



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RAYLI SİSTEMLERDE DC SİMÜLASYON YAPILARAK DURUM  
SENARYOLARININ OLUŞTURULMASI**

**PERTEV CANER ŞAHİN**

**DANIŞMAN**

**Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı**

**İSTANBUL-2020**

Bu çalışma, 8.12.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Rana ORTAÇ  
KABAOĞLU  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Emrah DOKUR  
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete 'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Lisans eğitimimi tamamladıktan sonra raylı sistemlerin çeşitli alanlarında yer alarak iş hayatının teorik ve pratik tarafını birleştirme fırsatına sahip oldum. Kent içi toplu taşımada çok önemli bir yere sahip olan raylı sistemlerin tasarım aşaması ileride ortaya çıkabilecek sorunların önceden çözümü noktasında en önemli parametrelerden biri konumundadır.

Raylı sistemlerde enerji beslemelerinin en önemli tesisi cer sistemleridir. Cer sistemlerini simülasyon programı kullanarak en verimli şekilde tasarlayıp, ideal işletme senaryoları ile enerji tüketim maliyetlerinin önüne geçmek amacıyla bu tezi hazırlamaya karar verdim.

Raylı sistemlerde uygun değerde elektrifikasyon dizaynı düşüncesi ile çıktığım bu yolda her zaman teknik bilgi, donanım ve tecrübesi ile mühendislik yönümü geliştiren saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ' a, lisansüstü tez çalışmalarımı destekleyip iş hayatında uygulamamı sağlayan Sn. Furkan KARAKUŞ' a, tez hazırlığı süresi boyunca teknik bilgi ve simülasyon çalışmalarımında büyük desteklerinden ötürü Sn. Ayhan KOYUN' a ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında bana inanan ve desteklerini esirgemeyen kıymetli Annem Nebahat ŞAHİN Babam Mehmet ŞAHİN başta olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2020

Pertev Caner ŞAHİN

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ÖZET .....	xiii
SUMMARY .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>3</b>
2.1 RAYLI SİSTEMLER ÇEŞİTLERİ .....	3
2.1.1 Metro .....	4
2.1.2 Hafif Metro .....	5
2.1.3 Hafif Raylı Sistem .....	6
2.1.4 Tramvay.....	6
2.1.5 Banliyo .....	7
2.1.6 Maglev .....	8
2.1.7 Havaray.....	8
2.1.8 Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler .....	9
2.2 RAYLI SİSTEMLERDE ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİ.....	10
2.2.1 Orta Gerilim Hücreleri ve Korumaları .....	13
2.2.2 Transformatörler.....	15
2.2.2.1 Cer Transformatörleri.....	16
2.2.2.2 İç İhtiyaç Transformatörleri.....	17
2.2.3 DC Şalt Sistemi .....	17
2.2.3.1 Redresör Grubu.....	19
2.2.3.2 Negatif Geri Dönüş Panosu .....	23
2.2.3.3 DC Hat Besleme Hücresi .....	23
2.2.3.4 Hat Besleme Panosu ve Kesicisi .....	24
2.2.4 Tren Cer Gücü İletim Sistemleri .....	24
2.2.4.1 Konvansiyonel Katener Sistemleri .....	25

2.2.4.2	<i>Rijit Katener Sistemleri</i> .....	26
2.2.4.3	<i>3. Ray Sistemleri</i> .....	27
2.2.4.4	<i>APS Sistemi</i> .....	28
2.3	<b>RAYLI SİSTEMLERDE ELEKTRİK ENERJİSİ VERİMİ ARTTIRILMASI</b> .....	30
2.3.1	Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Yöntemi .....	30
2.3.2	Enerji Depolama Sistemleri .....	31
2.3.3	Enerji Tasarruflu Sürüş.....	31
2.3.4	Trenler Arası Süre Yönetimi .....	31
2.3.5	Süper İletken Kablo İle Enerji İletimine Dayalı Enerji Verimliliği .....	32
2.3.6	Tersinir Cer Trafoları.....	32
2.3.7	Yardımcı Tesisler Tarafı Enerji Tasarruf Yaklaşımları.....	32
<b>3.</b>	<b>MALZEME VE YÖNTEM</b> .....	<b>34</b>
3.1	TEMEL VERİLER .....	34
3.1.1	Hattın Elektifikasyon Verileri .....	35
3.2	SİMÜLASYON ADIMLARI .....	36
3.2.1	Tren Performans Hesaplayıcı .....	36
3.2.2	Yük Akış Analizi .....	38
3.2.2.1	<i>Normal İşletme Senaryosu</i> .....	38
3.2.2.2	<i>Bir TM Devre Dışı Kalma Durumu</i> .....	39
3.2.2.3	<i>Komşu Olmayan TM Devre Dışı Kalma Durumu</i> .....	40
3.2.2.4	<i>Komşu TM Devre Dışı Kalma Durumu</i> .....	40
3.2.2.5	<i>Güncel İşletme Senaryosu</i> .....	41
<b>4.</b>	<b>BULGULAR</b> .....	<b>42</b>
4.1	NORMAL İŞLETME SENARYOSU .....	42
4.2	BİR TRAFÖ MERKEZİNİN KOMPLE DEVRE DIŞI KALMASI.....	45
4.3	KOMŞU OLMAYAN İKİ TRAFÖ MERKEZİNİN DEVRE DIŞI KALMASI.....	48
4.4	KOMŞU İKİ TRAFÖ MERKEZİNİN DEVRE DIŞI KALMASI .....	52
4.5	GÜNCEL İŞLETME SEFER SIKLIĞI DURUMU .....	55
<b>5.</b>	<b>TARTIŞMA VE SONUÇ</b> .....	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>63</b>
<b>7.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>66</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : M2 metro hattı. ....	5
Şekil 2.2 : M1 hafif metro hattı. ....	6
Şekil 2.3 : Tramvay aracı. ....	7
Şekil 2.4 : Banliyö aracı (İZBAN) [10]. ....	7
Şekil 2.5 : Maglev [12]. ....	8
Şekil 2.6 : Havaray [13]. ....	9
Şekil 2.7 : Sürücüsüz metro (İstanbul). ....	10
Şekil 2.8 : Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinin basitleştirilmiş diyagramı [7]. ....	11
Şekil 2.9 : Transformator merkezi ekipmanları ve cer beslemesi [2]. ....	13
Şekil 2.10 : OG hücre görseli [20]. ....	14
Şekil 2.11 : OG hücre içi bölümleri. ....	15
Şekil 2.12 : Metro İstanbul cer transformatorleri. ....	16
Şekil 2.13 : Metro İstanbul iç ihtiyaç transformatorleri. ....	17
Şekil 2.14 : Ray bağlantı kabloları. ....	19
Şekil 2.15 : Diyet grubu. ....	20
Şekil 2.16 : Diyet grubu dalga şekli. ....	20
Şekil 2.17 : 1 faz için diyet grubu. ....	21
Şekil 2.18 : Faz grubu için diyet bağlantısı. ....	21
Şekil 2.19 : D1809N4400 tipi diyet. ....	22
Şekil 2.20 : Diyet sigortası. ....	22
Şekil 2.21 : Negatif geri dönüş panosu ve ayırıcı. ....	23
Şekil 2.22 : Konvansiyonel katener sistemi konsol hoban donanımı. ....	25
Şekil 2.23 : Rijit katener ve cer gücü iletimi. ....	27

Şekil 2.24 : 3. Ray kablo bağlantıları.....	27
Şekil 2.25 : Bordeaux şehrinde innorail uygulaması [22].....	29
Şekil 2.26 : Innorail sisteminin besleme şekli [22].....	29
Şekil 2.27 : Innorail sistemine ait profil ve hat görünümü [22].....	30
Şekil 3.1 : M5 hattı istasyonları [40].....	34
Şekil 3.2 : M5 hattı DC tek hat modellemesi.....	35
Şekil 3.3 : Metro elektrifikasyon sistemi.....	36
Şekil 3.4 : Üsküdar – Çekmeköy text dosyası verileri.....	37
Şekil 3.5 : Çekmeköy- Üsküdar text dosyası verileri.....	37
Şekil 4.1 : TM3 anlık maksimum akım grafiği çıktısı.....	42
Şekil 4.2 : TM8 anlık maksimum akım grafiği çıktısı.....	55
Şekil 4.3 : Maksimum hat akımı saha ölçümü.....	56
Şekil 4.4 : Minimum hat gerilimi saha ölçümü.....	58
Şekil 4.5 : TM3 maksimum güç grafiği çıktısı.....	59
Şekil 4.6 : Maksimum anlık güç saha ölçümü.....	60

## TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
<b>Tablo 2.1</b> : EN 50163 tren gerilim seviyeleri. ....	12
<b>Tablo 2.2</b> : TS EN 50119 standardı elektriksel açıklıklar. ....	26
<b>Tablo 2.3</b> : TS EN 50119 standardı faz farkı kaynaklı açıklıklar. ....	26
<b>Tablo 4.1</b> : 120 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri. ....	42
<b>Tablo 4.2</b> : 120 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri. ....	43
<b>Tablo 4.3</b> : 120 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri. ....	44
<b>Tablo 4.4</b> : 150 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri. ....	45
<b>Tablo 4.5</b> : 150 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri. ....	46
<b>Tablo 4.6</b> : 150 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri. ....	47
<b>Tablo 4.7</b> : 210 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri. ....	48
<b>Tablo 4.8</b> : 210 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri. ....	49
<b>Tablo 4.9</b> : EN 50122-1 DC ray gerilim sınırlamaları. ....	50
<b>Tablo 4.10</b> : 210 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri. ....	51
<b>Tablo 4.11</b> : 300 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri. ....	52
<b>Tablo 4.12</b> : 300 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri. ....	53
<b>Tablo 4.13</b> : 300 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri. ....	54
<b>Tablo 4.14</b> : 270 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri. ....	56

<b>Tablo 4.15</b> : 270 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri. ....	57
<b>Tablo 4.16</b> : 270 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri. ....	59



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>A</b>	:Amper
<b>Hz</b>	:Hertz
<b>km</b>	:Kilometre
<b>kV</b>	:KiloVolt
<b>kVA</b>	:KiloVoltAmper
<b>kW</b>	:Kilowatt
<b>kWh</b>	:Kilowatt saat
<b>m</b>	:Metre
<b>MW</b>	:Megawatt
<b>MVA</b>	:MegaVoltAmper
<b>s</b>	:Saniye
<b>sa</b>	:Saat
<b>V</b>	:Volt
<b>W</b>	:Watt (güç birimi)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AC</b>	:Alternatif Akım
<b>APS</b>	:Otomatik Güç Kaynağı Sistemi
<b>ATO</b>	:Otomatik Tren İşletim Sistemi (Automatic Train Operation)
<b>ATSC</b>	:Otomatik Gergili Basit Katener Sistemi
<b>AW3</b>	:Döner Kütle Etkisi Dâhil Araç Ağırlığı
<b>DC</b>	:Doğru Akım
<b>EDS</b>	:Enerji Depolama Sistemleri
<b>ETAP</b>	:Elektrik Güç Sistem Analizi Programı (Electrical Power System Analysis & Operation Software)
<b>FTTW</b>	:Sabit Gergili Katener Sistemi
<b>HAT 1</b>	:Üsküdar- Çekmeköy Yönü
<b>HAT 2</b>	:Çekmeköy- Üsküdar Yönü
<b>HEADWAY</b>	:İşletme Sefer Sıklık Süresi

<b>IEC</b>	:Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
<b>LBS</b>	:Yük Kesme Şalteri(Load Breaker System)
<b>LFA</b>	:Yük Akış Analizi (Load Flow Analyzer)
<b>LRT</b>	:Hafif Raylı Sistem
<b>OCS</b>	:Katener Sistemi (Overhead Catenary System)
<b>OG</b>	:Orta Gerilim
<b>RAILSIM</b>	:Tren Simülasyonu
<b>TM</b>	:Transformatör Merkezi
<b>TM1</b>	:Üsküdar Cer Transformatörü
<b>TM2</b>	:Fıstıkağacı Cer Transformatörü
<b>TM3</b>	:Bağlarbaşı Cer Transformatörü
<b>TM4</b>	:Bulgurlu Cer Transformatörü
<b>TM5</b>	:Çarşı Cer Transformatörü
<b>TM6</b>	:Çakmak Cer Transformatörü
<b>TM7</b>	:Altınşehir Cer Transformatörü
<b>TM8</b>	:Dudullu Cer Transformatörü
<b>TM9</b>	:Çekmeköy Cer Transformatörü
<b>TOS</b>	:Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler
<b>TPC</b>	:Tren Performans Hesaplayıcı (Train Performance Calculator )
<b>TS</b>	:Türk Standartları
<b>UITP</b>	:Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### RAYLI SİSTEMLERDE DC SİMÜLASYON YAPILARAK DURUM SENARYOLARININ OLUŞTURULMASI

PERTEV CANER ŞAHİN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ

Şehirlerin giderek artan nüfusla beraber karşılaştığı en büyük problemlerin başında trafik sorunu gelmektedir. Bu problemleri azaltmak adına kent içi raylı sistemler hızlı bir şekilde artmaktadır. Kent içi raylı sistemler metropol şehirler için büyük önem kazanmaktadır. Bu nedenlerden dolayı tasarım süreçleri süreklilik açısından büyük öneme sahiptir.

Cer gücü beslemeli şehir içi metro hatlarında bölgesel elektrik iletim şirketi tarafından gelen 154 kV gerilim seviyesi dağıtım tarafında 34,5 kV seviyesine düşürüldükten sonra hattın ilgili besleme giriş noktalarından alınır. Besleme giriş noktalarından alınan 34,5 kV OG şalt hücrelerinden geçerek cer transformatöründe istenilen gerilim seviyesine dönüştürülür. Dönüştürülen gerilim seviyesi redresörler ile doğrultularak 750 V DC veya 1500 V DC seviyesinde araç için gerekli cer gücü seviyesine ulaştırılmış olur.

Bu çalışmada simülasyon programı ile birlikte ilgili metro hattının besleme senaryoları, bu besleme noktalarının kopması durumunda nasıl senaryolar oluşturulması gerektiği ve cer transformatörleri yüklenme durumları incelenmiştir.

