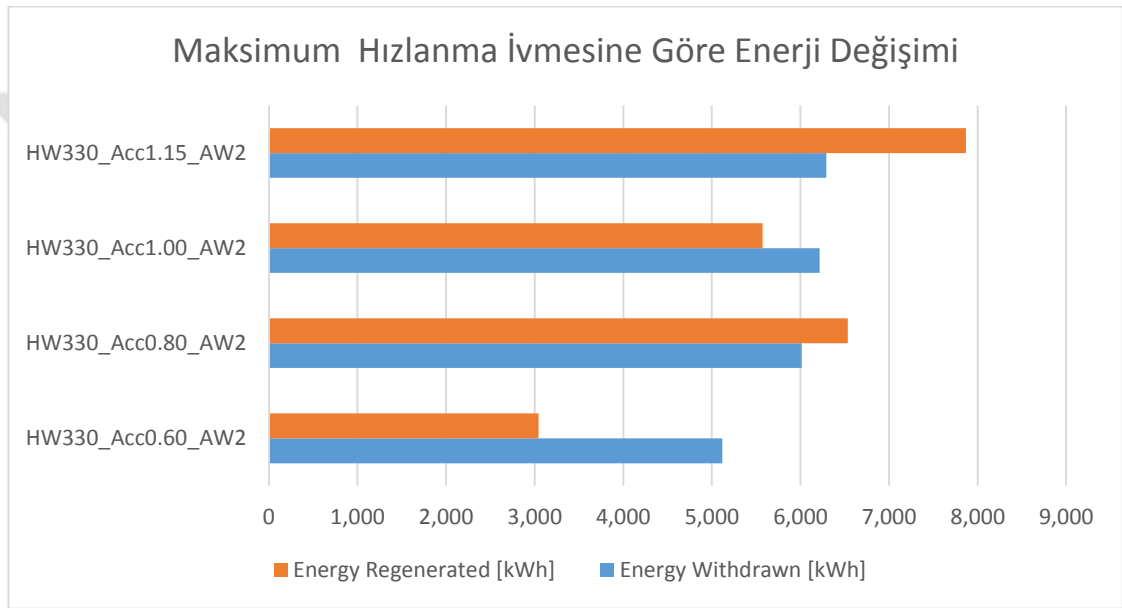
### 6.3.3. Maksimum hızlanma ivmesinin enerji tüketimine etkisi

Maksimum hızlanma ivmesi, aracın ilk harekete geçtiği anda uyguladığı ivmedir. Hızlanma ivmesinin değeri hattan çekilen enerji ile direkt ilgilidir. Bu değer aracın TAS (Trenler Arası Süre) değerini de etkiler. Hızlanma ivmesi kadar fazla olursa trenler arası süre de o kadar kısa olur ki bu da yolcuların daha konforlu bir yolculuk yapmasını sağlar.

Bu çalışmada, hatta kullanılan ve değişen ağırlıklarda araçların en büyük hızlanma ivmesi  $1,15 \text{ m/s}^2$  ve en küçük hızlanma ivmesi  $0,6 \text{ m/s}^2$  değerlerini arasında simülasyon çalışması yapılmıştır.

**Tablo.6.4.** Maksimum Hızlanma İvmesi Göre Değişen Rejeneratif Enerji

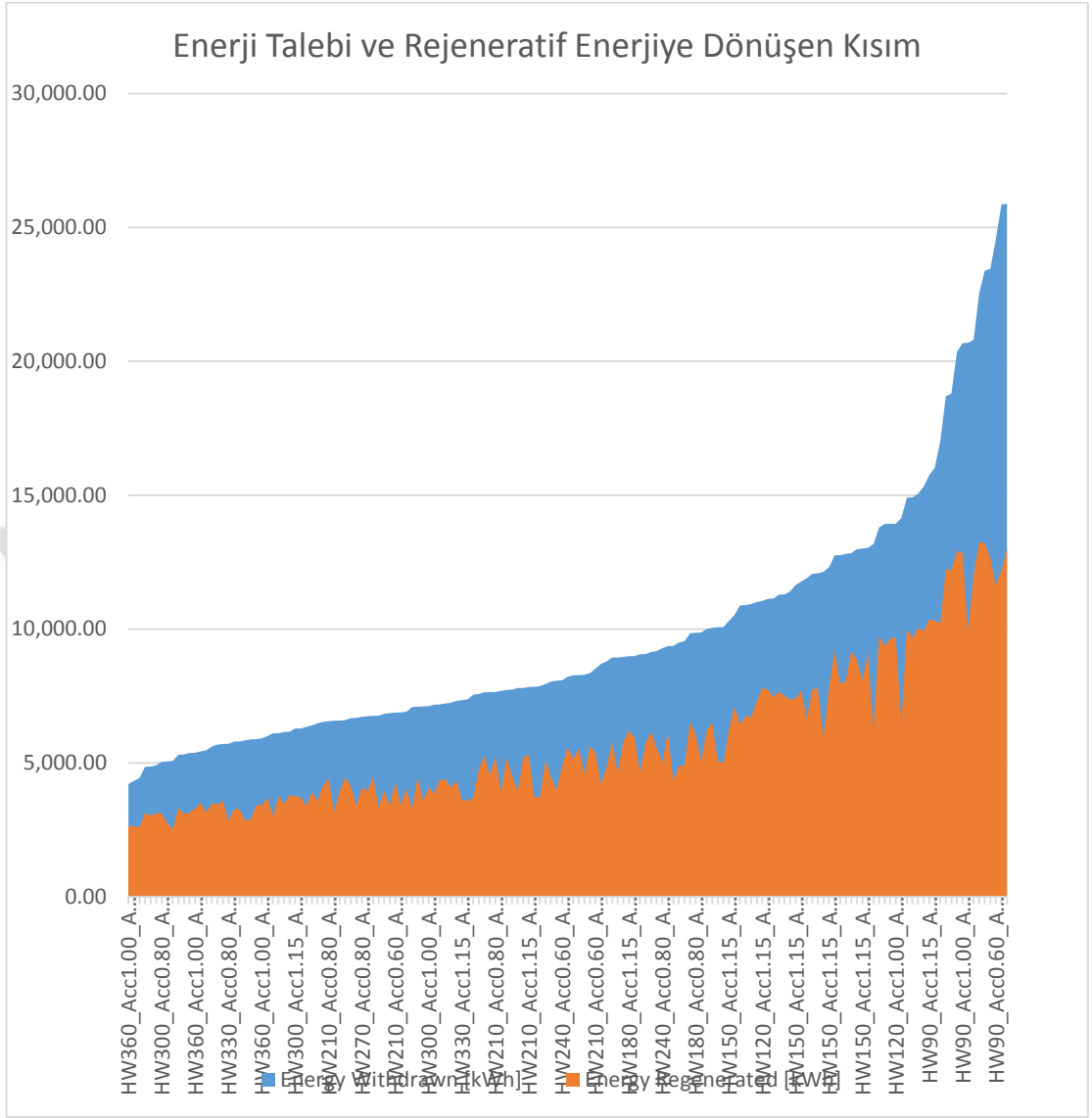
Maksimum Hızlanma İvmesi (m/sn <sup>2</sup> )	Enerji Talebi(kWh)	Rejeneratif Enerji(kWh)	TAS (sn)
0,60	5.119	3.043	330
0,80	6.014	6.535	330
1,00	6.217	5.573	330
1,15	6.291	7.870	330



**Şekil 6.3.**İvmelenmeye Bağlı Rejeneratif Enerji Değişimi

Şekil 4.5 incelendiği zaman artan hızlanma ivme ile enerji tüketiminin ve rejeneratif enerjinin arttığı gözlemlenmiştir.

**6.4.Test-2 Aracı İçin Değerlendirme;** Test 2 aracı Ankaray Hafif Metroya göre daha ağır bir tren ve maksimum ivmelenme ve frenleme ivmesi de daha yüksektir. Bu araca ait simülasyonun özeti niteliğindeki grafik aşağıda verilmiştir.



**Şekil 6.4:** Test -2 Treni İçin Enerji Talebi

Şekilden de görüldüğü gibi diğer parametreler sabit tutulsa dahi Test Treni-2 Ankaray Hafif göre ağırlığı ve hızlanma ivmesi yüksek olduğu için enerji talebi ve rejeneratif enerji daha yüksek olduğu görülmektedir.

Test-1 ve Test-2 treni için toplam da 320 adet simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyon sonucunda tren ağırlığı, maksimum ivmelenme ve trenler arası süre ele alınmıştır.



## SONUÇ

Bu tezde, DC raylı sistemlerdeki enerji tüketim değerinin bazı parametrelerden nasıl etkilendiği incelenmiştir. İncelemeler sonucunda aşağıdaki hususlar tespit edilmiştir;

Hattaki çalışmamızda görüldüğü gibi trenler yoğun olduğunda diğer araçların yapmış olduğu faydalı frenleme enerjisini hatta bulunan trenler kullanmaktadır dolayısıyla tren işletme süresinin kısa olması rejeneratif enerjinin geri kazanımında çok etkilidir. Daha kısa TAS daha fazla geri kazanım dolayısı ile daha az enerji tüketimi anlamına gelmektedir ayrıca yolcu konforu açısından da çok önemlidir.

Trenin ağırlığı enerji tüketimini lineer olarak etkilemektedir. Yeni alınacak araçlarda bu konu dikkate alınmalıdır.

Düşük hızlanma oranı enerji tüketim değerini azaltır, ancak bu uygulamalar yolculuk süresini arttırmaktadır. Yani yeni alınacak trenlerde maksimum hızlanma ivmesi ne kadar fazla olursa hatta verilen faydalı enerji o ölçüde fazla olacaktır ayrıca yolcular için konfor ve zaman yönünden faydalı olacaktır.

Bir diğer husus işletme açısından en önemli parametrelerden biri olan kişi başına enerji tüketiminde araçların belirli bir doluluk oranını sağlaması gerektiği bilinen bir gerçektir.

İstasyonlara veya araç üstüne yerleştirilecek enerji depolama sistemlerinin, yapım döneminde elektrik tasarrufu açısından düşünülmesi sistemdeki birçok malzemenin yerleştirilmesine gerek kalmayacaktır.

Tren üzerine veya istasyonlarda yerleştirilecek enerji depolama sistemlerinin, inşaa döneminde elektrik sistemlerinin tasarım aşamasında düşünülmesi durumunda, sistemde önemli oranda enerji verimliliği de sağlayacaktır.