Aralık 2020, 80 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Raylı Sistem, DC Simülasyon, Cer, Durum Senaryoları, Modelleme

## **SUMMARY**

### **M.Sc. THESIS**

#### **CREATING STATUS SCENARIOS BY USING DC SIMULATION IN RAILWAY SYSTEMS**

**PERTEV CANER ŞAHİN**

**Istanbul University-Cerrahpasa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Electrical and Electronic Engineering**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ**

Traffic problem is one of the biggest problems that cities face with increasing population. In order to reduce these problems, urban rail systems are increasing rapidly. Urban rail systems are of great importance for metropolitan cities. For these reasons, design processes are of great importance in terms of continuity.

In urban subway lines with traction power, after the 154 kV voltage level received by regional electricity transmission company is reduced to 34.5 kV on the distribution side, it is taken from the relevant supply entry points of the line. It is converted to the desired voltage level in the traction transformer by passing through the 34.5 kV medium voltage switchgear cells taken from the supply input points. The converted voltage level is rectified with rectifiers and it reaches the level of traction power required for the vehicle at 750 V DC or 1500 V DC level.

In this study, with the simulation program, the feeding scenarios of the relevant metro line, how to create scenarios in case of breaking of these feeding points and load conditions of traction transformers were examined.

December 2020, 80 pages.

**Keywords:** Railway, DC Simulation, Traction, Condition Scenario, Modelling

## 1. GİRİŞ

Kent içi ulaşım araçlarının başında hızlı, güvenilir ve konforlu olması sebebi ile raylı sistemler gelmektedir. Kent içi raylı sistemler arasında; metro, tramvay, hafif metro gibi sistemler yer almaktadır. Yolcu taşıma kapasitesi açısından raylı sistemler büyük öneme sahiptir. Metrolar tünel ve inşaat, elektromekanik işler sebebi ile başlangıç maliyetleri yüksek olmasına karşın trafik yoğunluğu, seyahat süresi, yolcu konforu etkenleri ile tercih sebebinde öne çıkmaktadır.

Kent içi raylı sistemlerde genellikle cer gücü olarak DC besleme kullanılmaktadır. DC besleme kullanılmasının ana amacı sefer sıklık süreleri ve taşınan yolcu sayısı ile birlikte sabit olarak istenilen gerilim seviyesinin belirli sınırlar içerisinde sürekli olarak sağlanmasıdır. Metrolarda elektrifikasyon sistemleri; orta gerilim dağıtım sistemleri, iç ihtiyaç ve cer transformatörleri, jeneratör sistemleri, DC Cer gücü sistemleri, rijit katener, konvansiyonel katener veya 3. Ray sistemleri, alçak gerilim dağıtım sistemleri, topraklama ve korozyon sistemleri, kesintisiz güç kaynakları, aydınlatma sistemlerinden oluşmaktadır.

Belirtilen sistemlerin maliyetleri çok fazla olduğundan dolayı metroların tasarım aşamasında net bir şekilde belirlenmesi ve değişiklik yapmak zorunda kalınmaması gerekmektedir. Tasarım aşamasında bu sistem verilerine sağlıklı bir şekilde ulaşabilmek sistem kapasitesini belirlemek adına simülasyon programları kullanılmaktadır. Teorik olarak simülasyonlarda 34,5 kV seviyesinden hesaplanan gerilim seviyesinin gerçek uygulama değeri üzerinden hesaplanarak aradaki sapma oranı belirlenip saha koşullarına uygun şekilde incelenen simülasyon programları bulunmaktadır.

Metrolarda istenilen hattın istenilen yolcu taşıma kapasitesi, sefer sıklığı ile konforlu ve taleplere cevap verebilmesi adına DC simülasyon yapılmaktadır. İlgili metro hattının; hat yapısı, istasyon verileri, elektrifikasyon verileri ışığında simülasyon yapılır. Elektrifikasyon sisteminde DC simülasyon bize hattın transformatör kapasiteleri, yüklenme oranları ve besleme senaryoları ile talep edilen gücün hangi senaryolar ile karşılanabileceğini gösterir.

Raylı sistemlerde DC simülasyonlarla ilgili dünyada birçok akademik çalışma olmasına karşın ülkemizde bu konuda çok fazla akademik çalışma bulunmamaktadır. Son zamanlarda metro hatlarının artması sonucu bu hatların DC simülasyonlarının yapılması gerektiğinden dolayı

yapılan çalışmalar akademisyenlere ilham kaynağı olmuştur. Daha gerçekçi simülasyonların yapılabilmesi için hangi parametrelerin eklenmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Açıkbaş S., Söylemez M.T DC simülasyonla ilgili olarak 750 V DC ve 1500 V DC besleme gerilimlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır [1]. Karakuş, F , Yumurtacı, R., bir raylı sistem hattının orta gerilim elektrifikasyon sisteminin ETAP programında modellenmesini yaparak besleme senaryolarının analizini yapmıştır [2]. Güzeller ve arkadaşları, yeni yapılacak bir metro hattının transformatör tasarım çalışması yapmıştır. Bu tsarıma göre transformatör kapasite yeterliliği incelenmiştir [3].

Bir cer transformatörü, güç santrallerinden iletilen elektrik gücünü istenilen oranda dönüştürür ve bu gücü belirlenen gerilim seviyesine doğrultarak raylı sistemin talep ettiği elektrik enerjisi sağlanmış olur [4]. Cer gücü sisteminin en önemli görevi sistemin talep ettiği yükleri karşılayabilmek için güvenilir ve sürekli bir şekilde elektrik enerjisi sağlayabilmektedir [5]. Bu çalışmada raylı sistem hattının parametreleri ile birlikte hattın DC simülasyonu yapılarak talep edilen yolcu sayısı, sefer sıklığı durumları senaryolar ile değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile birlikte tasarım aşamasında belirlenen cer transformatörlerinin yüklenme durumları, işletme sırasında kullanılması planlanan senaryolara göre elde edilen sonuçları incelenmiştir.

## 2. GENEL KISIMLAR

Kent içi raylı sistemler metropol şehirler arasında bir gelişmişlik göstergesi olmuştur. Günümüzde gelişen teknoloji ve hızla artan üretim süreçleri insanlar için zamanı en önemli parametre olarak ortaya çıkarmıştır. Raylı sistemler yıllar geçtikçe gelişen teknoloji ile birlikte gelişim göstermiştir.

Raylı sistemlerin işletme esnasında kesintisiz olarak çalışabilmesi süreklilik açısından büyük önem arz etmektedir. Bu süreklilik elektrik enerjisinin kesintisiz olarak verilmesiyle sağlanır. Raylı sistemlerde elektrifikasyon sistemleri içerisinde en önemli unsurların başında yer alan hattı besleyen transformatörler enerji kesintisi, arıza durumları gibi durumlara karşı yedekli olarak tasarlanmıştır. Enerji kesintisi veya sistem arızalarından dolayı işletmede aksamalar çok nadir meydana gelmektedir. Metrolarda araç enerjisini sağlayan cer gücü hesaplamaları en yüksek sefer sıklıkları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Oluşan arıza durumlarında sefer sıklık düzeyi düşürülerek cer gücü sisteminden daha az güç talebi ile işletme belirlenen senaryolara göre devam ettirilir.

Elektrifikasyon sistemleri çok karmaşık yapılardan meydana geldiğinden dolayı herhangi bir bileşenin arızalanması sistemde kesintilere neden olabilmektedir. Ekipmanların bakımları düzenli yapılırsa dahi sistemde beklenmedik arızalar veya enerji beslemesinin alındığı tarafta yaşanan problemlerin işletmeyi etkileyebildiği durumlar yaşanmaktadır.

İşletmelerde enerji kesintisi yaşanması, sefer sıklıklarının azalması, yolculuk sürelerinin uzaması dolayısı ile yolcu konforunun azalması istenilmeyen bir durumdur. Bu sebepten dolayı hatların maksimum verimle çalışması için belirlenen senaryolara göre tasarımlar yapılmaktadır. Bu tasarımların yapılabilmesi için DC beslemeli hatlar için simülasyon yapılması çok önemlidir.

### 2.1 RAYLI SİSTEMLER ÇEŞİTLERİ

Kent içi raylı sistemler metro, hafif metro, tramvay olmak üzere üç ana bölümden meydana gelir. Hangi raylı sistem çeşidinin kullanılacağı ise çeşitli parametrelere bağlıdır. Bunlar; hatlarının topografik yapısı, istasyon lokasyonları, istasyonlar arası mesafe, yolcu kapasitesi gibi parametrelerdir. Metro hatları saat başına yolcu taşıma kapasitesi yaklaşık 75000, hafif raylı sistem hatları saat başına yolcu taşıma kapasitesi yaklaşık 35000, tramvay hatları ise saat

başına yolcu taşıma kapasitesi 20000 kişiyi geçmeyecek şekilde tanımlanmıştır. Fakat bu kapasiteler bulunan lokasyona ve yolcu yoğunluğuna göre değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin Metro İstanbul işletmesinde bulunan T1(Kabataş- Bağcılar) hattı tramvay olmasına rağmen yoğun dönemlerde saatlik 50000 kişiyi taşıyabilmektedir.

### **2.1.1 Metro**

Metro sistemleri kent içi toplu taşımada en yüksek yolcu taşıma kapasitesine sahip olan ulaşım sistemleridir. Metro hatları diğer toplu taşıma sistemlerinden farklı olarak tünel yapıları ile yeraltına inşa edilirler. Metro istasyonlarının uzunluğu yaklaşık olarak 200 metre civarındadır ve metro araç uzunlukları da istasyon yapılarına bağlı olarak değişmektedir yaklaşık olarak 200 metre olabilmektedir. Tek yönde saatte yaklaşık 70000 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Bu durum işletmeci firmanın ihtiyaçlarına göre değişkenlik göstermektedir [6].

Hem yerüstü hem yeraltından gidebilen hafif metrolara kıyasla daha fazla yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Dünya genelinde son zamanlarda en çok kullanılan toplu taşıma aracıdır. Metrolar için en büyük dezavantaj ilk yapım esnasında gerçekleşen altyapı maliyetleridir [7].

Raylı sistemlerde enerjinin sağlanabilmesi rijit katener, katener veya 3. ray şeklinde tesis edilen iletim sistemleri ile sağlanmaktadır. Dünya genelinde metrolar için 750 V DC, 1500 V DC ve 3000 V DC gerilim seviyeleri kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de görülen ve yapımına 1992 yılında başlanan ve Taksim- 4.Levent arasında hizmet veren ve İstanbul'da en fazla yolcu taşımacılığının yapıldığı metro, 16 Eylül 2000 tarihinde hizmete girmiştir. [8].



Şekil 2.1 : M2 metro hattı.

### 2.1.2 Hafif Metro

Yeraltı ve yerüstünden gidebilen toplu taşıma aracı hafif metro sistemleri tramvaya göre daha fazla metrolara göre daha az yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Bu sistemler yolcu potansiyelinin yüksek olduğu ulaşım güzergahlarında, ana ulaşım sistemleri olarak tercih edilmekle birlikte büyükşehirlerde metro gibi daha yüksek yolcu kapasiteli sistemlerle entegre olarak da çalışabilen bir sistemdir. Hafif meto hatları da metrolar gibi tamamen kapalı olmasa da güvenli sistemlerdir. İşletme hızları tramvaylara göre yüksektir. İstasyon uzunlukları ilgili hatta göre değişmekle beraber 100 metre civarındadır. Enerji iletimi katener, rijit katener veya 3. ray besleme sistemleri ile sağlanabilmektedir. Tek yönde saatte 60000 yolcuya kadar taşıma kapasitesine sahiptir [9].



Şekil 2.2 : M1 hafif metro hattı.

### 2.1.3 Hafif Raylı Sistem

Hafif raylı sistemler için Uluslararası Hafif Raylı Sistemler Komisyonu : “Hafif raylı sistemler; kendi geçiş hakkında, yer altında, yer seviyesinde veya yükseltilmiş şekilde işletilebilen, modern tramvaydan hızlı transit sistemine kadar aşamalı bir şekilde geliştirilebilen ray temelli bir taşımacılık biçimidir” tanımını yapmıştır [8].

Ülkemizde de İstanbul başta olmak üzere birçok şehirde Hafif Raylı Sistem projeleri bulunmaktadır. Hafif raylı sistemler, tramvay sisteminin modernleşmiş ve gelişmiş halidir. Kısa dizi ve tek araba halinde işletilebilir. Temel özelliği kendine ait bir yolu vardır ve diğer kullanıcılardan ayrılmıştır. İstasyonları arası mesafe yaklaşık olarak 1000 metre civarındadır. Yaklaşık 250-350 yolcu kapasiteli araçlardan oluşan diziler halinde 80 km/sa hıza kadar çıkabilir. Enerji iletimi katener veya 3. ray sistemlerinden sağlanır. İlgili hattın talebine göre 750 V DC veya 1500 V DC gerilim seviyeleri kullanılabilir [9].

### 2.1.4 Tramvay

Kent içinde ulaşımda karayolunun ortak olarak kullanılabildiği, tren sürücüsü tarafından operatörlüğü yapılan, alçak zeminli araçların kullanıldığı metro ve hafif metro gibi toplu taşıma araçlarına göre en düşük yolcu kapasiteli raylı toplu taşıma sistemidir. Ortalama ticari hızları 30 km /sa maksimum seyir hızı 50 km/sa’ tir. İstasyonları arası mesafe yaklaşık olarak 500 metre civarındadır. Enerji iletimi için konvansiyonel katener sisteminden yaygın olarak 750 V DC olarak sağlanmaktadır [9].



Şekil 2.3 : Tramvay aracı.

### 2.1.5 Banliyo

Banliyö sistemleri metro sistemlerinden farklı olarak şehirlerarası veya kent içi uzun hat güzergâhlarında tercih edilen sistemlerdir. Banliyö sistemleri metro ve tramvay araçlarına göre daha yüksek yolcu taşıma kapasitesine sahip olmakla birlikte tramvay ve metro araçlarına göre daha yüksek konfor düzeyine sahiptir [9].



Şekil 2.4 : Banliyö aracı (İZBAN) [10].

### 2.1.6 Maglev

Manyetik güç aracılığıyla aracın cer gücünün sağlandığı sistemler için Maglev (Mannetic Levitation System) terimi kullanılmaktadır. Maglev sisteminde hat güzergâhı boyunca bobinlere alternatif akım verilerek manyetik alan oluşturulması yoluyla trenin mıknatıslarının kilitlenmesi sağlanır. Aracın hızı bobinlere verilen akım frekansındaki değişim ile denetlenir [9].

Aracın mıknatıslarıyla bobinlerin etkileşimi sonucu oluşan manyetik yastık, aracı yaklaşık 15 cm havaya kaldırır ve araç havada gidiyormuş gibi ilerler. Bu sistemde araçların nasıl gittikleri hızları ile alakalıdır, 100 km/sa' in üzerindeki hızlarda manyetik yastık, daha düşük hızlarda ise tekerlek üzerinde gitmektedirler [11].



Şekil 2.5 : Maglev [12].

### 2.1.7 Havaray

Havaray, karayolundan tamamen bağımsız üst yollu denilen elektrikli toplu taşıma sistemidir. Ray yolu, aracın kapatıp üzerine oturduğu ve aracın üstten tutturularak gittiği olmak üzere iki türdür. Hızı 80 km/ sa civarında sınırlandırılmış bu sistem tek dizi şekilde çalıştırılabildiği gibi daha fazla dizi oluşturularak da çalıştırılabilir [11].



Şekil 2.6 : Havaray [13].

### 2.1.8 Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler

Raylı sistemlerde tam otomatik veya sürücüsüz sistemler giderek artmaktadır. TOS (Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler) sisteminin avantajları güvenlik, fayda maliyet oranı, yüksek konfor, esnek işletme, bakım maliyetlerinin azalması, minimum çevresel etkidir [14].

Özellikle otomatik tren işletmenin kontrol stratejisi, uygulanan hızı önerilen hız ile kıyaslayarak trenin cer gücünü veya frenleme kuvvetini hesaplamaktır. Bunun yanı sıra tren duruş mesafesinin hassasiyeti, dakikliği, enerji tasarrufu ve sürüş konforu gereksinimlerini karşılamaktır [15].

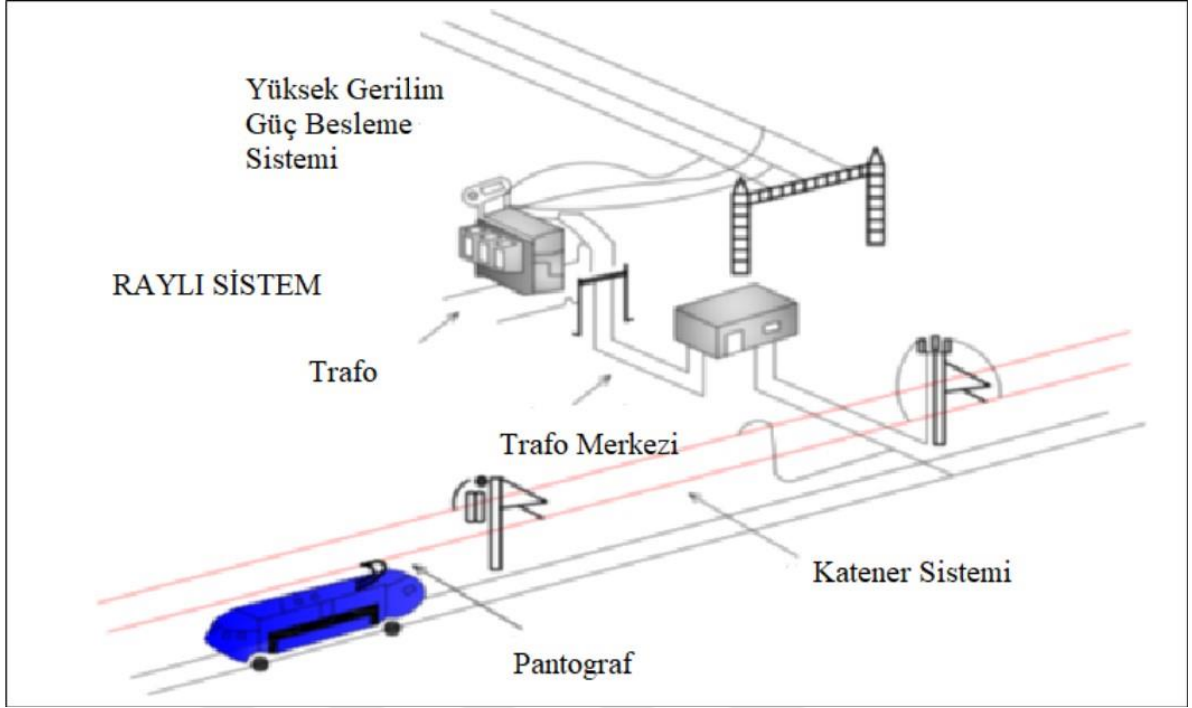
Sürüş tekniklerine ve otomatik sistemin özelliğine göre enerji tasarruflu sürüş konumunda iken %25- 35 arasında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [16].



Şekil 2.7 : Sürücüsüz metro (İstanbul).

## 2.2 RAYLI SİSTEMLERDE ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİ

Toplu taşıma sistemlerinde en önemli unsurların başında yer alan raylı sistemlerin sürekliliği doğru ve gerçekçi elektrifikasyon sistem tasarımları ile sağlanabilir. Elektrifikasyon sistemlerinin en önemli kısmı cer beslemeleridir. Cer beslemeleri AC veya DC olabilmektedir. AC Cer beslemeleri çok fazla istasyona sahip olmayan cer beslemelerinin arası uzak olan sistemlerde iletimin sağlanması için kullanılır. OG sistemden alınan 34,5 kV gerilim istenilen AC gerilim seviyesine çevrildikten sonra doğrultulmasına gerek kalmadan cer gücü olarak kullanılabilir. Örneğin; TCDD, Marmaray gibi sadece kent içi yakın istasyonlar değil şehirlerarası taşımacılık sisteminde tercih edilir. DC Cer beslemeli sistemler ise şehir içi istasyonlar arası mesafenin yakın olduğu ve sefer sıklığının fazla olduğu, araç için kararlı güç değerine ihtiyaç olduğu sistemlerde kullanılır. OG sistemden alınan 34,5 kV seviyesi gerilim AC gerilim seviyesinde düşürüldükten sonra cer beslemesi için gerekli DC gerilime doğrultma işlemi yapıldıktan sonra cer beslemesi olarak araca verilir.



Şekil 2.8 : Raylı sistem elektrifikasyon sistemlerinin basitleştirilmiş diyagramı [7].

Raylı sistemler enerji kesintisi yaşanmaması için tamamen yedeklilik mantığıyla tasarlanmıştır. Araç cer enerjisinin ve istasyon içi yüklerin temin edildiği transformatör merkezlerinin içerisinde yer alan cer transformatörleri, transformatör merkezleri ve enerji beslemelerinin giriş noktası olan TEİAŞ indirici merkezleri yedekli olarak tasarlanmıştır. Herhangi bir bölümde enerji kesintisi oluşması durumunda ekipmanın yedeği devreye girerek enerji kesintisine müsaade edilmemektedir [2].

Kent içi raylı sistemlerde çoğunlukla DC beslemeli cer sistemleri kullanılmaktadır. Enerji iletim sistemlerinde konvansiyonel katener, rijit katener veya 3.ray kullanılabilir. Kent içi raylı sistemleri oluşturan metro, hafif metro, tramvay gibi yapılarda DC beslemeli cer sistemleri kullanılmaktadır.

Metro İstanbul işletmesi bünyesinde bulunan M1,T1,T4 hatları 750 V DC beslemeli konvansiyonel katener sistemine, M2,M6 hatları 750 V DC beslemeli 3. Ray sistemine, M3,M4,M5 hatları 1500 V DC beslemeli rijit katener sistemine sahiptir.

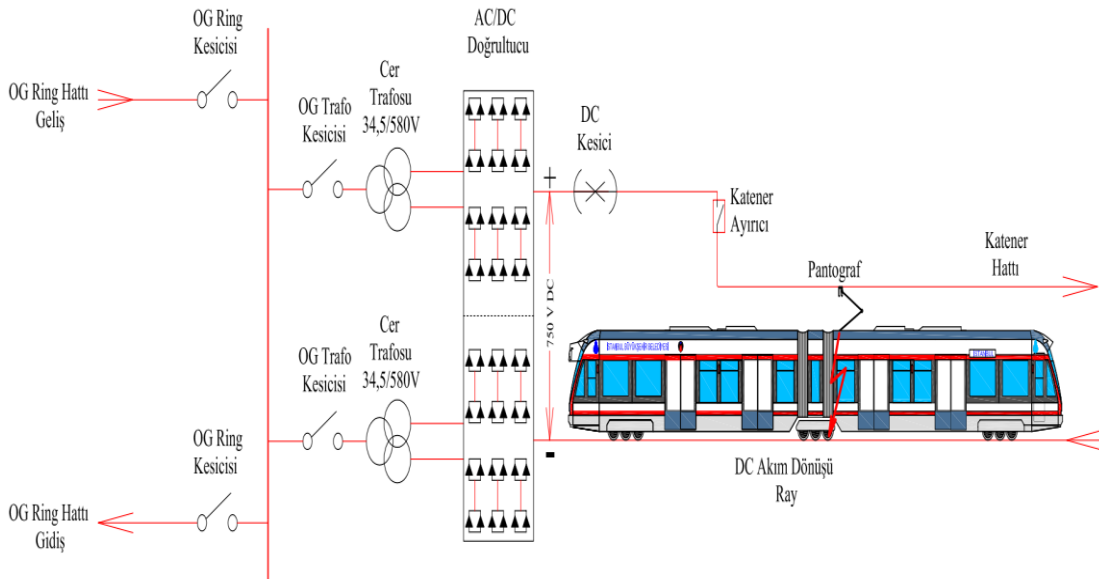
Raylı sistemler elektrifikasyon sistemleri genel olarak; orta gerilim dağıtım sistemleri, iç ihtiyaç ve cer transformatörleri, cer gücü sistemleri, rijit katener, konvansiyonel katener veya 3. Ray



Raylı sistemlerde enerji sürekliliği sağlanarak işletmenin arızalardan etkilemeden kesintisiz hizmet verebilmesi çok önemli bir durumdur [19]. Bu durumda işletme güvenliği ve enerji verimliliği arasında uygun değer dengeyi sağlamak önem arz etmektedir.

Raylı sistemlerde hat boyunca araç enerjisi ve istasyon enerjileri beslenme noktalarının bulunduğu transformatör merkezlerinden alınan enerji ile sağlanmaktadır. Transformatör merkezleri tramvay hatlarında istasyon haricinde bir yapı içerisinde bulunmasına rağmen metrolarda istasyon içerisinde korumalı odalar içerisinde yer almaktadır. Transformatör merkezlerinin yapıları ve sayıları DC simülasyon sonucunda elde edilen çıktılara göre dizayn edilmektedir.

Transformatör merkezleri; Cer transformatörleri, redresörler, DC şalt sistemleri, orta gerilim hücreleri ve korumaları, alçak gerilim dağıtım sistemleri, kesintisiz güç kaynağı (UPS), 110 V DC besleme sistemi, SCADA sistemlerinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.9 : Transformatör merkezi ekipmanları ve cer beslemesi [2].

### 2.2.1 Orta Gerilim Hücreleri ve Korumaları

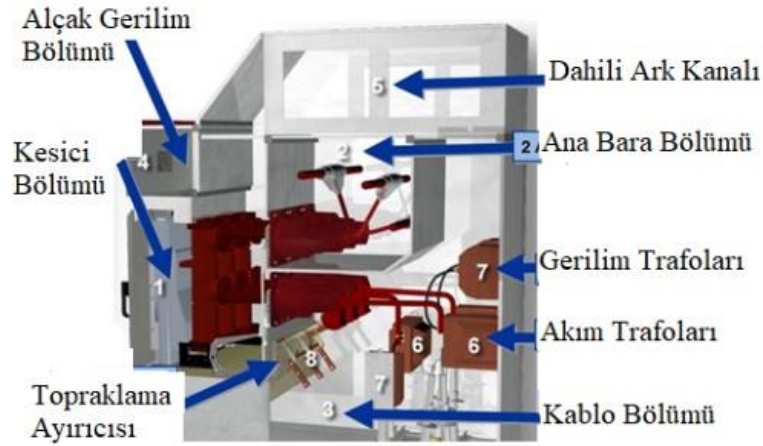
Resmi terminolojide standartlaşmış olmamasına rağmen enerji piyasasında 1kV ile 52 kV arası gerilimler genellikle “orta gerilim” olarak adlandırılır. Resmi referans ise IEC 62271-200 standardıdır.

Bir orta gerilim panosu; ana bara bölmesi, kablo bölmesi, AG bölmesi, anahtarlama cihazı bölmesi olmak üzere 4 ana bölümden oluşur.



Şekil 2.10 : OG hücre görseli [20].

Şekil 2.10 Orta gerilim hücreleri temel olarak; kesici bölümü, ana bara bölümü, kablo bölümü, alçak gerilim bölümü, dahili ark kanalı, akım trafoları, gerilim trafoları, topraklama ayırıcısından oluşmaktadır.



Şekil 2.11 : OG hücre içi bölümleri.

İlgili koruma röleleri ile her zaman enerji giriş seviyesi güvenli bir şekilde olmuş olur. Röle korumasından sonra transformatörlere giriş yapılır ve gerilim seviyesi istenilen değere çevrilmiş olur. İlgili kablo girişleri farklı iki ring şeklinde dönerek sistem yedekliliği sağlanmış olur.

## 2.2.2 Transformatörler

Transformatör; alternatif akımın frekansını değiştirmeden, gerilimini alçaltmaya veya yükseltmeye yarayan elektromanyetik indüksiyon yoluyla çalışan makinedir.

### Transformatörün üç ana fonksiyonu vardır:

- 1-Gerilim veya akımı istenilen seviyeye getirmek için yükseltmek veya azaltmak
- 2-Empedansı uygun hale getirmek
- 3-İki sistemi birbirinden yalıtım

Transformatörler; faz sayısına göre, nüvenin yapısına göre, sargı şekline göre, sargı durumuna göre, çalışma ortamına göre, soğutma tiplerine göre gerilim seviyesini yükseltip alçaltmasına göre sınıflandırılabilir.

Kent içi raylı sistemlerde iki çeşit transformatör çeşidi kullanılmaktadır. Bunlar cer transformatörleri ve iç ihtiyaç transformatörleridir.

### 2.2.2.1 Cer Transformatörleri

Raylı sistemlerde araç gücünü sağlayan cer gücü cer transformatörleri ile sağlanır. Cer transformatörleri çift sekonder çıkışına sahiptir. Sekonder çıkışlarından biri üçgen diğeri yıldız bağlıdır. İlgili hattın enerji beslemesi istenilen AC çıkış gücüne çevrilip, redresörler ile doğrultularak DC cer gücü sağlanmış olur.