Şehir içi elektrikli ulaşım sistemleri gibi kısa mesafeli sistemlerde enerji akışı, sık sık yapılan hızlanma ve yavaşlama nedeniyle çok daha düzensizdir. Bu nedenle aracın ve sabit tesisin enerji gereksinimini ortalama gücün üstünde belirlemek gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

1. **Hasegawa, I.** ve **Uchida, S.**, (1999). Breaking Systems, Japon RailwayTransport Review.
2. **Açıkbaş, S.**, (2008). Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
3. **Sels, T., Dragu, C., Craenenbroeck, T. ve Belmans, R.**, (2001). New Energy Storage Devices for an Improved Load Managing on Distribution Level, Power TechProceedings,10-13 September 2001, Porto
4. **Gemici, S.**, (2006). Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Enerji Depolama Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
5. **Caputo,L** (2000). Control of Energy Devices for Rail Vehicles, Lund Institute of Technology
6. **Brenna, M., Foadelli,F., Tironi,E., Zaninelli,** (2002), Ultracapacitor Applications For Energy Saving in Subway Transportation Systems, Politecnico di Milano
7. **Chymera,M., Renfrew,A., Barnes,M.,**(2000). Energy Storage Devices in Railway Systems”, University of Manchester
8. **Kocatepe,C., Uzunoğlu, M., Yumurtaçı, R., Karakaş,A., Arıkan,O.,** 2003,“Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi
9. **Açıkbaş, S., Alataş, A.**, (2006), Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş ve Enerji Geri Kazanımı, Ulaşım AŞ, İstanbul.
10. **Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hillmansen, S. and Goodman, C.J.,**(2007). Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburbanrailways, IET Electr. Power Appl., Vol. 1, No. 5

**11.** Kurtulan, S., (1992). Bir elektrikli ulaşım sisteminin modellenmesi ve simülasyonu, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü

**12. Gordon S.P., Rorke W.S.,**(1995). Energy Storage and Alternatives to Improve Train Voltage on a Mass Transit System, Sandia National Labs, Albuquerque, April.

**13. Barrero R., Mierlo J. V., Tackoen X.,**(2008). Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network, VPPC IEEE.

**14. Ündil, S.,** (1994). Bir elektrikli ulaşım taşıtının bond graf metodu ile simülasyonu ve geçici rejim analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

**15. Ke, R., Chen, M.C. ve Lin, C.L.,** (2009). Block-Layout Design Using MAX-MIN Ant System for Saving Energy on Mass Rapid Transit Systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10(1).

**16. Miyatake, M. ve Ko, H.,** (2009). Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(1).

**17. Eickhoff B. ve Nowell R.,** (2011). Determining the benefit of train mass reduction, A More and More Energy Efficient Railway, 24 May 2011, London.

**18. Açıkbaz, S. and Söylemez, M.T.,** (2004). Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, Computers in Railways IX, WIT Press, ISBN:1-85312-7159.

**19.** <https://www.kayseri.bel.tr/ulasim> 05.12.2019

**20. Albert, H., Levin, C., Vietrose, E. and Witte, G.,** (1995). Reducing energy

consumption in underground systems, September

21. <https://www.ego.gov.tr/tr/sayfa/1075/rayli-sistem-19/12/2019>

22. **Açıkbaş, S. and Söylemez, M.T.**, (2007). Energy wise driving of a mass transit train, 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa Turkey.

23. <https://moovitapp.com/index/tr/> 11.10.2019

24. **Yu, D., Lo, K. L., Wang, X. and Wang, X.**, (2002). MRTS traction power supply system simulation using Matlab/Simulink, Vehicular Technology Conference, IEEE.

25. **Açıkbaş, S.; Söylemez, M.E.**,(2008). Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms, IET Elec. Power Appl., Vol. 2, No. 3.

26. **Bae, C., Jang, D., Kim, Y. Chang, S. ve Mok, J.**, (2007). Calculation of Regenerative Energy in DC 1500V Electric Railway Substations, The 7th International Conference on PowerElectronics,22-26 October 2007, Korea

27. **Hayashiya, H., Watanabe, Y., Fukusawa, Y., Miyagawa, T., Egami, A.,Kikuchi, S. ve Yoshizumi, H.**, (2012). Cost impacts of high efficiency power supply Technologies in railway power supply –Traction and Station, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference,04-06 September 2012, Serbia.

28. **Wilkinson,R.H., Putter,C., Enslin,J.H.R.**, (2005). DC-Side Harmonic Compensation in DC Traction Applications”, University of Stellenbosch, South Africa

29. **Bassett J.R., Charmund J.D.**, (1989). Optimized Diodes Reduce GTO Stress, Railway Technology International.

- 30. Zhongming, Y., Lo, E. W. C., Yuen, K. H., Tang, P., Yes, G., (2001).** A study of Current Harmonics of Electrical Traction Power Supply System, Ryerson Polytechnic University, Toronto
- 31. Furlong, E. R., Piemontesi, M., Prasad, P. ve Sukumar, D., (2003).** Advances in Energy Storage Techniques for Critical Power Systems, General Electric, Atlanta
- 32. Holm, S. R., Polinder, H., Ferreira, J. A., van Gelder, P. ve Dill, R., (2002).** Comparison of Energy Storage Technologies as Energy Buffer in Renewable Energy Sources with Respect to Power Capability, IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Theme: Distributed Generation., (pp. 1-6)., 2002 Piscataway, NJ, USA.
- 33. Ruddell, A., (2003).** Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and Recommended R&D strategy, WT. Report.
- 34. RWE Piller GmbH., (2002).** Powerbridge Application at Uestra, Hannover, Germany.
- 35. Sels, T., Dragu, C., Craenenbroeck, T. ve Belmans, R., (2001).** New Energy Storage Devices for an Improved Load Managing on Distribution Level”
- 36. Kießling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., (2001).** Contact Lines for Electrical Railways: Planning –Design Implementation, Publicis Corporate Publishing German
- 37. Lander W. C., (1989).** Power Electronics, Mc Graw Hill Publishing Company, 207, England.
- 38. Kılıç B., Tuna S., Yağcıtekin B., (2011).** Metropolitan Raylı Sistemlerde Enerji Yönetimi, 2.Ulusal Enerji Verimliliği Forumu, İstanbul.
- 39. Samineni S., Johnson B. K., Hess H. L., Law J. D., (2003).** Modeling and Analysis

of a Flywheel Energy Storage System with a Power Converter Interface, IPST 2003,  
**40. Pagiela S., Steiner M., Klohr M.,**(2007). Energy Storage System with UltraCaps  
on

Board of Railway Vehicles, 2007 European Conference on Power Electronics and  
Applications, Aalborg, Danimarka.

**41. Barrero R., Mierlo J.V., Tackoen X.,**(2008). Supercapacitors on-board light rail  
vehicles: enhanced energy storage systems for improved vehicle efficiency, Proc.  
IEEE/ASME Joint Rail Conference, Wilmington.

**42. Steiner M., Scholten J.,**(2004). Energy Storage On Board Of DC Fed Railway  
Vehicles, PESC 2004 Conference, Aachen, Germany

**43. Pham, K.D., Thomas, R.S. and Stinger, W.E.,** (2003). Operational and safety  
considerations in designing a light rail DC traction electrification system,  
IEEE/ASME Joint Rail Conference.

**44. Farran J.I.,** (2005). Implementation of a pioneering light rail system in Bordeaux  
Looking forward, TRB Annual Meeting

**45. Steiner, M. and Klohr, M.,** (2005). Energy storage on board of railway vehicles,  
UITP Congress, Roma, 5–9 June.

**46. Açıkbaz, S.,** (1994). A method for stochastic assessment of railway electricity  
supply, MSc. Dissertation, UMIST, Manchester, England.

**47. Chang, C.S. and Sim, S.S.,** (1997). Optimising train movements through  
coastcontrol using genetic algorithms, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 144, No. 1.

**48. Mellit, B., Goodman, C. J. and Arthurton, R. I. M.,** (1978). Simulator for studying  
operational and power-supply conditions in rapid-transit railways, IEE Proc., Vol 125,  
ITM 4

**49. Söylemez, M. T., Açıkbaş, S. and Kaypmaz. A., (2005).** Controlling rail potential of DC supplied rail traction systems, TÜBİTAK ELEKTRİK Journal ELECO 2005 Special Edition.

**50. Cai, Y., Irving, M.R. and Case, S.H., (1995).** Modeling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol142, ITM 5.

**51. Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hilmansen, S. ve Goodman, C.J.,**

**52. Hartland, D., (2012).** Heating the countryside or saving the kilowatt hours, Mech E Railway division seminar gaining traction in energy efficiency, 2012, London.

**53. Açıkbaş, M. Ve Söylemez, M.T., (2004).** Energy Loss Comparison Between 750 VDC and 1500 VDC Power Supply Systems Using Rail Power Simulation.

**54. Albert, H., Levin, C., Vietrosa, E. ve Witte, G., (1995).** “Reducing energy consumption in underground systems”, September

**55. Holm, S. R., Polinder, H., Ferreira, J. A., van Gelder, P. ve Dill, R., (2002).** A Comparison of Energy Storage Technologies as Energy Buffer in Renewable Energy Sources with Respect to Power Capability, IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Theme: Distributed Generation., 1-6, Piscataway, NJ, USA.

**56.** <https://www.sekizsilindir.com/2017/06/volan-nedir/> 10.09.2019

**57. Cegrell,T.,(2001).** Power System Control Technology, Prentice-Hall International Series, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden



- 58. De La Rosa, F.**,(2006). Harmonics and Power Systems”, Taylor & Francis
- 59. Konishi,T., Hase,S., Nakamichi,Y.**, (2004). Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC, Power Supply Systems, Japan
- 60. Kumar,O. R., Karinakara,K., Kumar, E. M., Nambudiri,P.V.V.**,(2002). Srinivasan,K. N., Harmonic Levels in a Traction System–An Overview, Central Power Research Institute, BangaloreIndia
- 61. Bryan, B. P., Andrews, J. A.**, (2004). Advance in Flywell Energy Storage Systems, Texas.
- 62. Fuertes, A., Casals, M., Gangoells, M. ve Puigdollers, O.**, (2012). Overcoming Challanges for energy management in undergorund railway stations, Europeanconference on product and process modelling, 6 July 2012, Reykjavik.
- 63. Gandy, S.**, (2000). A Guide to the Range and Suitability of Electrical EnergyStorage Systems for Various Applications, and an Assessment of Possible PolicyEffects, Master Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine
- 64. Zhang, W. ve Wei, J.**, (2012). The experimental research on Beijing subway air-conditioning system energy-saving, Applied Mechanics and Materials, 170.
- 65. Steiner, M., Scholten, J.**, (2004). Energy Storage on Board of DC Fed Railway Vehicles, PESC Conference 2004, Aachen, Germany.
- 66. Açıkbş, S. ve Söylemez, M.T.**,(2018). Catenary System Paralelling and Its Effect on Power Consumption and Regenerated Energy Recuperation.
- 67. Wong K.K., Ho T.K.**,(2003). Coast control of train movement with genetic algorithm, 1nd edition, IEEE Conference Publications, Newyork.

- 68. Goh, E.J., Chu, K.N. and Ng, N.K., (2004).** 1500V DC traction system for the North East Line, Int'l Conf. on Power System Technology- Powercon Singapore,21-24 November.
- 69. Açıkbaş, S. ve Söylemez, M.T., (2005).** Raylı toplu taşımada enerji verimliliği ve katener sistemlerinin paralellenmesi, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli.
- 70. Albrecht T., (2004).** Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control, Computers in Railways IX, WIT Press, ISBN:1-85312-715-9.
- 71. Steiner, M. and Scholten, J., (2004).** Energy storage on board of DC fed railway vehicles, PESC 2004 Conference, Aachen, Germany.
- 72. Andrade Jr, R., Ferreira, A.C., Sotelo, G.G., Suemitsu, W.I., Rolima, L.G.B.,Silva Neto, J.L., Neves, M.A., Dos Santos, V.A., Da Costa, G.C., Rosario,M., Stephan,R. ve Nicolskya, R., (2004).** A superconducting high-speed flywheel energy storagesystem”, Physica C Superconductivity, 408–410
- 73. Gordon, S.P. and Lehrer, D.G., (1998).** Coordinated train control and energy management control strategies, ASME/IEEE Joint Railroad Conference, p. 166-176.
- 74. Wong, K.K. and Ho, T.K., (2003).** Peak power demand reduction under moving block signalling using an expert system, .IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 150.
- 75. Goldberg, D.E., (1989).** Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley.
- 76. Gen, M., Cheng R., (1997).** Genetic algorithms and engineering design, John Wiley& Sons.

- 77. Cai, Y., Irving, M. R. and Case, S. H., (1995).** Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 142, ITM 5.
- 78. Goodman, C. J., Siu, L. K. and Ho, T. K., (1998).** A review of simulation models for railway systems, Int. Conf. on Developments in Mass Transit Systems, IEE, pp.80-84.
- 79. Söylemez, M. T. and Açıkbaş, S., (2004).** Multi-train simulation of DC rail traction power systems with regenerative braking, Computers in Railways IX, WIT Press, Boston, ISBN: 1-85312-715-9.
- 80. Goodman, C.J. and Siu, L.K., (1994).** DC railway power network solution by diakoptics, Railroad Conference, IEEE.
- 81. Açıkbaş, S. ve Söylemez, M. T., (2007).** Raylı toplu taşımada enerji tüketim değerine etki eden parametrelerin incelenmesi, II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli
- 82. Chang, C.S. and Sim, S.S., (1997).** Optimising train movement through coast control using genetic algorithm, IEE Proc.-Electr. Power Applications, 144: 65-73.
- 83. Hosseini, S.H., Shahnia, F., Sarhangzadeh, M., Babei, E., (2004).** Power Quality Improvement of DC Electrified Railway Distribution Systems Using Hybrid Filters, University of Tabriz
- 84. Cheung, Y. C. K., Cheung, T. H. S., De Silva, R. G. N., Juvonen, M. P. T., Singh, R. ve Woo, J. J., (2003),** Large Scale Energy Storage Systems, Imperial College, London.

**85.Kozak, M. ve Kozak, Ş.,(2000).** Enerji Depolama Yöntemleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, International Science, 4(2).

**86. Okada, Y., Koseki, T., Hisatomi, K.,(2001).** Power Management Control in DC-Electrified Railways for Regenerative Braking Systems of Electric Trains, University of Tokyo, Shin-Keisei Electric Railway, Japan

**87.** <https://www.alstom.com> istasyon üzeri enerji depolama nedir/ 11.10.2019

**88. Sertsöz, M., (2012).** Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliği, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

## EKLER

### EK.1.

#### Ankaray Hafif Metro Aracı Enerji Simülasyonu

Number	Name	Energy Withdrawn [kWh]	Energy Regenerated [kWh]	Energy Burnt [kWh]	Energy per vhc per km [kWh/vhc/km]	Receptivity Rate [%]	Recuperation Ratio [%]
1	HW90_Acc0.60_AW4	25.821	10.587	4.487	7,37	57,62	19,11
2	HW90_Acc0.80_AW4	25.233	10.117	5.448	7,18	63,96	21,77
3	HW90_Acc0.60_AW3	24.820	10.876	1.485	7,08	50,49	17,51
4	HW90_Acc1.00_AW4	23.878	9.214	134	6,79	76,06	26,07
5	HW90_Acc0.60_AW2	23.602	8.013	136	6,72	46,15	16,51
6	HW90_Acc0.80_AW3	23.145	8.105	754	6,58	67,44	23,96
7	HW90_Acc1.15_AW4	22.822	5.414	3.053	6,49	85,01	29,24
8	HW90_Acc0.80_AW2	21.145	6.271	503	6,01	69,59	25,57
9	HW90_Acc1.00_AW3	20.859	4.454	2.430	5,93	86,35	31,05
10	HW90_Acc0.60_AW1	20.251	4.804	276	5,77	46,02	16,72
11	HW90_Acc1.15_AW3	20.161	3.634	2.086	5,73	92,71	33,38
12	HW90_Acc1.00_AW2	18.774	3.980	293	5,34	90,59	33,67
13	HW90_Acc1.15_AW2	18.232	3.403	507	5,18	95,99	35,67
14	HW90_Acc0.80_AW1	17.406	2.692	1.632	4,95	76,64	28,63
15	HW90_Acc1.00_AW1	15.579	2.785		4,43	96,1	36,2
16	HW120_Acc0.80_AW4	15.374	5.531	209	5,82	92,54	33,2
17	HW90_Acc1.15_AW1	15.338	3.107	479	4,35	98,54	37,19
18	HW120_Acc1.00_AW4	14.956	4.170	935	5,66	97,73	35,15
19	HW120_Acc0.60_AW4	14.864	3.562	2.050	5,64	98,31	34,64
20	HW120_Acc1.15_AW4	14.819	4.700	239	5,6	99,11	35,74

21	HW120_Acc0.80_AW3	14.321	4.641	149	5,42	90,69	33,92
22	HW120_Acc1.00_AW3	13.725	3.810	277	5,19	98,27	36,84
23	HW120_Acc0.60_AW3	13.668	3.396	512	5,19	98,49	36,13
24	HW120_Acc1.15_AW3	13.652	2.988	1.647	5,16	99,27	37,22
25	HW120_Acc0.80_AW2	13.297	3.970	100	5,03	89,89	34,59
26	HW180_Acc0.60_AW4	13.018	10.977	3.956	7,37	43,6	15,35
27	HW120_Acc0.60_AW2	12.635	2.767	1.355	4,8	98,29	37,11
28	HW150_Acc0.80_AW4	12.633	5.485	771	5,97	90,84	32,25
29	HW120_Acc1.00_AW2	12.630	3.204	292	4,77	99,04	38,16
30	HW120_Acc1.15_AW2	12.620	3.076	911	4,77	99,07	38,27
31	HW150_Acc1.00_AW4	12.359	4.759	624	5,83	95,93	34,09
32	HW180_Acc0.80_AW4	12.326	10.898	794	6,97	56,46	20,34
33	HW150_Acc1.15_AW4	12.267	5.311	395	5,78	97,27	34,6
34	HW180_Acc0.60_AW3	12.144	9.110	2.128	6,87	43,44	15,96
35	HW150_Acc0.60_AW4	11.957	4.148	1.468	5,66	97,46	34,37
36	HW150_Acc0.80_AW3	11.661	3.995	1.380	5,51	91,29	33,71
37	HW150_Acc1.15_AW3	11.320	3.489	1.495	5,34	97,06	35,93
38	HW180_Acc0.60_AW2	11.316	6.663	271	6,4	43,34	16,41
39	HW150_Acc1.00_AW3	11.299	3.112	1.547	5,33	97,24	35,99
40	HW180_Acc0.80_AW3	11.239	6.672	182	6,35	60,85	22,82
41	HW120_Acc0.80_AW1	11.233	2.802	428	4,25	93,62	36,28
42	HW180_Acc1.00_AW4	11.006	5.126	2.904	6,22	80,38	29,01
43	HW150_Acc0.60_AW3	10.979	3.839	272	5,2	98,27	36,03
44	HW120_Acc1.00_AW1	10.926	2.345	348	4,13	98,94	38,44
45	HW120_Acc0.60_AW1	10.911	2.324	842	4,14	98,51	37,44
46	HW120_Acc1.15_AW1	10.900	2.351	230	4,11	99,23	38,65