Cer transformatörleri ilgili hattın enerji besleme gücü seviyesine göre seçilir. Örneğin; tramvay ve hafif metrolarda 750 V DC gerilim seviyesinde kullanılan araç cer gücü için çift sekonder çıkışına sahip cer transformatörü kullanılır. Bu çift çıkışlı sekonder yapısına sahip cer transformatörleri 580 V AC seviyesine düşürülür. Böylece 34,5kV AC/580V AC dönüştürülmüş olur.

1500 V DC seviyesinde kullanılan cer araç gücü için çift sekonder çıkışına sahip cer transformatörleri 1200 V AC seviyesine düşürülür. Böylece 34,5 kV AC/1200 V AC dönüştürülmüş olur.



Şekil 2.12 : Metro İstanbul cer transformatörleri.

Cer transformatörleri için;

1- Rutin Testlerde

Çevirme oranı ölçümü, sargı direnç ölçümü, boştaki kayıp ve boştaki akımın ölçümü, yükteki kayıp ve kısa devre geriliminin ölçümü, uygulanan gerilim testi, indüklenen gerilim testi, kısmi deşarj ölçümü

## 2- Tip Testlerde

Ses seviyesi ölçümü, sıcaklık artış testi uygulamaları yapılır.

### 2.2.2.2 İç İhtiyaç Transformatörleri

Raylı sistemlerde araç için istenilen cer gücünü sağlayan cer transformatörlerinin dışında istasyon içi aydınlatma, havalandırma, yürüyen merdiven, asansör gibi ekipmanların enerjisini sağlayan transformatörler iç ihtiyaç transformatörleri olarak adlandırılır.

Cer transformatörleri gibi transformatör çıkışından sonra doğrultma işlemine gerek duymazlar. İstenilen gerilim transformatör çıkışından alınarak dağıtım panolarına iletilir. Genellikle 34,5 kV AC/ 400 V AC seviyesi kullanılır.



Şekil 2.13 : Metro İstanbul iç ihtiyaç transformatörleri.

### 2.2.3 DC Şalt Sistemi

Raylı sistemlerde tren enerjisi sürekliliği en önemli parametrelerdendir. Enerji kesintisi istenilmeyen durum olduğundan dolayı DC şalt sistemleri en önemli ekipmanların başında gelmektedir ve tasarımlarının doğru şekilde yapılmalıdır.

DC Hücresler aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır:

1- Doğrultucu Hücresler

- Doğrultucu grubu
- Koruma elemanları

2- DC Kesici Hücresleri

- Kesiciler
- Röleler
- Transdüserler

3- DC Dönüş Hücresi (-)

- Ayırıcılar
- Koruma ve gözlemlleme elemanları

4- DC Bara Besleme Hücresi (+)

5- DC Besleme Kabloları

1500 V DC gerilim seviyesi kullanılan metro sistemlerinde; genel olarak 34,5/2\*1,2 kV'luk iki adet cer trafosunun yıldız ve üçgen sekonder taraflarından ayrı olarak çıkan besleme kabloları ile DC redresör panolarına giriş yapılmaktadır. 1200V AC gerilim, paralel bağlı redresör ünitesi ile 12 darbe 1500 V DC gerilime çevrilmektedir.

12 darbe gerilim elde etmek için kullanılan (Y-Δ) çıkışlı cer trafolarında AC gerilimde 30° lik faz farkı olmaktadır. 1200 V AC gerilimi (Y) sekonder çıkışından alan redresör paneli, 6 darbe 1500 V DC gerilime çevirmektedir. 30° faz farklı ile (Δ) sekonder çıkışından da 6 darbe 1500 V DC gerilim olmaktadır. Aradaki faz farkı sayesinde 12 darbe ve daha düzgün bir DC gerilim elde edilmektedir. 2 farklı trafodan elde edilen 1500 V DC gerilim giriş besleme kesicilerinden giriş yapmakta ve içerdeki ana barayı beslemektedir.

Buradan 4 hat besleme kesicisi üzerinden katener beslemesi gerçekleştirilmektedir. Bu 4 hat besleme, katenerin HAT1 (Doğu-Batı) ve HAT2 (Doğu-Batı) parçaları olmak üzere şekildeki gibi LBS (Yük Kesme Şalteri) üzerinden katener hattını beslenmektedir. Tren üzerinden harcanan enerji, taşıyıcı ray vasıtasıyla DC panodaki negatif dönüş paneli üzerinden devreyi tamamlamaktadır.



**Şekil 2.14** : Ray bağlantı kabloları.

Rayların potansiyelini eşitlemek için her 125 m’de bir iki ray arası, her 250 m’de bir ise iki hat arası bağlantı kablosu bulunmaktadır (Şekil 2.14).

### **2.2.3.1 Redresör Grubu**

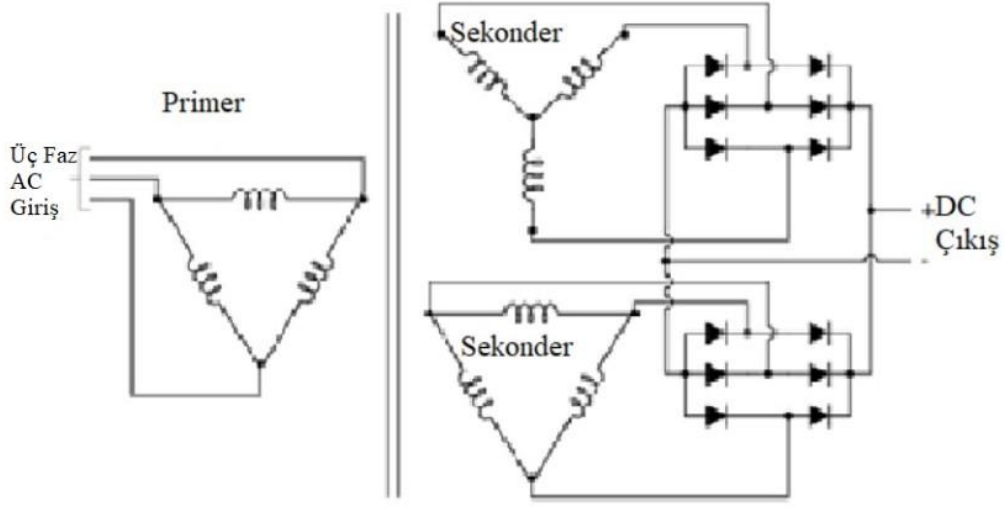
Redresör grupları sistemin en önemli ekipmanlarından olup araç çar gücü için gerekli olan DC gerilimin oluşturulduğu bölümdür. Transformatör tarafından gelen AC gerilim bu bölümde istenilen DC gerilimlere redresör grupları vasıtasıyla dönüştürülür. Redresörlerin yapım, tasarım, tip ve rutin testleri EN 50328 ve EN 60146-1-1 standartlarına göre yapılmıştır.

Her bir redresör kolunda bir yedek diyot ( $n+1$ ) dâhil olmak üzere 3 paralel diyot bulunmaktadır. 3 diyotun hepsi normal hizmet koşulları altında yüklüdür.

Redresör, her bir redresör kolundaki bir diyot arıza yapmış olsa dahi (2 paralel diyot ile çalışma) belirtilmiş olan yük çevrimlerini sağlayabilmektedir.

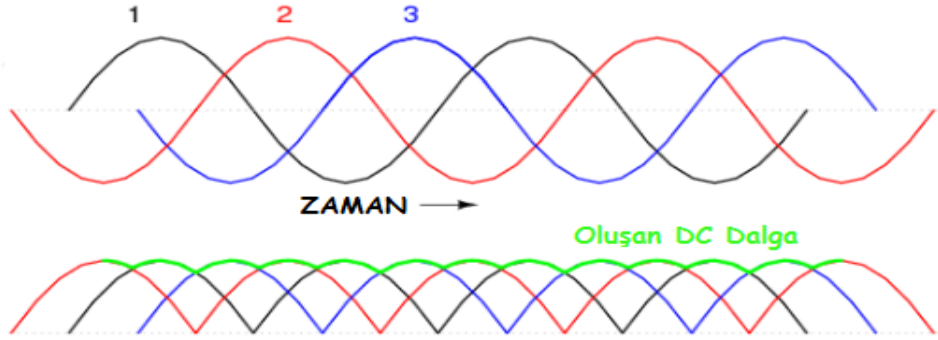
Bir redresör kabininde tek diyot alarmı olması durumunda, redresör diyotları üzerindeki termal stresi sınırlamak ve ikinci bir arıza durumunda devre dışı olma tehlikesini bertaraf etmek için uygun bir süre dâhilinde arızalanmış diyotun değiştirilmesi gerekmektedir.

## Diyotlar ve Doğrultma İşlevi



Şekil 2.15 : Diyot grubu.

Cer1 ve Cer2 : 34.5/2\*1.2 kV , 3300kVA , Dy11Dd0 , %uk=%7

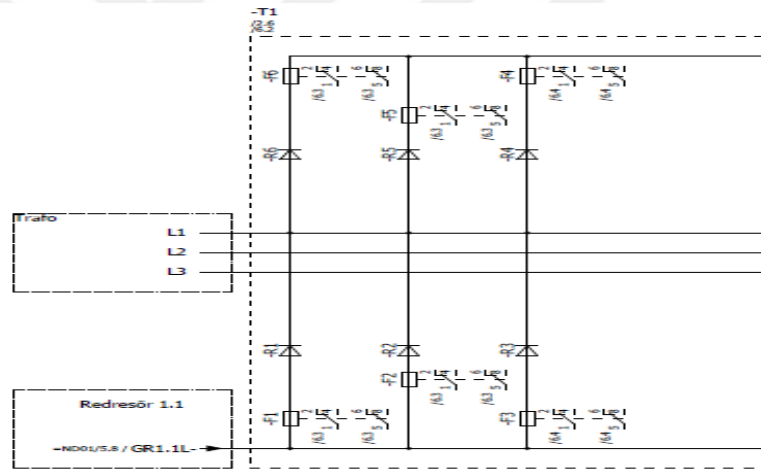


Şekil 2.16 : Diyot grubu dalga şekli.

Şekilde görüldüğü gibi Cer1 Redresör 1'in R S T fazları 3 fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu ile doğrultularak 6 darbe DC gerilim elde edilmiştir. 30o faz farkı bulunan Cer1 Redresör 2'nin R S T fazları da aynı şekilde doğrultularak 6 darbe DC gerilimle birlikte 12 darbe 1500V DC gerilim elde edilmektedir. Ayrıca 12 darbe doğrultma ile hem daha az harmonik çekilmektedir hem de daha düz bir DC gerilim elde edilmektedir (Şekil 2.15, Şekil 2.16).



Şekil 2.17 : 1 faz için diyot grubu.



Şekil 2.18 : Faz grubu için diyot bağlantısı.



Şekil 2.19 : D1809N4400 tipi diyot.



Şekil 2.20 : Diyot sigortası.

Güç bloklarının (Şekil 2.17) her bir kolu faz grubu diyot bağlantısı projesindeki gibi (Şekil 2.18) D1809N4400 tipi 6 diyot (Şekil 2.19) ile donatılmıştır. Diyotlar disk tipi olup yeterli ısı dağıtma özelliğine sahip hava soğutmalı ısı alıcılar arasına takılmıştır. Bunlar pasolu cıvatalar ile kenetlenip özel bir tork anahtarı ile dengeli biçimde sıkılmaktadır. Diyot sigortalarının yan kısmında bulunan diyot arıza sinyallerini veren diyot izleme bağlantılarının (her biri iki kontağı olan mikro anahtarlar) kırmızı çentiği çekilerek diyot arızası oluşturulmaktadır (Şekil 2.20).

### 2.2.3.2 Negatif Geri Dönüş Panosu

Redresörde doğrultulan gerilimin negatif kutbundan çıkan bara, negatif dönüş panosu vasıtasıyla bir ayırıcı üzerinden geçerek, kablo ile taşıyıcı raylara bağlanmaktadır. Birinci ve ikinci redresör panolarından gelen baralar ölçüm amacı ile ayrı ayrı şönt dirençler üzerinden geçmektedir.

Ayırıcı manuel olarak açılıp kapanmakta ve sadece pozisyon bilgisini 24 V DC ile röleye iletmektedir.



Şekil 2.21 : Negatif geri dönüş panosu ve ayırıcı.

### 2.2.3.3 DC Hat Besleme Hücresi

Besleme panosu, geri çekilebilir araba sistemini temel almaktadır, EN50123'e göre şalt donanımı panosu sabit bir bölüm ile geri çekilebilir bir arabadan oluşmaktadır. Sabit bölüm galvanize standart profil-çelik yapıdan meydana gelir.

#### **Pano 3 ayrı bölmeye ayrılmıştır:**

- Devre Kesici Bölmesi
- Dağıtım Barası Bölmesi
- Alçak Gerilim Bölmesi

## **DC Hat Besleme Panosu ve Koruma İşlevleri**

DC Hat besleme kesicileri (redresör devre kesicileri), DC güç kaynağını, redresörün dâhili arızalarının etkisinden korur. DC dağıtım barasındaki bir arıza, baradaki yüksek kısa devre akımlarından dolayı hem 34,5 kV AC devre kesicisi hem redresör yüksek hızlı devre kesicisi tarafından bertaraf edilecektir. SF6 gazlı kesiciler diğer tüm kesici çeşitlerine göre güvenlik açısından ve işletme memnuniyeti açısından çok daha iyi olduğu belirtilmiştir [21].

### **Koruma İşlevleri**

Doğrudan etkimeli koruma, dolaylı etkimeli koruma, giriş kesicisi ölçme işlevleri bulunmaktadır.