47	HW150_Acc0.80_AW2	10.745	3.981	110	5,07	91,98	34,93
48	HW180_Acc1.15_AW4	10.607	6.311	204	5,99	87,8	31,71
49	HW150_Acc1.15_AW2	10.546	3.548	554	4,97	95,77	36,54
50	HW150_Acc1.00_AW2	10.465	3.331	548	4,93	96,76	36,85
51	HW180_Acc0.80_AW2	10.217	4.795	260	5,77	65,31	25,18
52	HW150_Acc0.60_AW2	10.124	2.848	822	4,79	98,6	37,19
53	HW180_Acc1.00_AW3	9.907	4.705	210	5,59	85,94	32,24
54	HW180_Acc0.60_AW1	9.705	4.065	283	5,49	45,44	17,26
55	HW180_Acc1.15_AW3	9.652	4.368	308	5,45	90,97	34,12
56	HW150_Acc1.15_AW1	9.221	3.115	465	4,34	94,08	36,18
57	HW150_Acc0.80_AW1	9.107	2.532	1.154	4,3	94,81	36,3
58	HW210_Acc0.80_AW4	9.096	6.080	85	5,98	86,9	31,26
59	HW150_Acc1.00_AW1	9.070	2.255	1.277	4,28	96,22	36,98
60	HW180_Acc1.00_AW2	8.993	3.020	1.416	5,08	89,64	34,54
61	HW210_Acc0.60_AW4	8.892	5.494	496	5,87	90,45	31,96
62	HW180_Acc1.15_AW2	8.862	3.269	303	5	92,57	35,68
63	HW210_Acc1.15_AW4	8.769	4.214	1.233	5,76	94,25	34,05
64	HW210_Acc1.00_AW4	8.754	4.197	1.230	5,75	94,58	34,13
65	HW150_Acc0.60_AW1	8.738	2.447	426	4,14	98,89	37,56
66	HW240_Acc1.15_AW4	8.682	8.153	60	6,51	70,75	25,56
67	HW240_Acc1.00_AW4	8.661	7.824	791	6,5	70,69	25,51
68	HW270_Acc0.60_AW4	8.625	11.074	2.651	7,27	42,6	15,22
69	HW210_Acc0.80_AW3	8.446	4.511	563	5,55	86,25	32,32
70	HW180_Acc0.80_AW1	8.415	2.597	1.556	4,75	74,34	28,84
71	HW270_Acc0.80_AW4	8.365	8.834	4.769	7,04	51,34	18,67
72	HW240_Acc0.80_AW4	8.349	6.496	566	6,28	77,58	27,93

73	HW240_Acc1.15_AW3	8.332	6.541	193	6,25	64,61	24,34
74	HW240_Acc1.00_AW3	8.181	5.460	2.138	6,14	67,94	25,55
75	HW210_Acc0.60_AW3	8.157	4.540	179	5,38	91,96	33,8
76	HW270_Acc0.60_AW3	8.070	8.256	616	6,8	42,44	15,78
77	HW210_Acc1.00_AW3	8.055	3.105	1.508	5,29	94,9	35,64
78	HW240_Acc1.15_AW2	8.037	6.919	53	6,02	57,91	22,4
79	HW210_Acc1.15_AW3	8.029	3.477	1.345	5,27	95,53	35,89
80	HW240_Acc0.80_AW3	7.991	5.609	684	6,01	71,5	26,82
81	HW210_Acc0.80_AW2	7.770	2.823	1.510	5,11	87,51	33,69
82	HW240_Acc1.00_AW2	7.713	4.618	441	5,79	65,46	25,32
83	HW270_Acc0.80_AW3	7.667	7.586	130	6,46	55,28	20,91
84	HW240_Acc0.60_AW4	7.664	5.315	59	5,77	93,04	33,04
85	HW180_Acc1.00_AW1	7.624	2.813	506	4,3	93,28	36,16
86	HW240_Acc0.80_AW2	7.546	3.740	1.820	5,67	68,41	26,39
87	HW270_Acc0.60_AW2	7.533	5.308	3.002	6,35	42,54	16,25
88	HW210_Acc0.60_AW2	7.515	3.565	544	4,96	92,96	35,08
89	HW270_Acc1.00_AW4	7.493	6.424	163	6,31	75,48	27,46
90	HW180_Acc1.15_AW1	7.468	2.771	370	4,21	96,79	37,56
91	HW210_Acc1.15_AW2	7.407	2.913	1.403	4,86	96,08	37,13
92	HW210_Acc1.00_AW2	7.397	3.324	491	4,86	96,06	37,09
93	HW270_Acc1.15_AW4	7.239	6.293	109	6,09	83	30,1
94	HW240_Acc0.60_AW3	7.101	3.757	639	5,35	92,65	34,18
95	HW240_Acc1.15_AW1	7.014	3.682	530	5,25	57,16	22,14
96	HW330_Acc1.15_AW4	6.978	11.092	1.663	7,13	50,28	18,31
97	HW270_Acc0.80_AW2	6.969	5.557	329	5,87	60,37	23,43
98	HW330_Acc1.00_AW4	6.935	10.440	3.175	7,09	51,42	18,72



99	HW240_Acc1.00_AW1	6.856	3.442	1.002	5,14	61,32	23,72
100	HW330_Acc0.80_AW4	6.758	10.519	989	6,91	56,12	20,34
101	HW270_Acc1.00_AW3	6.755	4.677	643	5,68	81,43	30,71
102	HW330_Acc1.15_AW3	6.693	9.197	359	6,84	44,48	16,87
103	HW270_Acc1.15_AW3	6.632	4.095	1.167	5,58	85,61	32,22
104	HW330_Acc1.00_AW3	6.581	8.296	188	6,73	47,96	18,15
105	HW360_Acc0.60_AW4	6.574	10.436	5.167	7,36	39,13	14,06
106	HW240_Acc0.60_AW2	6.572	3.306	572	4,95	92,92	35,18
107	HW300_Acc0.80_AW4	6.565	6.832	436	6,13	82,53	29,73
108	HW210_Acc0.80_AW1	6.550	2.567	1.351	4,31	91,8	35,53
109	HW210_Acc0.60_AW1	6.519	2.809	595	4,3	92,74	35,15
110	HW300_Acc1.00_AW4	6.494	6.896	73	6,06	84,91	30,75
111	HW300_Acc1.15_AW4	6.488	6.630	99	6,05	85,11	30,86
112	HW270_Acc0.60_AW1	6.477	3.955	1.249	5,46	44,88	17,15
113	HW240_Acc0.80_AW1	6.463	2.976	532	4,86	70,9	27,41
114	HW360_Acc0.80_AW4	6.416	10.812	3.521	7,17	46,53	17
115	HW330_Acc0.80_AW3	6.404	7.851	118	6,55	53,1	20,03
116	HW210_Acc1.15_AW1	6.359	2.694	468	4,17	97,23	37,84
117	HW210_Acc1.00_AW1	6.346	2.693	218	4,17	97,49	37,89
118	HW330_Acc1.15_AW2	6.291	7.870	75	6,43	42,92	16,76
119	HW300_Acc0.60_AW4	6.240	5.475	284	5,84	90,74	32,22
120	HW330_Acc1.00_AW2	6.217	5.573	2.427	6,36	45,31	17,63
121	HW270_Acc1.00_AW2	6.180	3.366	588	5,2	84,38	32,64
122	HW270_Acc1.15_AW2	6.180	3.933	323	5,2	84,75	32,84
123	HW360_Acc0.60_AW3	6.145	10.531	423	6,88	39,36	14,71
124	HW300_Acc0.80_AW3	6.079	4.588	1.177	5,68	82,71	31,03

125	HW300_Acc1.15_AW3	6.068	4.133	1.325	5,66	83,54	31,44
126	HW330_Acc0.80_AW2	6.014	6.535	181	6,15	51,83	20,06
127	HW300_Acc1.00_AW3	6.006	4.006	1.686	5,6	85,22	32,05
128	HW330_Acc0.60_AW4	5.948	5.596	1.098	6,1	82,12	29,12
129	HW360_Acc1.00_AW4	5.917	8.315	74	6,61	65,42	23,89
130	HW360_Acc0.80_AW3	5.874	8.146	141	6,57	51,02	19,38
131	HW360_Acc1.15_AW4	5.772	6.621	607	6,45	71,15	25,99
132	HW300_Acc0.60_AW3	5.765	4.553	179	5,39	90,88	33,56
133	HW270_Acc0.80_AW1	5.742	2.838	981	4,83	70,39	27,38
134	HW360_Acc0.60_AW2	5.725	7.897	73	6,41	40,07	15,38
135	HW300_Acc1.15_AW2	5.695	3.533	1.400	5,31	81,33	31,54
136	HW240_Acc0.60_AW1	5.670	2.687	647	4,27	93,91	35,67
137	HW300_Acc0.80_AW2	5.644	3.074	1.349	5,27	82,47	31,76
138	HW300_Acc1.00_AW2	5.581	2.748	1.673	5,21	85,11	32,85
139	HW330_Acc0.60_AW3	5.520	4.529	364	5,66	81,81	30,17
140	HW360_Acc0.80_AW2	5.379	6.340	268	6,01	54,87	21,39
141	HW330_Acc1.00_AW1	5.378	3.668	1.640	5,5	46,03	17,97
142	HW360_Acc1.00_AW3	5.365	5.263	1.826	5,99	71,19	26,99
143	HW300_Acc0.60_AW2	5.350	2.951	1.685	5,01	90,76	34,39
144	HW270_Acc1.00_AW1	5.342	2.916	530	4,49	84,59	32,98
145	HW270_Acc1.15_AW1	5.338	2.667	1.204	4,48	85,07	33,18
146	HW330_Acc1.15_AW1	5.338	3.436	1.974	5,46	47,37	18,55
147	HW360_Acc1.15_AW3	5.210	5.293	549	5,82	77,5	29,33
148	HW330_Acc0.80_AW1	5.155	3.677	683	5,27	54,42	21,09
149	HW330_Acc0.60_AW2	5.119	3.043	1.584	5,25	82	31,06
150	HW300_Acc1.15_AW1	4.998	3.226	602	4,66	78,81	30,69

151	HW360_Acc0.60_AW1	4.903	4.629	311	5,49	43,37	16,63
152	HW360_Acc1.00_AW2	4.873	3.757	921	5,44	75,94	29,52
153	HW300_Acc1.00_AW1	4.846	3.185	558	4,52	84,72	32,88
154	HW300_Acc0.80_AW1	4.784	2.560	1.382	4,46	86,65	33,42
155	HW360_Acc1.15_AW2	4.718	3.052	1.695	5,27	82,63	32,06
156	HW300_Acc0.60_AW1	4.612	2.790	628	4,31	91,91	34,92
157	HW360_Acc0.80_AW1	4.466	2.938	1.607	4,99	63,75	24,91
158	HW330_Acc0.60_AW1	4.434	3.348	204	4,55	82,57	31,31
159	HW360_Acc1.00_AW1	4.033	3.208	478	4,5	85,18	33,12
160	HW360_Acc1.15_AW1	3.921	3.090	286	4,37	90,22	35,11

## EK.2. Ankara Hafif Metro Araçları İşletme Simülasyonu

Number	Name	Avg. Time (T2) [min]	Avg. Speed (T2) [kmph]	Avg. Time (T1) [min]	Avg. Speed (T1) [kmph]
1	HW360_Acc1.15_AW3	13:37	34	13:43	33,76
2	HW360_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,92
3	HW360_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:35	34,12
4	HW360_Acc1.00_AW4	13:50	33,51	13:52	33,4
5	HW360_Acc1.00_AW3	13:45	33,72	13:49	33,53
6	HW360_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,61
7	HW360_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,74
8	HW360_Acc0.80_AW4	14:05	32,89	14:07	32,79
9	HW360_Acc0.80_AW3	14:01	33,07	14:05	32,88
10	HW360_Acc0.80_AW2	13:58	33,18	14:04	32,92
11	HW360_Acc0.80_AW1	13:53	33,36	14:03	32,99

12	HW360_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
13	HW360_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68
14	HW360_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
15	HW360_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
16	HW330_Acc1.15_AW4	13:44	33,74	13:48	33,54
17	HW330_Acc1.15_AW3	13:38	33,99	13:43	33,77
18	HW330_Acc1.15_AW2	13:32	34,21	13:39	33,94
19	HW330_Acc1.15_AW1	13:23	34,59	13:35	34,09
20	HW330_Acc1.00_AW4	13:49	33,5	13:52	33,39
21	HW330_Acc1.00_AW3	13:45	33,7	13:49	33,53
22	HW330_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,59
23	HW330_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,72
24	HW330_Acc0.80_AW4	14:05	32,89	14:07	32,79
25	HW330_Acc0.80_AW3	14:01	33,06	14:05	32,88
26	HW330_Acc0.80_AW2	13:58	33,17	14:04	32,93
27	HW330_Acc0.80_AW1	13:53	33,36	14:03	32,99
28	HW330_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
29	HW330_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68
30	HW330_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
31	HW330_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
32	HW300_Acc1.15_AW4	13:44	33,74	13:48	33,55
33	HW300_Acc1.15_AW3	13:37	34	13:43	33,76
34	HW300_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,93
35	HW300_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:35	34,12
36	HW300_Acc1.00_AW4	13:49	33,52	13:52	33,39
37	HW300_Acc1.00_AW3	13:45	33,72	13:49	33,54

38	HW300_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,61
39	HW300_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,73
40	HW300_Acc0.80_AW4	14:05	32,91	14:07	32,79
41	HW300_Acc0.80_AW3	14:01	33,07	14:05	32,87
42	HW300_Acc0.80_AW2	13:58	33,18	14:04	32,92
43	HW300_Acc0.80_AW1	13:53	33,36	14:03	32,99
44	HW300_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
45	HW300_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68
46	HW300_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
47	HW300_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
48	HW270_Acc1.15_AW4	13:43	33,75	13:49	33,53
49	HW270_Acc1.15_AW3	13:38	33,99	13:43	33,76
50	HW270_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,92
51	HW270_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:35	34,11
52	HW270_Acc1.00_AW4	13:50	33,51	13:52	33,39
53	HW270_Acc1.00_AW3	13:44	33,72	13:48	33,54
54	HW270_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,62
55	HW270_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,74
56	HW270_Acc0.80_AW4	14:05	32,89	14:07	32,79
57	HW270_Acc0.80_AW3	14:01	33,07	14:05	32,87
58	HW270_Acc0.80_AW2	13:58	33,17	14:04	32,92
59	HW270_Acc0.80_AW1	13:53	33,36	14:03	32,99
60	HW270_Acc0.60_AW4	14:36	31,74	14:38	31,64
61	HW270_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68
62	HW270_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
63	HW270_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73

64	HW240_Acc1.15_AW4	13:43	33,75	13:48	33,53
65	HW240_Acc1.15_AW3	13:38	33,98	13:43	33,77
66	HW240_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,92
67	HW240_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:34	34,14
68	HW240_Acc1.00_AW4	13:49	33,52	13:52	33,4
69	HW240_Acc1.00_AW3	13:45	33,72	13:49	33,54
70	HW240_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,6
71	HW240_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,72
72	HW240_Acc0.80_AW4	14:05	32,9	14:07	32,8
73	HW240_Acc0.80_AW3	14:01	33,06	14:05	32,89
74	HW240_Acc0.80_AW2	13:58	33,17	14:04	32,93
75	HW240_Acc0.80_AW1	13:53	33,35	14:03	32,99
76	HW240_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
77	HW240_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68
78	HW240_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
79	HW240_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
80	HW210_Acc1.15_AW4	13:44	33,74	13:48	33,54
81	HW210_Acc1.15_AW3	13:37	34	13:43	33,76
82	HW210_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,92
83	HW210_Acc1.15_AW1	13:23	34,59	13:35	34,12
84	HW210_Acc1.00_AW4	13:49	33,52	13:52	33,4
85	HW210_Acc1.00_AW3	13:45	33,71	13:49	33,54
86	HW210_Acc1.00_AW2	13:40	33,91	13:47	33,61
87	HW210_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,72
88	HW210_Acc0.80_AW4	14:05	32,9	14:07	32,79
89	HW210_Acc0.80_AW3	14:01	33,06	14:05	32,88

90	HW210_Acc0.80_AW2	13:58	33,17	14:04	32,92
91	HW210_Acc0.80_AW1	13:53	33,35	14:03	32,99
92	HW210_Acc0.60_AW4	14:36	31,74	14:38	31,64
93	HW210_Acc0.60_AW3	14:34	31,81	14:37	31,68
94	HW210_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
95	HW210_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
96	HW180_Acc1.15_AW4	13:44	33,74	13:49	33,52
97	HW180_Acc1.15_AW3	13:37	34	13:43	33,76
98	HW180_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,92
99	HW180_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:35	34,12
100	HW180_Acc1.00_AW4	13:49	33,52	13:52	33,39
101	HW180_Acc1.00_AW3	13:44	33,71	13:49	33,54
102	HW180_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,61
103	HW180_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,72
104	HW180_Acc0.80_AW4	14:05	32,89	14:07	32,79
105	HW180_Acc0.80_AW3	14:01	33,06	14:05	32,87
106	HW180_Acc0.80_AW2	13:58	33,17	14:04	32,93
107	HW180_Acc0.80_AW1	13:53	33,36	14:03	32,99
108	HW180_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
109	HW180_Acc0.60_AW3	14:34	31,81	14:37	31,69
110	HW180_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
111	HW180_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
112	HW150_Acc1.15_AW4	13:44	33,73	13:48	33,55
113	HW150_Acc1.15_AW3	13:37	34	13:43	33,76
114	HW150_Acc1.15_AW2	13:32	34,22	13:39	33,92
115	HW150_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:34	34,14

116	HW150_Acc1.00_AW4	13:49	33,51	13:52	33,4
117	HW150_Acc1.00_AW3	13:45	33,7	13:49	33,53
118	HW150_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,62
119	HW150_Acc1.00_AW1	13:33	34,17	13:44	33,73
120	HW150_Acc0.80_AW4	14:05	32,9	14:07	32,79
121	HW150_Acc0.80_AW3	14:01	33,06	14:05	32,88
122	HW150_Acc0.80_AW2	13:58	33,17	14:04	32,93
123	HW150_Acc0.80_AW1	13:53	33,35	14:03	32,99
124	HW150_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
125	HW150_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68
126	HW150_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
127	HW150_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
128	HW120_Acc1.15_AW4	13:43	33,74	13:48	33,53
129	HW120_Acc1.15_AW3	13:38	33,99	13:43	33,77
130	HW120_Acc1.15_AW2	13:32	34,21	13:39	33,93
131	HW120_Acc1.15_AW1	13:23	34,61	13:35	34,12
132	HW120_Acc1.00_AW4	13:50	33,51	13:52	33,39
133	HW120_Acc1.00_AW3	13:45	33,71	13:49	33,53
134	HW120_Acc1.00_AW2	13:40	33,9	13:47	33,62
135	HW120_Acc1.00_AW1	13:33	34,18	13:44	33,72
136	HW120_Acc0.80_AW4	14:05	32,88	14:07	32,8
137	HW120_Acc0.80_AW3	14:01	33,06	14:05	32,88
138	HW120_Acc0.80_AW2	13:58	33,18	14:04	32,93
139	HW120_Acc0.80_AW1	13:53	33,35	14:03	32,99
140	HW120_Acc0.60_AW4	14:36	31,73	14:38	31,64
141	HW120_Acc0.60_AW3	14:34	31,82	14:37	31,68



142	HW120_Acc0.60_AW2	14:32	31,88	14:37	31,69
143	HW120_Acc0.60_AW1	14:28	32,02	14:36	31,73
144	HW90_Acc1.15_AW4	13:44	33,7	13:56	33,22
145	HW90_Acc1.15_AW3	13:37	33,99	13:46	33,64
146	HW90_Acc1.15_AW2	13:33	34,18	13:41	33,86
147	HW90_Acc1.15_AW1	13:23	34,6	13:36	34,06
148	HW90_Acc1.00_AW4	13:51	33,45	14:04	32,9
149	HW90_Acc1.00_AW3	13:45	33,7	13:53	33,36
150	HW90_Acc1.00_AW2	13:40	33,89	13:49	33,51
151	HW90_Acc1.00_AW1	13:33	34,17	13:45	33,69
152	HW90_Acc0.80_AW4	14:08	32,79	14:27	32,04
153	HW90_Acc0.80_AW3	14:02	33,01	14:17	32,44
154	HW90_Acc0.80_AW2	13:58	33,15	14:10	32,72
155	HW90_Acc0.80_AW1	13:53	33,35	14:03	32,96
156	HW90_Acc0.60_AW4	14:42	31,52	15:00	30,87
157	HW90_Acc0.60_AW3	14:37	31,69	14:55	31,06
158	HW90_Acc0.60_AW2	14:33	31,83	14:48	31,29
159	HW90_Acc0.60_AW1	14:29	31,98	14:38	31,66
160	HW360_Acc1.15_AW4	13:43	33,75	13:48	33,54

Test-2 Hafif Raylı Treni Enerji Simülasyonu EK-3 te verilmiştir.