#### ***2.2.3.4 Hat Besleme Panosu ve Kesicisi***

Hat Besleme Kesicisi Koruma İşlevleri:

Kontrol ve koruma için olan dijital rölede aşağıdaki işlevler bulunmaktadır:

- Ters yönde akım izleme işlevi hat beslemeleri için kullanılmayacaktır
- Akım yükselme koruması
- Hat testi
- Otomatik tekrar-kapanma
- Kablo yalıtımı izleme sistemi

#### **2.2.4 Tren Cer Gücü İletim Sistemleri**

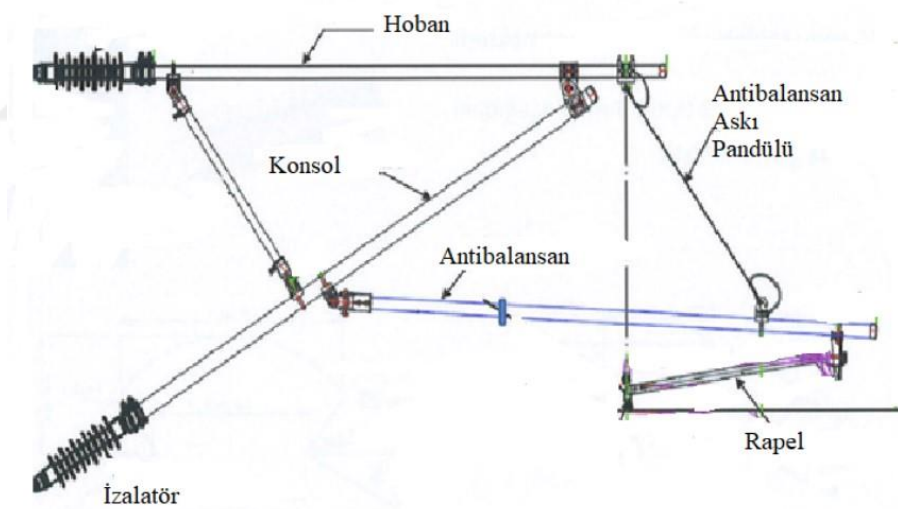
Doğrultucu grupları tarafından DC' ye çevrilen gerilimin tren araçlarına aktarılması farklı iletim yöntemleri ile sağlanmaktadır. İletim yöntemleri hattın yapısı, taşınacak yolcu sayısı, sefer sıklık süresi gibi parametrelere göre belirlenir. Bu yöntemler; konvansiyonel katener sistemi, rijit katener sistemi, 3. Ray sistemidir.

### 2.2.4.1 Konvansiyonel Katener Sistemleri

Elektrik enerjisi kullanılarak taşımacılık yapılan raylı sistemlerde, cer trafo merkezlerinden aldığı enerjii, demiryolu boyunca araçlara ulaştıran, genellikle bir kontak teli ve bir/iki taşıyıcı telden oluşan iletken havai hattı Katener, iletken havai hat ile bu hattı taşımaya yarayan ekipmanların tümüne OCS (Overhead Catenary System) veya Türkçe karşılığı olan Katener Sistemi denilmektedir.

Dünyada seyir hızına bağlı olarak, çok değişik katener sistemleri kullanılmaktadır. Konvansiyonel katener sistemi, Otomatik Gergili Basit Katener Sistemi (ATSC) veya Sabit Gergili Katener Sistemi (FTTW) olmak üzere iki tipte dizayn edilmektedir.

Konvansiyonel katener sistemleri; katener direği, konsol hoban donanımı, portör teli, seyir teli, pandül, Y halatı, geri dönüş iletkeni, besleme iletkeni, besleme iletkeni konsolundan oluşmaktadır.



Şekil 2.22 : Konvansiyonel katener sistemi konsol hoban donanımı.

Otomatik gergili katener sistemi, araçların maksimum 100 km/sa hızla seyrettiği, Metro ve Hafif Metrolar gibi düz ana yollarda kullanılmaktadır. Katener sistemindeki teller denge ağırlık düzenekleri ile daima nominal gergi kuvvetinde tutulurlar. Metro İstanbul işletmesinde bulunan; Yenikapı- Havalimanı arasındaki LRT (Hafif Metro) Hattı Otomatik Gergili Katener Sistemi tasarımlarına göre tesis edilmiştir.

TS EN 50119 standardına göre enerjili kısımlar ile toprak/topraklı kısımlar arasında olması gereken elektriksel açıklık değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 2.2 :** TS EN 50119 standardı elektriksel açıklıklar.

Gerilim	Statik(mm)	Dinamik(mm)
DC 600 V	100	50
DC 750 V	100	50
DC 1,5 kV	100	50
DC 3,0 kV	150	50
AC 15 kV	150	100
AC 25 kV	270	150

TS EN 50119 standardına göre farklı fazlara sahip enerjili kesimler arasında olması gereken elektriksel açıklık değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 2.3 :** TS EN 50119 standardı faz farkı kaynaklı açıklıklar.

Nominal Gerilim(kV)	Faz Farkı(Derece)	Faz Farkından Kaynaklı Gerilim(kV)	Statik(mm)	Dinamik(mm)
15	120	26	260	175
15	180	30	300	200
25	120	43,3	400	230
25	180	50	540	300

#### 2.2.4.2 Rijit Katener Sistemleri

Günümüzde tünellerde üçüncü raya alternatif olarak geliştirilen, hafif, üçüncü raya göre daha esnek, bakımı kolay ve yüksek iletkenliğe sahip rijit katener sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin normal katener sistemleri ile beraber aynı hat içinde kolaylıkla kullanılabilmesi en büyük avantajlarından biridir. Son dönemde yapılmış olan metro hatlarının 1500 V DC cer gücü beslemeli sistemlerinde rijit katener kullanılmaktadır. Sistem ana olarak Şekil 2.23' de verilmiş olan alüminyum kompozit bir profil ve buna tutturulmuş kontak telinden oluşmaktadır.



Şekil 2.23 : Rijit katener ve cer gücü iletimi.

### 2.2.4.3 3. Ray Sistemleri

3. Ray sistemleri enerji beslemesi olarak temelde katener sistemleri ile aynı mantıkta çalışmaktadır. OG seviyesi transformatörler ile istenilen gerilim seviyesine düşürülür, redresörler (diyot grupları ile) ile doğrultma işlemi gerçekleştirir. Elde edilen DC gerilim kablolar vasıtasıyla taşınır. Farklı olan yönü, kablolar ile taşınan besleme gerilimi katener hattı ve pantograf ile araca verilmeyip, 3. Ray ile araçta bulunan 3. Ray pabucu dediğimiz ayakların değmesi ile raydan trene aktarılmış olur.



Şekil 2.24 : 3. Ray kablo bağlantıları.

3. Ray; İstanbul metrolarında sadece M2 Yenikapı – Hacıosman – Seyrantepe Metrosunda kullanılmaktadır. 750 V DC besleme ile çalışmaktadır. Diğer tüm metro hatlarında 1500 V DC veya 750 V DC beslemeli katener sistemleri kullanılmaktadır. 3. Rayı diğer sistemlerden daha avantajlı kılan en önemli etken düşük tünel kesitlerinde kullanılabilmesidir. Böylelikle tünel kesitlerinin düşük olmasıyla beraber maliyetler düşürülmüş olmaktadır. Bunun yanı sıra 3. Ray katener sistemleri gibi göz önünde değildir ve görüntü kirliliğine yol açmaz. 3. Ray sistemleri katener sistemlerine göre ulaşılabilirliği ve bakım yapılabilirliği açısından daha rahat çalışma olanağı sunmaktadır. Bu avantajlarına karşın güvenlik açısından 3. Ray her zaman tehlike oluşturmaktadır. Elektrik enerjisinin yer seviyesinde iletilmesi insan faktörü açısından güvenlik sorunları oluşturur.

#### **2.2.4.4 APS Sistemi**

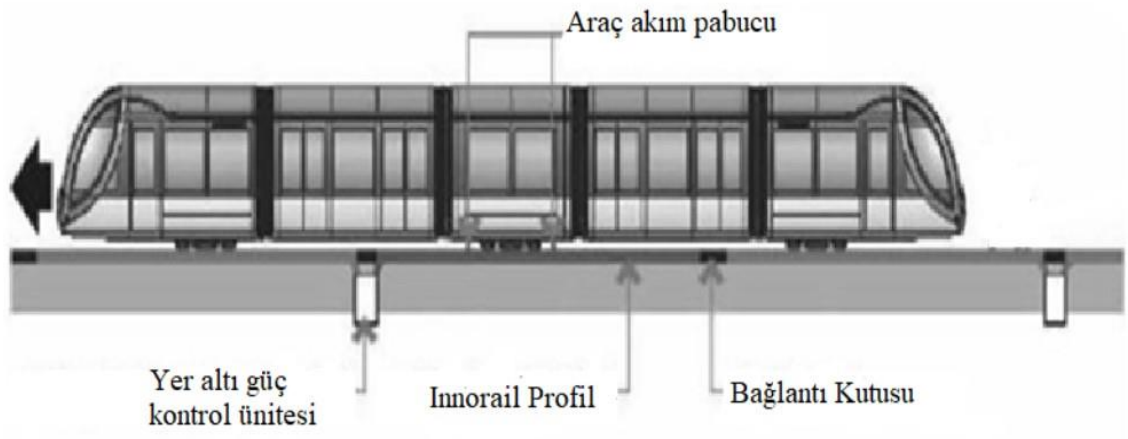
APS (Otomatik Güç Kaynağı) sistemi özellikle tarihi şehir merkezlerindeki tramvay hatlarında katener direkleri ve kontak teli gibi görüntü kirliliğini ortadan kaldırmak için geliştirilen bir enerji besleme sistemi çeşididir. InnoRail olarak da bilinen sisteme benzer enerji iletim ortamları 1890'lı yıllarda Amerika, İngiltere ve Fransa'da denenmiş fakat bazı güvenlik sorunları oluşturmuştur [22].

İlerleyen dönemlerde sistem üzerinde yeniden çalışılarak yeni teknolojiler ile daha güvenli hale getirilmiştir (Şekil 2.25). Fransa'nın Bordeaux kentinde toplam uzunluğu 25 km olan bir tramvay hattının 11.5 km'lik kısmında bu sistem Aralık 2003'de hizmete alınmış bulunmaktadır. Ülkemizde de İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından yapımı devam etmekte olan T5 (Eminönü-Alibeyköy) tramvay hattı APS sistemine örnektir.

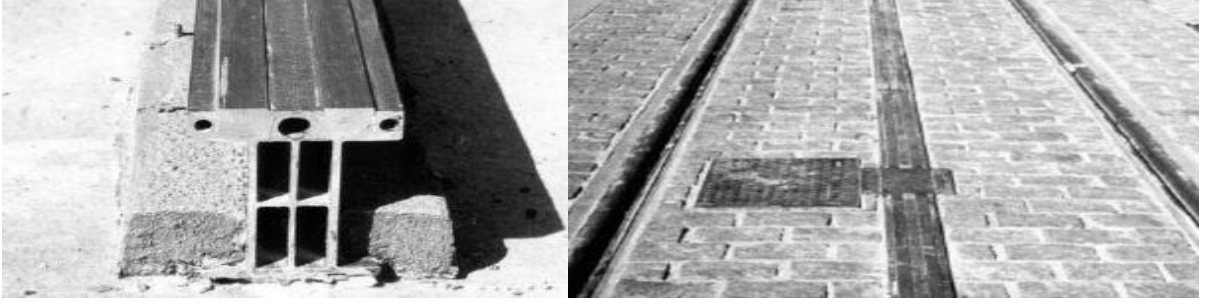


Şekil 2.25 : Bordeaux şehrinde innorail uygulaması [22].

Sistemin çalışma prensibi sadece üzerinde araç bulunan bölgeyi enerjilendirmektedir. Bunu dışında kalan bölgeler enerjisiz olarak kalmaktadır. İki ray arasında zemine monte edilen Innorail sisteminde 11 metre profilin 8 metresi iletken 3 metresi yalıtkan olup 2 profil bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 2.26 – Şekil 2.27).



Şekil 2.26 : Innorail sisteminin besleme şekli [22].



Şekil 2.27 : Innorail sistemine ait profil ve hat görünümü [22].

## 2.3 RAYLI SİSTEMLERDE ELEKTRİK ENERJİSİ VERİMİ ARTTIRILMASI

Dünya popülasyonunun hızlı bir şekilde artmasıyla beraber ulaşım, metropol ülkelerde en çok enerji tüketen ve çevreyi kirleten faktörlerden biridir. Son dönemde yayımlanan raporlarda, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %30'unun ulaşım kaynaklı olduğu belirtilmektedir [23].

### 2.3.1 Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı Yöntemi

Trenler cer beslemesi ile hareket ve yükseklik kazandığı durumda kinetik ve potansiyel olarak enerji kazanır. Bu kazanılan enerji motorların frenleme durumunda jeneratör olarak çalışması sayesinde elektrik enerjisine çevrilebilir. Üretilen elektrik enerjisi, katener sistemine hatta geri besleme şeklinde tekrar verilebilir, bir tren hatta frenleme enerjisi yaparken diğer hatta ki bir trenin kalkış esnasında bu enerjiyi kullanabilmektedir. Bu olay, rejeneratif frenleme olarak bilinir ve günümüzde enerji tasarrufu yapabilmek adına raylı sistemlerde kullanılmaktadır [24].

Rejeneratif frenleme, araçların frenleme enerjisini ortaya çıkan elektrik enerjisini kalkış esnasında kullanarak geri kazanmak olarak açıklanabilir. Rejeneratif frenleme teknolojisi, işletmelerin sefer sıklıklarının yoğun olması durumlarında araçların çok fazla frenleme ve kalkış yapmaları sonucunda çok büyük potansiyel oluşturmaktadır [25].

Trenlerin sefer sıklık süreleri 180 saniye altında olduğu durumlarda ortaya çıkan rejeneratif enerjinin büyük kısmı diğer trenler tarafından kullanılmaktadır [26].

Trenin frenlemesi sırasında ortaya kinetik enerji çıkar ve kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Elektrik enerjisine dönüşen bu enerji katener hattına geri iletilir. Katener

hattından kalkış yapacak olan diğ er bir trene bu enerji iletilir ve b oyelikle hatta bu enerjiye ihtiyacı olan diğ er trenin bu enerjiyi kullanması ile enerji kazanımı elde edilmiş olur.[27]

### **2.3.2 Enerji Depolama Sistemleri**

Enerji depolama sistemleri, tren üzerinde veya hattın belirli noktalarında bulunabilir [28]. Doğru boyutlandırma ile hem araç üstü hem de hattın belirli noktalarında kurulan enerji depolama sistemleri şehir içi raylı sistemlerde önemli bir cer enerji tasarrufu sağlayabilir. Enerji tasarrufunun yanında şebeke geriliminde oluşabilecek harmonikleri azaltarak geriliminin sabitleştirilmesi ve g c t ketimeinin pik değerlerini kesmesine katkıda bulunabilirler. Bunun yanı sıra tren üzerinde bulunan enerji depolama sistemleri katener bulunmayan veya enerjisi kesintisi olan bölgelerde enerji sürekliliğini sağlayabilir. şehirlerarası demiryollarında kullanılacak enerji depolama sistemleri için, ultrakapasitörler, piller / bataryalar ve volanlar en uygun depolama seçenekleridir [29, 30].