### EK-3 Test-2 Aracı Enerji Simülasyonu

Number	Name	Energy Withdrawn [kWh]	Energy Regenerated [kWh]	Energy Burnt [kWh]	Energy per vhc per km [kWh/vhc/km]	Receptivity Rate [%]	Recuperation Ratio [%]
1	HW90_Acc0.60_AW4	27.080,23	12.535,02	6.539,65	7,72	47,83	18,13
2	HW90_Acc0.80_AW4	25.881,20	13.016,29	5.001,03	7,36	61,58	23,65
3	HW90_Acc0.60_AW3	25.854,65	12.211,80	6.847,67	7,37	43,93	17,18
4	HW90_Acc0.60_AW2	24.567,40	11.621,72	6.891,46	7	40,7	16,15
5	HW90_Acc0.80_AW3	23.452,18	12.670,46	4.244,95	6,67	66,5	26,43
6	HW90_Acc1.00_AW4	23.387,17	13.199,77	2.518,27	6,65	80,92	31,35
7	HW90_Acc1.15_AW4	22.549,31	13.258,17	1.579,00	6,4	88,09	34,12
8	HW90_Acc0.80_AW2	20.809,96	12.031,51	3.036,93	5,92	74,76	30,18
9	HW90_Acc0.60_AW1	20.691,01	9.924,82	5.391,59	5,89	45,68	17,97
10	HW90_Acc1.00_AW3	20.678,58	12.853,28	1.383,71	5,87	89,23	35,68
11	HW90_Acc1.15_AW3	20.346,33	12.906,48	999,73	5,78	92,25	36,92
12	HW90_Acc1.00_AW2	18.795,95	12.196,99	826,23	5,34	93,23	37,69
13	HW90_Acc1.15_AW2	18.695,60	12.235,20	664,55	5,3	94,57	38,23
14	HW90_Acc0.80_AW1	17.021,90	10.201,75	1.721,64	4,84	83,12	33,25
15	HW90_Acc1.00_AW1	16.019,65	10.320,74	443,53	4,55	95,7	38,14
16	HW90_Acc1.15_AW1	15.743,80	10.352,48	211,94	4,46	97,95	39,18
17	HW120_Acc0.80_AW4	15.315,04	9.924,19	843,46	5,8	91,5	37,22
18	HW120_Acc1.15_AW4	15.053,90	10.046,30	428,93	5,68	95,73	38,98
19	HW120_Acc0.60_AW4	14.915,40	9.655,97	604,68	5,66	93,74	37,77
20	HW120_Acc1.00_AW4	14.911,34	10.016,28	290,61	5,63	97,1	39,48
21	HW180_Acc0.60_AW4	14.145,92	6.472,76	4.529,98	8	30,01	12,08

22	HW120_Acc1.00_AW3	13.935,57	9.709,16	421,68	5,26	95,66	39,99
23	HW120_Acc0.80_AW3	13.932,70	9.626,02	561,71	5,27	94,16	39,42
24	HW120_Acc0.60_AW3	13.923,31	9.361,35	735,01	5,28	92,15	38,25
25	HW120_Acc1.15_AW3	13.796,44	9.730,78	278,49	5,21	97,14	40,66
26	HW180_Acc0.60_AW3	13.175,11	6.274,46	4.335,27	7,45	30,91	12,83
27	HW120_Acc0.80_AW2	13.035,86	9.115,31	593,66	4,93	93,49	39,53
28	HW150_Acc1.15_AW4	13.006,95	8.061,87	909,51	6,13	88,72	35,48
29	HW120_Acc0.60_AW2	12.983,35	8.851,60	731,5	4,92	91,74	38,48
30	HW120_Acc1.00_AW2	12.835,63	9.185,64	227,79	4,85	97,52	41,1
31	HW150_Acc1.00_AW4	12.806,94	8.038,67	738,42	6,04	90,81	36,31
32	HW150_Acc0.80_AW4	12.758,62	7.966,36	810,97	6,02	89,82	35,93
33	HW120_Acc1.15_AW2	12.756,07	9.229,49	197,79	4,81	97,86	41,45
34	HW150_Acc1.15_AW3	12.308,91	7.813,72	1.147,03	5,8	85,32	35,13
35	HW180_Acc0.60_AW2	12.137,72	5.931,26	3.923,31	6,86	33,85	14,19
36	HW150_Acc1.00_AW3	12.082,90	7.786,61	936,97	5,69	87,97	36,18
37	HW150_Acc0.60_AW4	12.065,21	7.753,77	518,18	5,71	93,32	37,49
38	HW180_Acc0.80_AW4	11.901,85	6.659,90	2.198,01	6,72	67	27,27
39	HW150_Acc0.80_AW3	11.776,73	7.716,96	747,81	5,56	90,31	37,18
40	HW150_Acc1.15_AW2	11.648,94	7.398,33	1.257,86	5,49	83	34,52
41	HW150_Acc1.00_AW2	11.408,02	7.371,30	1.017,49	5,38	86,2	35,77
42	HW150_Acc0.60_AW3	11.296,89	7.504,47	648,45	5,34	91,36	37,77
43	HW120_Acc0.80_AW1	11.284,83	7.664,71	490,86	4,27	93,6	38,86
44	HW120_Acc0.60_AW1	11.142,52	7.451,42	517,97	4,23	93,05	38,36
45	HW120_Acc1.00_AW1	11.123,58	7.748,38	152,94	4,2	98,03	40,58
46	HW120_Acc1.15_AW1	11.055,27	7.795,53	155,08	4,17	98,01	40,87
47	HW150_Acc0.80_AW2	11.006,24	7.298,87	748,89	5,19	89,74	37,31

48	HW180_Acc1.00_AW4	10.938,32	6.722,40	1.049,69	6,17	84,39	34,15
49	HW180_Acc1.15_AW4	10.899,50	6.745,00	978,39	6,15	85,49	34,6
50	HW180_Acc0.80_AW3	10.882,12	6.442,16	1.919,14	6,15	70,21	29,36
51	HW150_Acc0.60_AW2	10.526,08	7.096,42	630,58	4,98	91,11	38,05
52	HW150_Acc1.15_AW1	10.308,59	6.241,58	1.286,17	4,86	79,39	32,46
53	HW180_Acc0.60_AW1	10.073,63	5.000,44	2.949,74	5,69	41,01	16,91
54	HW240_Acc1.15_AW4	10.070,73	5.068,22	2.629,18	7,54	48,12	19,5
55	HW180_Acc1.00_AW3	10.044,61	6.514,25	894,55	5,67	86,27	35,88
56	HW150_Acc1.00_AW1	10.004,65	6.217,13	978,04	4,71	84,27	34,37
57	HW240_Acc1.00_AW4	9.874,30	5.055,51	2.468,28	7,4	51,18	20,76
58	HW180_Acc0.80_AW2	9.860,69	6.095,16	1.512,20	5,57	75,19	31,73
59	HW180_Acc1.15_AW3	9.843,69	6.529,03	652,85	5,55	90	37,38
60	HW240_Acc1.15_AW3	9.548,77	4.900,72	2.668,36	7,15	45,55	18,95
61	HW240_Acc1.00_AW3	9.497,43	4.897,13	2.645,98	7,12	45,97	19,16
62	HW270_Acc0.60_AW4	9.371,03	4.351,73	3.045,62	7,9	30,01	12,23
63	HW150_Acc0.80_AW1	9.366,14	6.145,91	475,83	4,42	92,26	37,71
64	HW240_Acc0.80_AW4	9.283,87	5.018,30	1.967,86	6,98	60,79	24,73
65	HW210_Acc0.60_AW4	9.182,38	5.563,75	965,9	6,05	82,64	33,37
66	HW180_Acc1.00_AW2	9.145,31	6.155,94	609,16	5,16	90,1	37,75
67	HW210_Acc0.80_AW4	9.068,25	5.734,89	716,55	5,96	87,51	35,62
68	HW240_Acc1.15_AW2	9.060,45	4.640,60	2.652,14	6,78	42,85	18
69	HW150_Acc0.60_AW1	8.988,64	5.982,94	397,63	4,25	93,35	38,32
70	HW180_Acc1.15_AW2	8.987,69	6.192,83	420,2	5,07	93,21	39,11
71	HW210_Acc1.15_AW4	8.962,33	5.789,80	508,89	5,88	91,21	37,08
72	HW240_Acc1.00_AW2	8.940,08	4.625,28	2.559,00	6,7	44,67	18,77
73	HW210_Acc1.00_AW4	8.937,71	5.776,72	503,94	5,87	91,28	37,1

74	HW240_Acc0.80_AW3	8.794,62	4.857,14	2.040,33	6,61	57,99	24,26
75	HW270_Acc0.60_AW3	8.704,07	4.211,09	2.874,51	7,33	31,74	13,31
76	HW210_Acc0.60_AW3	8.525,80	5.390,34	944,31	5,62	82,48	34,27
77	HW210_Acc1.15_AW3	8.354,49	5.618,46	534,05	5,48	90,49	37,83
78	HW240_Acc0.80_AW2	8.296,30	4.585,09	2.012,28	6,23	56,11	23,67
79	HW210_Acc0.80_AW3	8.281,67	5.548,68	571,84	5,44	89,69	37,54
80	HW180_Acc0.80_AW1	8.275,33	5.140,04	1.007,94	4,67	80,39	33,3
81	HW210_Acc1.00_AW3	8.217,69	5.596,37	411,37	5,4	92,65	38,69
82	HW240_Acc0.60_AW4	8.088,06	4.893,28	871,72	6,09	82,19	33,21
83	HW270_Acc0.60_AW2	8.071,64	3.977,95	2.656,82	6,8	33,21	14,07
84	HW270_Acc0.80_AW4	8.043,39	4.474,56	1.600,52	6,77	64,23	26,33
85	HW210_Acc0.60_AW2	7.948,24	5.088,25	901,74	5,24	82,28	34,5
86	HW330_Acc1.00_AW4	7.869,36	3.723,45	2.499,55	8,04	32,87	13,46
87	HW330_Acc1.15_AW4	7.847,67	3.728,32	2.476,73	8,02	33,57	13,75
88	HW210_Acc1.15_AW2	7.836,18	5.315,11	540,11	5,14	89,84	37,86
89	HW180_Acc1.00_AW1	7.802,24	5.206,80	367,6	4,4	92,94	38,28
90	HW240_Acc1.15_AW1	7.800,20	3.913,57	2.226,22	5,83	43,12	17,78
91	HW270_Acc1.15_AW4	7.741,71	4.532,84	1.161,75	6,51	74,37	30,34
92	HW180_Acc1.15_AW1	7.726,16	5.219,45	290,14	4,35	94,44	38,95
93	HW240_Acc1.00_AW1	7.693,68	3.899,55	2.129,68	5,76	45,39	18,7
94	HW210_Acc0.80_AW2	7.649,65	5.244,55	474,47	5,03	90,95	38,41
95	HW270_Acc1.00_AW4	7.648,93	4.522,22	1.080,84	6,43	76,1	31,03
96	HW210_Acc1.00_AW2	7.639,57	5.291,73	378,32	5,02	92,85	39,14
97	HW240_Acc0.60_AW3	7.576,84	4.735,71	920,65	5,7	80,56	33,49
98	HW330_Acc0.80_AW4	7.550,76	3.693,08	2.212,34	7,72	40,09	16,4
99	HW330_Acc1.00_AW3	7.374,65	3.599,50	2.425,25	7,54	32,62	13,74