### **2.3.3 Enerji Tasarruflu Sürüş**

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte günümüzde, sürücüsüz şekilde uygun değer sürüş stratejisini hesaplayan ve sürekli olarak güncelleyen sürüş öneri sistemleri bulunmaktadır. G cml  algoritma programları ile birlikte, mobil haberleşme ağları, ileri telematik çözümler, tren işletmesi ve tren kontrolünü etkileyen iyileştirmeler için uygun çözümler sunabilmektedir [31].

### **2.3.4 Trenler Arası Süre Yönetimi**

Trenler arası süreyi ayarlamak, hem işletmenin sefer sıklık takviminin doğru çalışması hem de trenlerin frenleme esnasında ürettiği rejeneratif enerjinin daha aktif biçimde kullanılabilmesi açısından önemlidir. Enerji tasarrufu yüzdesi, daha kısa trenler arası süresi ve s z lme ile artar [32].

Tren frenleme esnasında ortaya çıkan rejeneratif enerjinin daha efektif kullanılmasını sağlamak için sefer süresi ayarlanarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Sefer sıklık süresi ne kadar yoğun olursa hat yoğunluğundan dolayı rejeneratif enerji verimliliği de artacaktır. Aksi takdirde, enerji rezistanlarda yakılarak ısı dağılımı ile kaybedilir [33].

### 2.3.5 Süper İletken Kablo İle Enerji İletimine Dayalı Enerji Verimliliği

Bu uygulamaların temeli direnç kayıplarının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu, bakır tellerle aynı boyutlarda olabilecek fakat bakır tellere göre çok daha yüksek akım taşıyabilen yeni nesil süper iletken tel üretmektir. Bu süper iletken teller bakır tellere göre gerektiğinde 100 kat daha fazla akım taşıma kapasitesine sahip olabilecek şekilde tasarlanabilir [34].

Gelişen teknoloji ile birlikte üretilen iletkenlerin dirençlerin ihmal edilebilecek seviyede olması sebebiyle, süper iletken kablolar aşırı yük altında bulunan hatlardaki yükü iletmek ve şebeke yoğunluğunu azaltmak amacıyla enerji şebekelerinde kullanılabilirler [35].

### 2.3.6 Tersinir Cer Trafoları

Diyot doğrultucular kullanan klasik DC transformatör merkezlerinin aksine, ters çevrilebilir transformatör merkezleri, çift yönlü güç akışı sağlayan çeviricileri içerir.

Bu, düzeltilmiş enerji fazlalığının tekrar DC/AC dönüşümü yapılarak AC şebekesine geri döndürülebileceği ve yürürlükte bulunan mevzuata bağlı olarak işletmecinin şebekesinde (aydınlatma, yürüyen merdivenler, ofisler vb.) kullanılabilmesi veya enerji tedarikçisine satılabileceği anlamına gelir. Tersinir cer trafoları, enerji depolama sistemleri ile kıyaslandığında daha az dönüşüm kaybı ile çalışırlar. Fakat hattaki direnç kayıpları transformatör merkezinin konumuna göre çok önemli bir hal almaktadır. Rejenratif enerjiler gibi katenersiz bölgelerde enerji devamlılığı sağlamazlar. Diğer enerji tasarruf yöntemlerine göre maliyeti daha fazladır. Yapılan çalışmalar tersinir cer trafolarının enerji tüketiminin %10 civarında azaltılabileceğini göstermektedir. [36,37].

Tersinir cer transformatör merkezlerinden beklenen faydalar şunlardır; rejeneratif enerjisinin geri kazanım miktarının artırılması ile trenler arasındaki frenleme ve kalkış ile birlikte kendi aralarında enerji transferini mümkün kılarak, fren dirençlerinin kullanımı azaltılarak, buna bağlı olarak da tren kütlesi ve rezistansta ısı yakımı azaltılması sağlanması ve AC şebekede güç faktörü iyileştirilmesi ve harmoniklerin azaltılması hedeflenmektedir [38].

### 2.3.7 Yardımcı Tesisler Tarafı Enerji Tasarruf Yaklaşımları

Bir raylı sistemin enerji tüketimi iki ana bölümden meydana gelmektedir. Bunlar yolcu taşımacılığını yapan trenlerin tahrik gücünü sağlayan cer transformatörleri ve yolcuların

istasyonlarda beklediği alanlar ve yardımcı sistemlerin beslemelerinin sağlandığı iç ihtiyaç transformatör beslemeleridir.

Yardımcı beslemelerin enerji gerektiren bölümleri genel olarak aydınlatma, yürüyen merdivenler, hareketli yürüyüş yolları, asansörler ve bilgi/reklam ekranlarını içermektedir. Metro istasyonlarında, klima ve havalandırma enerji talebinin toplam tüketimin üçte ikisini oluşturduğu yaz aylarında, bu ekipmanlar en büyük enerji tüketimine sebep olmaktadır [39].



### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Raylı sistemlerde cer transformatörlerinden kaynaklı enerji kesintilerinde belirlenen senaryolara ve sefer aralıklarına göre DC simülasyonları gerçekleştirilerek cer transformatörleri yüklenme durumları değerlendirilecektir.

İlgili simülasyon çalışması Metro İstanbul A.Ş' nin işletmesinde bulunan M5 (Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy) hattında, RAILSIM simülasyon programı ile araç parametreleri, hat verileri, elektrifikasyon ve işletme bilgileri ışığında gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1 TEMEL VERİLER



Şekil 3.1 : M5 hattı istasyonları [40].

M5 Üsküdar-Çekmeköy hattı Anadolu Yakası'nın ikinci metro hattı olup, Türkiye'nin ilk sürücüsüz metro hattıdır. İnşa edildiği bölgede yüksek yolcu potansiyeline sahip olan hattın İstanbul Büyükşehir Belediyesi raylı sistemler gelecek vizyonu çerçevesinde sürdürülen çalışmalarla, Sultanbeyli ve Kurtköy bölgesine uzatılması planlanmaktadır [40].

Çalışmanın modellemesi üç ana veri bölümünden meydana gelmektedir. Birinci bölüm M5 hattının eğim, kurp, istasyon, platform, hız sınırları gibi verilerden meydana gelmektedir. İkinci bölüm M5 hattının besleme dirençleri, transformatör merkezleri, jumper, hat sonu, hat başı dirençleri, doğrultucu, kwh tüketim fiyat verilerinin yer aldığı elektrifikasyon kısmıdır. Üçüncü bölüm ise kullanılan aracın maksimum hız, maksimum jerk limit, yardımcı güç besleme gücü,

AW3 ağırlığı, uzunluk, maksimum hat gerilimi, minimum hat gerilimi, maksimum frenleme ivmesi gibi verilerden oluşan araç bölümüdür.

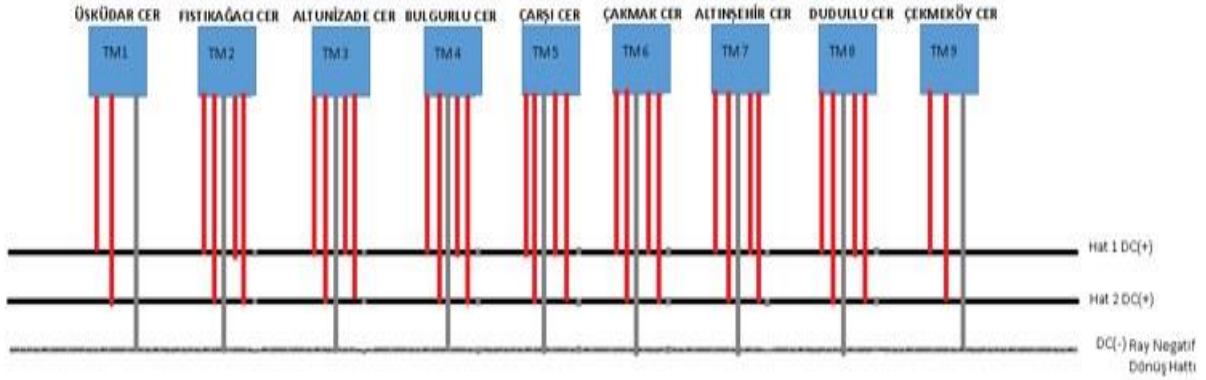
Metro İstanbul M5 hattı ile ilgili veriler sistem üzerinden çekilerek simülasyon programında oluşturulmuştur.

### 3.1.1 Hattın Elektifikasyon Verileri

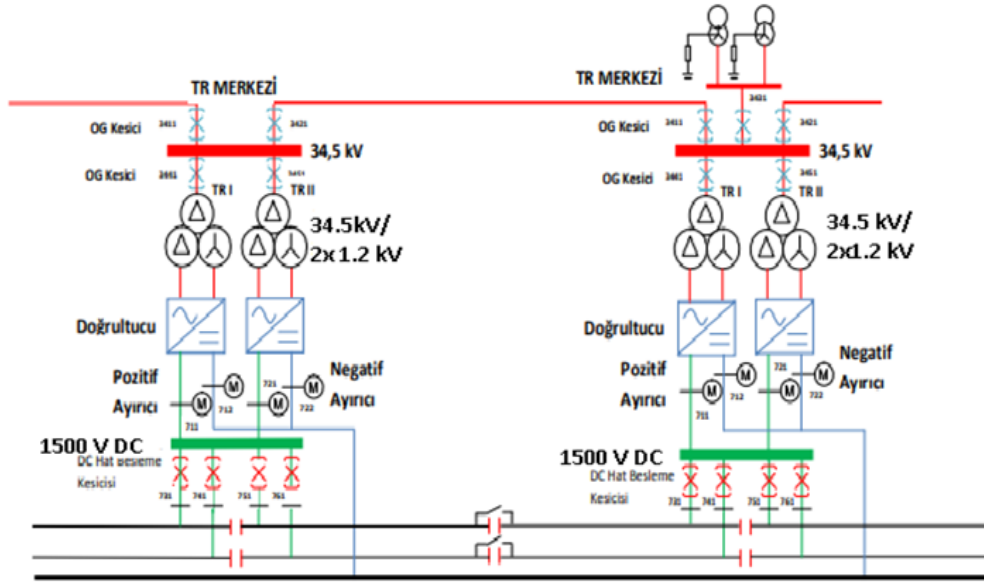
M5 hattı; TM1(Üsküdar), TM2(Fıstıkağacı), TM3(Altunizade), TM4(Bulgurlu), TM5(Çarşı), TM6(Çakmak), TM7(Altınşehir), TM8(Dudullu), TM9(Çekmeköy) olmak üzere 9 adet Cer Transformatör merkezinden oluşmaktadır.

Cer Transformatör merkezleri için; her bir pozitif ve negatif besleme 6x1x240 mm<sup>2</sup> bakır kablodan oluşmaktadır. Negatif besleme kabloların bağlantıları peron ortasından yapılmıştır.

M5 hattı Üsküdar (TM1) ve Çekmeköy (TM9) istasyonları hariç tüm istasyonlarda iki adet hat1, iki adet hat2 olmak üzere toplam dört adet pozitif besleme bağlantısı bulunmaktadır. Üsküdar(TM1) ve Çekmeköy (TM9) istasyonlarında ise bir adet hat1, bir adet hat2 olmak üzere toplam iki adet pozitif besleme bağlantısı bulunmaktadır.



Şekil 3.2 : M5 hattı DC tek hat modellemesi.



Şekil 3.3 : Metro elektrifikasyon sistemi.

## 3.2 SİMÜLASYON ADIMLARI

### 3.2.1 Tren Performans Hesaplayıcı

M5 hattının TPC bölümünde istenilen verileri Üsküdar-Çekmeköy ve Çekmeköy-Üsküdar yönü olmak üzere çift yönlü olarak text dosyası halinde hazırlanmıştır.

```

USK CEK4
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
**Track data for Metro Istanbul
**East bound track UC from Uskudar to Cekmekoy
**Track Information updated on 23/06/2020
**
**SG is for segment
SGMUC -21300 1699100
**
**GR is for Gradient
GRMUC -21300 0
GRMUC 7600 3740
GRMUC 26600 4150
GRMUC 120000 0
GRMUC 147700 4000
GRMUC 230800 0
GRMUC 256600 2300
GRMUC 347300 0
GRMUC 377800 1000
GRMUC 396100 3700
GRMUC 471400 0
GRMUC 507900 -1300
GRMUC 625700 0
GRMUC 661400 2330
GRMUC 757300 0

CVMUC 1337700 R -7000 105
CVMUC 1377500 R -7000 105
CVMUC 1476400 R 432 0 E
CVMUC 1546000 R -400 20 S
CVMUC 1613600 R 517 0
CVMUC 1661700 R -800 0
CVMUC 1670200 R 800 0
CVMUC 1699100 R 7032 0 E
**
**PL is for Platforms
PLMUC -21300 -6300 USK USKUDAR
PLMUC 120900 134900 FST FISTIKAGACI
PLMUC 230800 244800 BAG BAGLARBASII
PLMUC 351800 365800 ALT ALTUNIZADE
PLMUC 475500 489500 KSK KISIKLI
PLMUC 631000 645000 BLG BULGURLU
PLMUC 762900 776900 UMR UMRANIYE
PLMUC 869100 883100 CAR CARSI
PLMUC 968200 982200 YMN YAMANEVLER
PLMUC 1054400 1068400 CKM CAKMAK
PLMUC 1161400 1175400 IHL IHLAMURKUYU
PLMUC 1257000 1271000 ALS ALTINSEHIR
PLMUC 1351500 1365500 LIS LISE
PLMUC 1443300 1457300 DUD DUDULLU
PLMUC 1596600 1610600 NCP NECIPFAZIL
PLMUC 1685100 1699100 CEK CEKMEKOY
**
**CS is for Speed Limit
CSMUC -21300 -6300 50 T
CSMUC 8300 77000 70 T
CSMUC 120900 134900 50 T
CSMUC 138900 224100 70 H
CSMUC 230800 244800 50 T

```

Şekil 3.4 : Üsküdar – Çekmeköy text dosyası verileri.

```

CEK USK5 - 1
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
**Track data for Metro Istanbul
**East bound track UC from Cekmekoy to Uskudar
**Track Information updated on 12/07/2020
**
**SG is for segment
SGMCU 1701500 -21300
**
**GR is for Gradient
GRMCU 1701500 250
GRMCU 1682600 0
GRMCU 1639300 750
GRMCU 1619000 -1500
GRMCU 1593600 0
GRMCU 1467400 -1270
GRMCU 1439500 0
GRMCU 1423300 1000
GRMCU 1381900 4000
GRMCU 1347100 0
GRMCU 1283300 -2500
GRMCU 1252900 0
GRMCU 1188400 -2750
GRMCU 1157300 0
GRMCU 1081100 2750

CEK USK5 - 1
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
CVMCU -21300 R -120 15 E
**
**PL is for Platforms
PLMCU 1701500 1687500 CEK CEKMEKOY
PLMCU 1613400 1599400 NCP NECIPFAZIL
PLMCU 1458500 1444500 DUD DUDULLU
PLMCU 1366600 1352600 LIS LISE
PLMCU 1272100 1258100 ALS ALTINSEHIR
PLMCU 1178300 1164300 IHL IHLAMURKUYU
PLMCU 1070500 1056500 CKM CAKMAK
PLMCU 983700 969700 YMN YAMANEVLER
PLMCU 884600 870600 CAR CARSI
PLMCU 777200 763200 UMR UMRANIYE
PLMCU 644400 630400 BLG BULGURLU
PLMCU 492700 478700 KSK KISIKLI
PLMCU 365800 351800 ALT ALTUNIZADE
PLMCU 248800 234800 BAG BAGLARBASII
PLMCU 135500 121500 FST FISTIKAGACI
PLMCU -6300 -21300 USK USKUDAR
**
**CS is for Speed Limit
CSMCU 1701500 1687500 50 T
CSMCU 1680700 1665100 70 T

```

Şekil 3.5 : Çekmeköy- Üsküdar text dosyası verileri.