100	HW330_Acc1.15_AW3	7.345,78	3.606,84	2.395,92	7,51	33,57	14,15
101	HW270_Acc0.80_AW3	7.318,50	4.329,54	1.361,31	6,16	68,56	28,85
102	HW300_Acc1.15_AW4	7.247,35	4.093,08	1.309,11	6,76	68,02	27,75
103	HW270_Acc1.15_AW3	7.221,39	4.391,04	1.133,61	6,06	74,18	31,09
104	HW270_Acc1.00_AW3	7.184,41	4.374,07	1.122,75	6,04	74,33	31,16
105	HW240_Acc0.80_AW1	7.179,05	3.858,90	1.708,02	5,39	55,74	23,05
106	HW300_Acc1.00_AW4	7.120,62	4.082,63	1.176,54	6,64	71,18	28,98
107	HW330_Acc0.80_AW3	7.112,31	3.576,87	2.185,21	7,27	38,91	16,36
108	HW240_Acc0.60_AW2	7.098,66	4.471,48	916,63	5,34	79,5	33,37
109	HW360_Acc0.60_AW4	7.085,15	3.288,81	2.349,63	7,93	28,56	11,7
110	HW300_Acc0.80_AW4	6.912,85	4.054,23	1.010,81	6,45	75,07	30,57
111	HW330_Acc1.15_AW2	6.888,46	3.420,71	2.284,76	7,04	33,21	14,16
112	HW210_Acc0.60_AW1	6.885,03	4.280,39	769,54	4,54	82,02	33,77
113	HW330_Acc1.00_AW2	6.860,39	3.401,97	2.253,79	7,01	33,75	14,34
114	HW300_Acc1.15_AW3	6.837,77	3.959,59	1.362,24	6,38	65,6	27,53
115	HW270_Acc0.60_AW1	6.763,79	3.355,22	2.041,53	5,7	39,15	16,26
116	HW210_Acc1.15_AW1	6.763,14	4.478,10	407,06	4,44	90,91	37,58
117	HW300_Acc1.00_AW3	6.745,06	3.950,15	1.268,79	6,29	67,88	28,45
118	HW270_Acc0.80_AW2	6.725,07	4.097,05	1.165,64	5,66	71,55	30,36
119	HW330_Acc0.80_AW2	6.686,31	3.381,44	2.101,96	6,84	37,84	16,06
120	HW270_Acc1.00_AW2	6.677,40	4.134,01	1.028,91	5,61	75,11	31,74
121	HW210_Acc1.00_AW1	6.601,46	4.467,95	275,62	4,33	93,83	38,84
122	HW300_Acc0.60_AW4	6.585,82	3.936,37	793,78	6,16	79,83	32,3
123	HW360_Acc0.60_AW3	6.577,25	3.182,69	2.209,79	7,36	30,57	12,89
124	HW210_Acc0.80_AW1	6.559,77	4.412,79	326,84	4,31	92,59	38,38
125	HW270_Acc1.15_AW2	6.535,65	4.153,38	837,93	5,49	79,83	33,66

126	HW330_Acc0.60_AW4	6.480,02	3.581,15	1.218,37	6,64	65,98	26,72
127	HW300_Acc0.80_AW3	6.404,26	3.917,21	949,09	5,98	75,77	31,67
128	HW360_Acc0.80_AW4	6.348,37	3.384,79	1.512,57	7,1	55,31	22,77
129	HW300_Acc1.00_AW2	6.288,00	3.726,34	1.190,27	5,87	68,06	28,74
130	HW300_Acc1.15_AW2	6.286,68	3.744,88	1.166,53	5,86	68,85	29,08
131	HW300_Acc0.60_AW3	6.168,55	3.812,88	825,97	5,77	78,34	32,62
132	HW330_Acc0.60_AW3	6.155,80	3.464,77	1.305,84	6,31	62,31	25,97
133	HW240_Acc0.60_AW1	6.113,74	3.761,70	737,8	4,6	80,39	33,09
134	HW360_Acc0.60_AW2	6.107,37	3.008,64	2.045,37	6,83	32,02	13,62
135	HW300_Acc0.80_AW2	6.007,72	3.699,56	933,29	5,61	74,77	31,53
136	HW360_Acc1.00_AW4	5.918,71	3.417,12	972,64	6,61	71,54	29,23
137	HW360_Acc1.15_AW4	5.887,19	3.420,69	925,67	6,57	72,94	29,77
138	HW330_Acc1.15_AW1	5.880,58	2.882,78	1.867,89	6,01	35,21	14,72
139	HW330_Acc1.00_AW1	5.842,15	2.876,04	1.825,18	5,97	36,54	15,25
140	HW360_Acc0.80_AW3	5.803,77	3.274,61	1.327,99	6,49	59,45	25,12
141	HW330_Acc0.60_AW2	5.798,31	3.270,70	1.291,06	5,94	60,53	25,45
142	HW330_Acc0.80_AW1	5.716,41	2.841,55	1.733,07	5,84	39,01	16,24
143	HW300_Acc0.60_AW2	5.709,15	3.595,48	746,28	5,34	79,24	33,29
144	HW270_Acc0.80_AW1	5.687,37	3.446,23	847,95	4,79	75,39	31,36
145	HW270_Acc1.00_AW1	5.610,76	3.489,45	673,94	4,71	80,69	33,41
146	HW300_Acc1.15_AW1	5.476,65	3.157,88	995,92	5,11	68,46	28,3
147	HW270_Acc1.15_AW1	5.431,56	3.500,15	449,45	4,56	87,16	35,97
148	HW360_Acc1.00_AW3	5.383,09	3.301,04	801,7	6,01	75,71	31,71
149	HW300_Acc1.00_AW1	5.372,90	3.145,14	913,71	5,01	70,95	29,34
150	HW360_Acc0.80_AW2	5.319,86	3.094,24	1.147,24	5,95	62,92	26,79
151	HW360_Acc1.15_AW3	5.312,06	3.309,81	708,45	5,92	78,6	32,87

152	HW360_Acc0.60_AW1	5.080,35	2.531,53	1.537,10	5,68	39,28	16,37
153	HW330_Acc0.60_AW1	5.057,54	2.750,95	1.134,96	5,18	58,74	24,21
154	HW300_Acc0.80_AW1	5.044,97	3.111,95	632,55	4,71	79,67	32,95
155	HW360_Acc1.00_AW2	4.911,14	3.125,35	625,65	5,48	79,98	33,73
156	HW300_Acc0.60_AW1	4.866,98	3.027,26	551	4,55	81,8	33,72
157	HW360_Acc1.15_AW2	4.858,57	3.136,03	563,95	5,42	82,02	34,61
158	HW360_Acc0.80_AW1	4.444,43	2.602,89	800,6	4,97	69,24	28,85
159	HW360_Acc1.15_AW1	4.332,13	2.640,49	596,64	4,83	77,4	32,06
160	HW360_Acc1.00_AW1	4.216,64	2.634,82	475,16	4,7	81,97	33,87

#### EK-4 Test-2 Aracı İşletme Simülasyonu

Number	Name	Avg. Time (T2) [min]	Avg. Speed (T2) [kmph]	Avg. Time (T1) [min]	Avg. Speed (T1) [kmph]
1	HW360_Acc1.15_AW4	13:27	34,45	13:36	34,04
2	HW360_Acc1.15_AW3	13:21	34,7	13:31	34,27
3	HW360_Acc1.15_AW2	13:17	34,89	13:28	34,42
4	HW360_Acc1.15_AW1	13:10	35,19	13:26	34,49
5	HW360_Acc1.00_AW4	13:33	34,16	13:40	33,9
6	HW360_Acc1.00_AW3	13:29	34,36	13:37	34
7	HW360_Acc1.00_AW2	13:24	34,55	13:36	34,06
8	HW360_Acc1.00_AW1	13:19	34,78	13:35	34,1
9	HW360_Acc0.80_AW4	13:49	33,51	13:56	33,22
10	HW360_Acc0.80_AW3	13:45	33,66	13:54	33,33
11	HW360_Acc0.80_AW2	13:43	33,76	13:55	33,28
12	HW360_Acc0.80_AW1	13:39	33,9	13:53	33,36
13	HW360_Acc0.60_AW4	14:21	32,29	14:29	31,98
14	HW360_Acc0.60_AW3	14:19	32,37	14:28	32,01
15	HW360_Acc0.60_AW2	14:18	32,39	14:28	32,02
16	HW360_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02



17	HW330_Acc1.15_AW4	13:28	34,4	13:37	34
18	HW330_Acc1.15_AW3	13:22	34,65	13:32	34,22
19	HW330_Acc1.15_AW2	13:17	34,87	13:29	34,37
20	HW330_Acc1.15_AW1	13:10	35,19	13:25	34,52
21	HW330_Acc1.00_AW4	13:35	34,11	13:42	33,83
22	HW330_Acc1.00_AW3	13:30	34,31	13:39	33,93
23	HW330_Acc1.00_AW2	13:25	34,52	13:37	34,01
24	HW330_Acc1.00_AW1	13:19	34,76	13:35	34,09
25	HW330_Acc0.80_AW4	13:51	33,46	13:57	33,2
26	HW330_Acc0.80_AW3	13:46	33,65	13:56	33,26
27	HW330_Acc0.80_AW2	13:44	33,72	13:54	33,31
28	HW330_Acc0.80_AW1	13:40	33,89	13:54	33,35
29	HW330_Acc0.60_AW4	14:21	32,29	14:29	31,98
30	HW330_Acc0.60_AW3	14:19	32,37	14:28	32,03
31	HW330_Acc0.60_AW2	14:18	32,39	14:28	32,02
32	HW330_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02
33	HW300_Acc1.15_AW4	13:27	34,44	13:36	34,05
34	HW300_Acc1.15_AW3	13:22	34,65	13:31	34,27
35	HW300_Acc1.15_AW2	13:17	34,87	13:28	34,37
36	HW300_Acc1.15_AW1	13:09	35,22	13:26	34,49
37	HW300_Acc1.00_AW4	13:33	34,17	13:41	33,86
38	HW300_Acc1.00_AW3	13:29	34,36	13:38	33,99
39	HW300_Acc1.00_AW2	13:25	34,52	13:37	34,02
40	HW300_Acc1.00_AW1	13:19	34,76	13:35	34,12
41	HW300_Acc0.80_AW4	13:49	33,54	13:57	33,22
42	HW300_Acc0.80_AW3	13:46	33,65	13:56	33,26
43	HW300_Acc0.80_AW2	13:44	33,75	13:55	33,3
44	HW300_Acc0.80_AW1	13:40	33,89	13:54	33,35
45	HW300_Acc0.60_AW4	14:22	32,26	14:29	31,99
46	HW300_Acc0.60_AW3	14:18	32,4	14:28	32,02
47	HW300_Acc0.60_AW2	14:17	32,43	14:28	32,01
48	HW300_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02