TPC bölümünden daha önceden oluşturulmuş olan hattın eğim, kurp, istasyon, hız sınırlamaları gibi veriler text dosyası halinde import bölümünden yüklenir. Araçların rejeneratif frenleme, motor verimi gibi eğrileri elde edilir. Veri yükleme işlemi tamamlanmasının ardından daha Rolling Stock kısmından daha önce oluşturulmuş araç parametreleri girilir.

Tren bileşenleri bölümü oluşturulmasının ardından, Edit bölümünden simülasyonun çalıştırılması için; istasyon başlangıç ve bitiş lokasyonları, araç yolcu kapasitesi, daha önce oluşturulmuş araç verileri eklenerek oluşturulur. Yapılan işlemlerin ardından simülasyon çalıştırılır.

TPC bölümünde girilen veriler doğrultusunda Üsküdar-Çekmeköy yönünde çalıştırılan araç 17204 metrelik hattı her istasyonda 30 saniyelik peron bekleme süreleri ile birlikte 32 dakika 17 saniye 50 saliselik sürede tamamlamıştır.

Yukarıda yapılan işlemlerin aynısı Çekmeköy- Üsküdar yönü için yapılmış olup sadece yüklenen text dosyaları ayrı yüklenerek ve Edit bölümünde bulunan run definition, istasyon başlangıç ve bitiş noktaları bölümleri yüklenerek tamamlanmıştır. Simülasyon programı girilen veriler ışığında çalıştırılır.

TPC bölümünde girilen veriler doğrultusunda Çekmeköy-Üsküdar yönünde çalıştırılan araç 17088 metrelik hattı her istasyonda 30 saniyelik peron bekleme süreleri ile birlikte 30 dakika 07 saniyelik sürede tamamlamıştır.

### **3.2.2 Yük Akış Analizi**

TPC bölümünde oluşturduğumuz veriler üzerinden araçla ilgili hattı tamamlama süresi, istasyonlara ulaşma süresi, kaç km\sa hız ile gittiği gibi sonuçlara ulaştık.

Yük akış analizi yaparken normal işletme durumu ileride planlanan durumlar ve kötü durum senaryoları incelenecektir.

#### **3.2.2.1 Normal İşletme Senaryosu**

Yük akış analizi bölümünde güç fiyatlandırma kısmından M5 hattının işletme saatleri içerisinde \$/kwh türünden değerleri oluşturulmuştur.

Kwh başına tüketim fiyatları bölümü oluşturulmasının ardından, transformatör merkezleri oluşturma bölümünde M5 hattına ait cer transformatörleri için ilgili parametreler girilerek toplam 9 adet cer transformatör merkezi için bu işlem yapılmıştır. Bu bölümde besleme bağlantıları, geri dönüş bağlantıları, transformatör dirençleri, doğrultucu güçleri girilerek oluşturulmuştur.

Transformatör merkezleri oluşturulması bölümünde cer transformatörleri ile alakalı kısım oluşturulmasının ardından fiziksel yardımcı tesisler bölümünde hem Üsküdar-Çekmeköy hem de Çekmeköy-Üsküdar yönü için her bir cer transformatör merkezinin besleme bağlantı noktaları, geri dönüş bağlantıları noktaları, jumper, hat başı, hat sonu direnç değerleri eklenerek bu bölüm oluşturulur.

Yük akış analizi bölümünde cer transformatör merkezleri, besleme bağlantı, geri dönüş bağlantı, jumper kısımları oluşturulmasının ardından, işletme takvimi kısmından hangi zaman aralığında kaç saniyelik sefer sıklığında işletme yapılacağı oluşturulur. Normal işletme 120 saniye aralıkla planlandığından tekrar sıklığı kısmı 120 saniye seçilmiştir.

Yük akış analizi bölümünde tüm parametre ve işletme koşulları oluşturulmasının ardından kontrol kısmından sistemsel bir hata olup olmadığı ne kadarlık bir aralıkta simülasyonun çalıştırılacağı belirlenir.

Transformatör merkezlerinin güç değerleri saat, dakika ve anlık olarak, akım değerleri her transformatör merkezi için, besleme hattı ve geri dönüş hattı ayrı ayrı olarak belirlenmiştir. Hat gerilimi maksimum ve minimum değerleri ile ray gerilim değerleri belirlenen standartlara göre değerlendirilmiştir.

### **3.2.2.2 Bir TM Devre Dışı Kalma Durumu**

Bir transformatör merkezi devre dışı kalma durumu senaryosunda daha önce belirtilen işlemler TPC ve yük akış analizi bölümünde tekrar oluşturulur. Bu bölümde TM1 ve TM9 merkezi arasındaki tüm TM'ler sırasıyla devre dışı bırakılarak simülasyon çalıştırılmıştır.

Yük akış analizi bölümünde cer transformatör merkezleri, besleme bağlantı, geri dönüş bağlantı, jumper kısımları oluşturulmasının ardından, işletme takvimi kısmından hangi zaman

aralığında kaç saniyelik sefer sıklığında işletme yapılacağı oluşturulur. Bir TM devre dışı bırakılarak 150 saniye aralıkla planlandığından tekrar sıklığı kısmı 150 saniye seçilmiştir.

Yük akış analizi bölümünde tüm parametre ve işletme koşulları oluşturulmasının ardından kontrol kısmından sistemsal bir hata olup olmadığı ne kadarlık bir aralıkta simülasyonun çalıştırılacağı belirlenir.

Transformatör merkezlerinin güç değerleri saat, dakika ve anlık olarak, akım değerleri her transformatör merkezi için, besleme hattı ve geri dönüş hattı ayrı ayrı olarak belirlenmiştir. Hat gerilimi maksimum ve minimum değerleri ile ray gerilim değerleri belirlenen standartlara göre değerlendirilmiştir.

### **3.2.2.3 Komşu Olmayan TM Devre Dışı Kalma Durumu**

Komşu olmayan TM devre dışı kalma durumu senaryosunda daha önce belirtilen işlemler TPC ve yük akış analizi bölümünde tekrar oluşturulur. Bu bölümde TM1 ve TM9 merkezi arasındaki komşu olmayan TM'ler sırasıyla devre dışı bırakılarak simülasyon çalıştırılmıştır.

Yük akış analizi bölümünde cer transformatör merkezleri, besleme bağlantı, geri dönüş bağlantı, jumper kısımları oluşturulmasının ardından, işletme takvimi kısmından hangi zaman aralığında kaç saniyelik sefer sıklığında işletme yapılacağı oluşturulur. İki TM devre dışı bırakılarak 210 saniye aralıkla planlandığından tekrar sıklığı kısmı 210 saniye seçilmiştir. Yük akış analizi bölümünde tüm parametre ve işletme koşulları oluşturulmasının ardından kontrol kısmından sistemsal bir hata olup olmadığı ne kadarlık bir aralıkta simülasyonun çalıştırılacağı belirlenir.

Transformatör merkezlerinin güç değerleri saat, dakika ve anlık olarak, akım değerleri her transformatör merkezi için, besleme hattı ve geri dönüş hattı ayrı ayrı olarak belirlenmiştir. Hat gerilimi maksimum ve minimum değerleri ile ray gerilim değerleri belirlenen standartlara göre değerlendirilmiştir.

### **3.2.2.4 Komşu TM Devre Dışı Kalma Durumu**

Komşu TM devre dışı kalma durumu senaryosunda daha önce belirtilen işlemler TPC ve yük akış analizi bölümünde tekrar oluşturulur. Bu bölümde TM1 ve TM9 merkezi arasındaki komşu TM'ler sırasıyla devre dışı bırakılarak simülasyon çalıştırılmıştır.

Yük akış analizi bölümünde cer transformatör merkezleri, besleme bağlantı, geri dönüş bağlantı, jumper kısımları oluşturulmasının ardından, işletme takvimi kısmından hangi zaman aralığında kaç saniyelik sefer sıklığında işletme yapılacağı oluşturulur.

TM1 ve TM9 hariç iki TM devre dışı bırakılarak 300 saniye aralıkla planlandığından tekrar sıklığı kısmı 300 saniye seçilmiştir. Özel olarak hat başı ve hat sonu olan tek doğrultuculu çalışan TM1 ve TM9 devre dışı kalma durumu 500 saniye aralıkla planlandığından tekrar sıklığı 500 saniye seçilmiştir.

Yük akış analizi bölümünde tüm parametre ve işletme koşulları oluşturulmasının ardından sistemsel bir hata olup olmadığı ne kadarlık bir aralıkta simülasyonun çalıştırılacağı belirlenir.

Transformatör merkezlerinin güç değerleri saat, dakika ve anlık olarak, akım değerleri her transformatör merkezi için, besleme hattı ve geri dönüş hattı ayrı ayrı olarak belirlenmiştir. Hat gerilimi maksimum ve minimum değerleri ile ray gerilim değerleri belirlenen standartlara göre değerlendirilmiştir.

### **3.2.2.5 Güncel İşletme Senaryosu**

Güncel İşletme ile çalışma senaryosunda daha önce belirtilen işlemler TPC ve yük akış analizi bölümünde tekrar oluşturulur. Bu bölümde tüm TM' ler devrede olacak şekilde simülasyon çalıştırılmıştır.

Yük akış analizi bölümünde cer transformatör merkezleri, besleme bağlantı, geri dönüş bağlantı, jumper kısımları oluşturulmasının ardından, işletme takvimi kısmından hangi zaman aralığında kaç saniyelik sefer sıklığında işletme yapılacağı oluşturulur. Güncel işletme sıklığı en yoğun saatlerde 270 saniye ile yapıldığından tekrar sıklığı kısmı 270 saniye seçilmiştir.

Yük akış analizi bölümünde tüm parametre ve işletme koşulları oluşturulmasının ardından kontrol kısmından sistemsel bir hata olup olmadığı ne kadarlık bir aralıkta simülasyonun çalıştırılacağı belirlenir. Bu bölüm saatlik, dakikalık ve anlık olarak incelenmiştir.

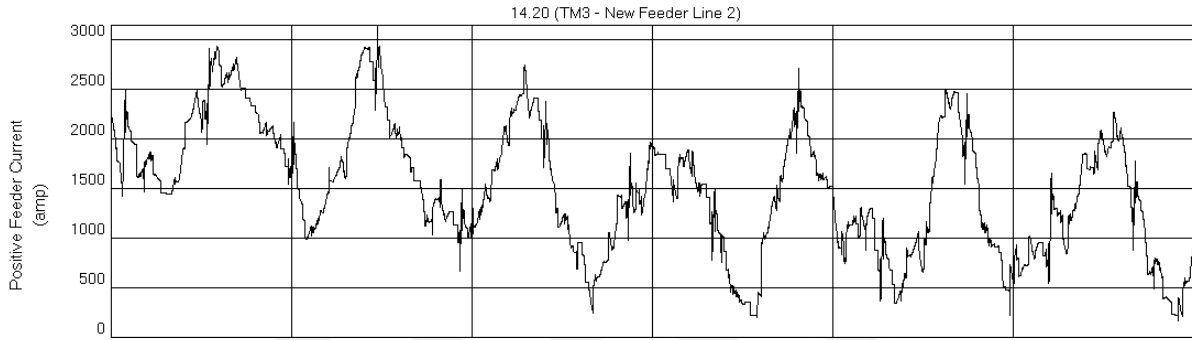
Transformatör merkezlerinin güç değerleri saat, dakika ve anlık olarak, akım değerleri her transformatör merkezi için, besleme hattı ve geri dönüş hattı ayrı ayrı olarak belirlenmiştir. Hat gerilimi maksimum ve minimum değerleri ile ray gerilim değerleri belirlenen standartlara göre değerlendirilmiştir.

## 4. BULGULAR

### 4.1 NORMAL İŞLETME SENARYOSU

#### Transformatör Merkezleri Akım Değerleri:

Yük akış analizi bölümünde girdiğimiz elektrifikasyon değerleri ile anlık maksimum hat besleme ve geri dönüş akım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : TM3 anlık maksimum akım grafiği çıktısı.

Tablo 4.1 : 120 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri.

Transformatör	Besleme Hattı 2(A)	Besleme Hattı 1(A)	Geri Dönüş Hattı (A)	Besleme Hattı (A)	Besleme Hattı 3(A)	Geri Dönüş Hattı 1 (A)
TM1	0	2567	1926	1654	0	3060
TM2	2450	1875	3000	2568	3765	3484
TM3	3108	3280	3765	2300	4000	3819
TM4	4060	2005	3600	2046	3886	3762
TM5	3975	2435	3569	2189	3492	2752
TM6	3125	2574	2985	2075	3476	3188
TM7	3200	2653	3472	2341	3000	2983
TM8	3085	3490	3565	2186	4001	3444
TM9	3000	0	3400	0	2047	1658

Besleme Hattı 2(A); Hat 2 TM1 yönü beslemesi, Besleme Hattı 1(A); Hat 1 TM1 yönü beslemesi, Geri Dönüş Hattı(A); Hat 2 geri dönüş hattı, Besleme Hattı(A); Hat 2 TM9 yönü beslemesi, Besleme Hattı 3(A); Hat 1 TM9 yönü beslemesi, Geri Dönüş Hattı 1(A); Hat1 geri dönüş hattını temsil eder.