49	HW270_Acc1.15_AW4	13:28	34,4	13:36	34,03
50	HW270_Acc1.15_AW3	13:22	34,66	13:31	34,26
51	HW270_Acc1.15_AW2	13:16	34,93	13:28	34,4
52	HW270_Acc1.15_AW1	13:10	35,19	13:25	34,54
53	HW270_Acc1.00_AW4	13:33	34,17	13:41	33,86
54	HW270_Acc1.00_AW3	13:29	34,33	13:38	33,96
55	HW270_Acc1.00_AW2	13:25	34,54	13:37	34,04
56	HW270_Acc1.00_AW1	13:19	34,77	13:35	34,12
57	HW270_Acc0.80_AW4	13:50	33,48	13:56	33,22
58	HW270_Acc0.80_AW3	13:46	33,65	13:55	33,27
59	HW270_Acc0.80_AW2	13:43	33,75	13:55	33,3
60	HW270_Acc0.80_AW1	13:40	33,88	13:54	33,33
61	HW270_Acc0.60_AW4	14:22	32,23	14:29	31,98
62	HW270_Acc0.60_AW3	14:19	32,35	14:28	32,02
63	HW270_Acc0.60_AW2	14:18	32,38	14:27	32,04
64	HW270_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02
65	HW240_Acc1.15_AW4	13:28	34,39	13:38	33,98
66	HW240_Acc1.15_AW3	13:23	34,59	13:33	34,19
67	HW240_Acc1.15_AW2	13:19	34,79	13:29	34,34
68	HW240_Acc1.15_AW1	13:10	35,18	13:25	34,5
69	HW240_Acc1.00_AW4	13:35	34,12	13:41	33,83
70	HW240_Acc1.00_AW3	13:30	34,3	13:39	33,96
71	HW240_Acc1.00_AW2	13:26	34,47	13:38	34
72	HW240_Acc1.00_AW1	13:20	34,72	13:35	34,11
73	HW240_Acc0.80_AW4	13:50	33,49	13:57	33,19
74	HW240_Acc0.80_AW3	13:47	33,63	13:56	33,27
75	HW240_Acc0.80_AW2	13:44	33,72	13:55	33,27
76	HW240_Acc0.80_AW1	13:40	33,87	13:54	33,31
77	HW240_Acc0.60_AW4	14:21	32,28	14:29	31,99
78	HW240_Acc0.60_AW3	14:19	32,37	14:27	32,04
79	HW240_Acc0.60_AW2	14:18	32,4	14:28	32
80	HW240_Acc0.60_AW1	14:16	32,47	14:28	32,02

81	HW210_Acc1.15_AW4	13:27	34,44	13:36	34,05
82	HW210_Acc1.15_AW3	13:21	34,7	13:31	34,27
83	HW210_Acc1.15_AW2	13:17	34,89	13:29	34,35
84	HW210_Acc1.15_AW1	13:10	35,18	13:26	34,48
85	HW210_Acc1.00_AW4	13:34	34,15	13:40	33,88
86	HW210_Acc1.00_AW3	13:28	34,37	13:38	33,96
87	HW210_Acc1.00_AW2	13:25	34,53	13:37	34,02
88	HW210_Acc1.00_AW1	13:19	34,79	13:34	34,13
89	HW210_Acc0.80_AW4	13:50	33,5	13:57	33,23
90	HW210_Acc0.80_AW3	13:45	33,66	13:56	33,25
91	HW210_Acc0.80_AW2	13:43	33,75	13:55	33,3
92	HW210_Acc0.80_AW1	13:39	33,94	13:53	33,35
93	HW210_Acc0.60_AW4	14:22	32,26	14:29	31,99
94	HW210_Acc0.60_AW3	14:18	32,38	14:27	32,04
95	HW210_Acc0.60_AW2	14:18	32,4	14:28	32,01
96	HW210_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02
97	HW180_Acc1.15_AW4	13:27	34,43	13:37	34,01
98	HW180_Acc1.15_AW3	13:22	34,67	13:32	34,24
99	HW180_Acc1.15_AW2	13:17	34,88	13:29	34,36
100	HW180_Acc1.15_AW1	13:10	35,2	13:25	34,53
101	HW180_Acc1.00_AW4	13:34	34,13	13:41	33,87
102	HW180_Acc1.00_AW3	13:29	34,35	13:38	33,99
103	HW180_Acc1.00_AW2	13:24	34,57	13:37	34,03
104	HW180_Acc1.00_AW1	13:19	34,77	13:35	34,11
105	HW180_Acc0.80_AW4	13:51	33,46	13:58	33,17
106	HW180_Acc0.80_AW3	13:47	33,61	13:55	33,27
107	HW180_Acc0.80_AW2	13:44	33,71	13:55	33,3
108	HW180_Acc0.80_AW1	13:40	33,89	13:54	33,33
109	HW180_Acc0.60_AW4	14:23	32,2	14:30	31,96
110	HW180_Acc0.60_AW3	14:21	32,29	14:28	32,02
111	HW180_Acc0.60_AW2	14:18	32,38	14:28	32,02
112	HW180_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02

113	HW150_Acc1.15_AW4	13:28	34,41	13:37	34,01
114	HW150_Acc1.15_AW3	13:23	34,61	13:32	34,2
115	HW150_Acc1.15_AW2	13:18	34,84	13:29	34,35
116	HW150_Acc1.15_AW1	13:10	35,17	13:25	34,53
117	HW150_Acc1.00_AW4	13:34	34,14	13:41	33,86
118	HW150_Acc1.00_AW3	13:30	34,3	13:39	33,95
119	HW150_Acc1.00_AW2	13:26	34,5	13:37	34,01
120	HW150_Acc1.00_AW1	13:20	34,73	13:35	34,11
121	HW150_Acc0.80_AW4	13:50	33,48	13:57	33,2
122	HW150_Acc0.80_AW3	13:46	33,64	13:56	33,24
123	HW150_Acc0.80_AW2	13:44	33,71	13:55	33,31
124	HW150_Acc0.80_AW1	13:40	33,9	13:53	33,36
125	HW150_Acc0.60_AW4	14:22	32,25	14:29	31,99
126	HW150_Acc0.60_AW3	14:20	32,32	14:28	32,02
127	HW150_Acc0.60_AW2	14:18	32,39	14:28	32,01
128	HW150_Acc0.60_AW1	14:16	32,48	14:28	32,02
129	HW120_Acc1.15_AW4	13:28	34,41	13:36	34,03
130	HW120_Acc1.15_AW3	13:22	34,65	13:31	34,26
131	HW120_Acc1.15_AW2	13:17	34,88	13:28	34,38
132	HW120_Acc1.15_AW1	13:10	35,2	13:25	34,53
133	HW120_Acc1.00_AW4	13:34	34,12	13:41	33,86
134	HW120_Acc1.00_AW3	13:30	34,32	13:39	33,94
135	HW120_Acc1.00_AW2	13:25	34,53	13:37	34,02
136	HW120_Acc1.00_AW1	13:19	34,76	13:35	34,11
137	HW120_Acc0.80_AW4	13:50	33,5	13:57	33,2
138	HW120_Acc0.80_AW3	13:47	33,62	13:56	33,25
139	HW120_Acc0.80_AW2	13:44	33,74	13:55	33,29
140	HW120_Acc0.80_AW1	13:40	33,88	13:54	33,33
141	HW120_Acc0.60_AW4	14:21	32,29	14:29	31,98
142	HW120_Acc0.60_AW3	14:19	32,37	14:28	32,01
143	HW120_Acc0.60_AW2	14:18	32,38	14:28	32,01
144	HW120_Acc0.60_AW1	14:16	32,47	14:28	32,02

145	HW90_Acc1.15_AW4	13:31	34,26	13:46	33,66
146	HW90_Acc1.15_AW3	13:24	34,54	13:38	33,96
147	HW90_Acc1.15_AW2	13:19	34,8	13:34	34,16
148	HW90_Acc1.15_AW1	13:10	35,15	13:27	34,42
149	HW90_Acc1.00_AW4	13:39	33,94	13:53	33,38
150	HW90_Acc1.00_AW3	13:32	34,2	13:45	33,69
151	HW90_Acc1.00_AW2	13:27	34,44	13:41	33,84
152	HW90_Acc1.00_AW1	13:20	34,73	13:37	34,02
153	HW90_Acc0.80_AW4	13:56	33,24	14:18	32,39
154	HW90_Acc0.80_AW3	13:51	33,46	14:07	32,8
155	HW90_Acc0.80_AW2	13:46	33,64	14:00	33,1
156	HW90_Acc0.80_AW1	13:40	33,87	13:56	33,26
157	HW90_Acc0.60_AW4	14:32	31,87	14:56	31
158	HW90_Acc0.60_AW3	14:27	32,06	14:50	31,21
159	HW90_Acc0.60_AW2	14:23	32,21	14:43	31,47
160	HW90_Acc0.60_AW1	14:17	32,44	14:32	31,89

## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Yozgat'ta doğan Hakan GÜNEŞER, orta ve lise öğrenimini Yozgat Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2009 yılında başarıyla bitirmiştir.

Yüksek lisans eğitimine Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. Dr. Öğretim Üyesi Volkan Akdoğan danışmanlığında hazırladığı **“RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE FRENLEME ENERJİSİNİN GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ VE ANKARAY HAFİF METRO ÜZERİNDE İNCELENMESİ”** başlıklı teziyle 2020 yılında mezun olmuştur.

Halen Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü'nde Metro Bakım Mühendisi olarak çalışmakta olan Hakan GÜNEŞER, evli ve 1 çocuk babasıdır.

### İletişim Bilgileri

Adres: Beştepe /ANKARA

06510

e-posta: hakanguneser07@gmail.com