Trafo merkezlerinin anlık maksimum akım değerleri hat fiderleri ve dönüş fiderleri olarak incelenmiştir. Tabloya baktığımızda anlık maksimum besleme akımı TM4 merkezinde 4060 A değerinde, geri dönüş akımının TM3 merkezinde 3819 A değerinde olduğu görülmektedir.

#### **Transformatör Merkezleri Gerilim Değerleri:**

EN 50163 standartlarına göre 1500 V DC beslemeli sistemlerde minimum gerilim 1000 V maksimum gerilim 1800 V olmalıdır. EN 50122-1:2011 standartlarına göre ray gerilim 120 V geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır.

**Tablo 4.2 :** 120 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri.

<b>Transformatör Merkezi</b>	<b>Maksimum Hat Gerilimi</b>	<b>Minimum Hat Gerilimi</b>	<b>Maksimum Ray Gerilimi</b>
<b>TM1</b>	1535	1456	92
<b>TM2</b>	1536	1454	95
<b>TM3</b>	1536	1451	98
<b>TM4</b>	1540	1450	100
<b>TM5</b>	1532	1460	97
<b>TM6</b>	1535	1460	97
<b>TM7</b>	1537	1462	96
<b>TM8</b>	1555	1440	100
<b>TM9</b>	1557	1438	102

Minimum hat gerilimi TM9'da 1438 V' tur. Ray gerilimi ise 102 V' tur. Elde edilen değerler yukarıda belirtilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

### Transformatör Merkezleri Güç Değerleri:

Transformatör merkezleri 120 saniye işletme senaryosuna göre anlık, dakikalık ve saatlik olarak sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.3 :** 120 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri.

Transformatör	Maksimum Güç (kW)	%(yüklenme oranı)	Ortalama Güç 1 Dakika (kW)	%(yüklenme oranı)	Ortalama Güç 2 Saat (kW)	%(yüklenme oranı)
TM1	5200 kW	173	2657 kW	88	1289 kW	43
TM2	8120 kW	135	4678 kW	78	2985 kW	50
TM3	10275 kW	171	6500 kW	108	4300 kW	71
TM4	10346 kW	172	6123 kW	102	3600 kW	60
TM5	7781 kW	129	3764 kW	62	2867 kW	47
TM6	7775 kW	129	4300 kW	71	2800 kW	46
TM7	7711 kW	128	4267 kW	71	2945 kW	49
TM8	8356 kW	139	5546 kW	92	3215 kW	53
TM9	6500 kW	216	3586 kW	119	2748 kW	91

Yük akış analizi bölümünde transformatör merkezi oluşturma bölümünde doğrultucuların nominal kurulu güç değerlerini girerek TPC bölümünde girdiğimiz tren ve işletme senaryolarına göre tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Verilen tabloda anlık maksimum gücün TM4 merkezinde 10.3 MW değeri ile gerçekleştiği görülmektedir fakat bu güç talebi çift doğrultucu ile sağlandığından dolayı yüklenme oranı %172'dir. Ortalama 1 dakikalık sonuçlarda maksimum gücün 3586 kW seviyesinde %119 yüklenmektedir.

Yüklenme oranları güç taleplerinin nominal kurulu güce oranlanması ile hesaplanmıştır. Transformatör ve doğrultucuların aşırı yük sınıfı VI olup, %150 yük altında 2 saat ve %300 yük

altında 1 dakika çalışma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Tablodaki değerler verilen yüklenme oranları ile incelendiğinde 120 saniye işletmenin sorunsuz şekilde yapılabileceği görülmektedir.

#### 4.2 BİR TRAFİKO MERKEZİNİN KOMPLE DEVRE DIŞI KALMASI

##### Transformatör Merkezleri Akım Değerleri:

Bu senaryoda bir transformatör merkezinin devre dışı kalması durumunda 150 saniye sefer sıklığında 2 saat süre ile 180 saniye sefer sıklığında sürekli durumda çalışması beklenilmiştir. Simülasyonda TM'ler sırasıyla devre dışı bırakılarak yüklenme durumları 150 saniye sefer sıklığı durumu incelenmiştir. Yük akış analizi bölümünde girdiğimiz elektrifikasyon değerleri ile anlık maksimum hat besleme ve geri dönüş akım değerleri elde edilmiştir.

**Tablo 4.4 :** 150 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri.

Transformatör Merkezi Devre Dışı	Maksimum Yüklü Transformatör	Besleme Hattı 2(A)	Besleme Hattı 1(A)	Geri Dönüş Hattı (A)	Besleme Hattı (A)	Besleme Hattı3(A)	Geri Dönüş Hattı 1(A)
TM1	TM2	2894	2442	3572	2937	3075	3028
TM2	TM3	3885	2207	4115	3042	3009	3774
TM3	TM4	3991	1764	4012	3221	2998	4119
TM4	TM3	3616	2896	3541	2004	3809	4114
TM5	TM6	3806	1851	3532	3612	2905	3459
TM6	TM5	2469	3144	3614	2132	3649	3003
TM7	TM8	3277	1731	3648	3806	3478	4176
TM8	TM7	2528	3269	3844	1985	4932	3911
TM9	TM8	2586	4051	3897	2403	5392	4335

Tabloya baktığımızda anlık maksimum besleme akımı TM9 merkezinde 5392 A değerinde, geri dönüş akımının TM9 merkezinde 4335 A değerinde olduğu görülmektedir.

### **Transformatör Merkezleri Gerilim Değerleri:**

Bu senaryoda TM'ler sırasıyla devre dışı bırakılarak yüklenme durumları incelenmiştir. EN 50163 standartlarına göre 1500 V DC beslemeli sistemlerde minimum hat gerilimi 1000 V maksimum gerilim 1800 V olmalıdır. EN 50122-1:2011 standartlarına göre ray gerilimi sürekli durumlar için 120 V geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır.

**Tablo 4.5 :** 150 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri.

Devre Dışı Transformatör Merkezi	Maksimum Hat Gerilimi	Minimum Hat Gerilimi	Maksimum Ray Gerilimi
TM1	1507	1416	104
TM2	1539	1405	105
TM3	1585	1382	111
TM4	1591	1360	112
TM5	1598	1395	109
TM6	1560	1425	104
TM7	1584	1390	106
TM8	1607	1346	112
TM9	1504	1312	118

Minimum hat gerilimi hat sonu olan TM9'un devre dışı kalması durumunda 1312 V' tur. Maksimum ray gerilimi ise hat sonu olan TM9'un devre dışı kalması durumunda 118 V' tur. Elde edilen değerler yukarıda belirtilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

### **Transformatör Merkezleri Güç Değerleri:**

Bu senaryoda TM'ler sırasıyla devre dışı bırakılarak yüklenme durumları incelenmiştir. Yüklenme oranları güç talebinin nominal kurulu güce oranı ile bulunmuştur. Transformatör merkezleri 150 saniye işletme senaryosuna göre anlık, dakikalık ve saatlik olarak sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.6 :** 150 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri.

Devre Dışı Transformatör	Maksimum Güç (kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör	Ortalama Güç 1 Dakika(kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör	Ortalama Güç 2 Saat (Kw)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör
TM1	9985 kW	166	TM2	2595 kW	86	TM9	3487 kW	58	TM3
TM2	7159 kW	238	TM1	4327 kW	144	TM1	2537 kW	84	TM1
TM3	10280 kW	171	TM4	6408 kW	106	TM4	3796 kW	63	TM4
TM4	4954 kW	165	TM9	5560 kW	92	TM3	3687 kW	61	TM3
TM5	4750 kW	158	TM9	2658 kW	88	TM9	3556 kW	59	TM6
TM6	9694 kW	161	TM5	2524 kW	84	TM9	3405 kW	56	TM5
TM7	10072 kW	167	TM8	2795kW	93	TM9	1890 kW	63	TM9
TM8	7540 kW	251	TM9	3900 kW	130	TM9	2615 kW	87	TM9
TM9	11576 kW	192	TM8	6296 kW	104	TM8	3890kW	64	TM8

Transformatör merkezleri güç değerleri tablosu incelendiğinde maksimum anlık gücün TM9’da 11576 kW değerindedir. Yüklenme oranı açısından baktığımızda en kötü durum TM8 merkezinin devre dışı kaldığı ve TM9’un yüklendiği durum. Bu durumda anlık maksimum güç yüklenmesi %251 seviyesindedir.

%150 yüklenme sınırı olan ortalama güç 1 dakika kısmında yüklenme oranı %84-%144 aralığındadır. Değerler izin verilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

Ortalama güç 2 saat kısmında yüklenme oranı%56-%87aralığındadır. Değerler sınırlar içerisinde. Transformatör ve doğrultucuların aşırı yük sınıfı VI olup, %150 yük altında 2 saat ve %300 yük altında 1 dakika çalışma kapasitesine sahip olması gerekmektedir.

Tablodaki değerler verilen yüklenme oranları ile incelendiğinde bir transformatör merkezinin devre dışı kalması durumunda 150 saniye işletmenin sorunsuz şekilde yapılabileceği görülmektedir.

### 4.3 KOMşU OLMAYAN İKİ TRAF0 MERKEZİNİN DEVRE DIşI KALMASI

#### Transformatör Merkezleri Akım Değerleri:

Yük akış analizi bölümünde girdiğimiz elektrifikasyon değerleri ile anlık maksimum hat besleme ve geri dönüş akım değerleri elde edilmiştir. Devre dışı kalan transformatörler ve en fazla hangi transformatör merkezinde yüklenme maksimum ise ilgili transformatör merkezi akım değerleri alınmıştır.

**Tablo 4.7 :** 210 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri.

Transformatör Mirkz Devre Dışı	Maksimum Yüklü Transformatör	Besleme Hattı 2(A)	Besleme Hattı 1(A)	Geri Dönüş Hattı (A)	Besleme Hattı (A)	Besleme Hattı 3(A)	Geri Dönüş Hattı 1(A)
TM1&TM3	TM2	2924	3117	4119	2928	4167	4334
TM2&TM4	TM3	3729	2903	4917	2894	3991	4582
TM3&TM5	TM4	4014	2576	4463	3077	3624	4736
TM4&TM6	TM5	4139	2438	3693	3214	3172	4368
TM5&TM7	TM6	3764	2858	3932	3521	4059	3623
TM6&TM8	TM7	3415	3307	3796	2748	3867	3996
TM7&TM9	TM8	3478	2934	4769	2928	2915	4286

Tabloya baktığımızda anlık maksimum besleme akımı TM2 merkezinde 4167 A değerinde, geri dönüş akımının TM3 merkezinde 4917 A değerinde olduğu görülmektedir.

### **Transformatör Merkezleri Gerilim Değerleri:**

EN 50163 standartlarına göre 1500 V DC beslemeli sistemlerde minimum hat gerilimi 1000 V maksimum gerilim 1800 V olmalıdır. EN 50122-1:2011 standartlarına göre ray gerilimi sürekli durumlar için 120 V geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır.

**Tablo 4.8 :** 210 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri.

<b>Devre Dışı Transformatör Merkezi</b>	<b>Maksimum Hat Gerilimi</b>	<b>Minimum Hat Gerilimi</b>	<b>Maksimum Ray Gerilimi</b>
<b>TM1&amp;TM3</b>	1516	1357	120
<b>TM2&amp;TM4</b>	1501	1382	113
<b>TM3&amp;TM5</b>	1505	1377	118
<b>TM4&amp;TM6</b>	1498	1390	101
<b>TM5&amp;TM7</b>	1476	1416	114
<b>TM6&amp;TM8</b>	1492	1395	126
<b>TM7&amp;TM9</b>	1510	1284	124

Minimum hat gerilimi hat sonu olan TM7&TM9'un devre dışı kalması durumunda 1284 V' tur. Maksimum ray gerilimi ise TM6&TM8'un devre dışı kalması durumunda 126 V' tur. Minimum hat gerilimi için elde edilen değer 1284 V sınırlar dahilinde bulunmaktadır. Maksimum ray gerilimi 126 V ile TM6&TM8 transformatör merkezlerinin devre dışı kalması durumunda meydana gelmektedir.

EN 50122-1 standartlarında DC beslemeli raylı sistemlerde zamana bağlı maksimum ray gerilimi limitleri yer almaktadır. Bu standartlara göre sürekli halde ( $t > 300$  sn) 120 V geçmemesi, ( $1 \text{ sn} < t < 300$  sn) aralığında en fazla 150 V ile sınırlandırılmıştır. ( $t \leq 1$  sn) gibi çok kısa süreler için ise 160 V ile sınırlandırılmıştır.

Ray geriliminin 120 V üzerinde kalma süresi 4 saniye olduğundan dolayı minimum hat gerilimi ve maksimum ray gerilimi izin verilen sınırlar arasında kalmaktadır.

**Tablo 4.9** : EN 50122-1 DC ray gerilim sınırlamaları.

T(Saniye)	U <sub>max</sub> (Voltaj)
>300	120
300	150
1	160
0,9	165
0,8	170
0,7	175
0,6	180
0,5	190
0,4	205
0,3	220
0,2	245
0,1	285
0,05	325
0,02	370

**Transformatör Merkezleri Güç Değerleri:**

Komşu olmayan iki transformatör merkezinin devre dışı kalması senaryosunda TM1-TM9 arasından komşu olmayacak şekilde tüm merkezler devre dışı bırakılarak en fazla yüklenme ve en kötü durumlarda çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Yüklenme oranları güç talebinin nominal kurulu güce oranı ile bulunmuştur. Transformatör merkezleri 210 saniye işletme senaryosuna göre anlık, dakikalık ve saatlik olarak sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.10** : 210 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri.

Devre Dışı Transformatörler	Maksimum Güç (kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör	Ortalama Güç 1 Dakika(kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör	Ortalama Güç 2 Saat (kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör
TM1&TM3	12475 kW	207	TM2	7695 kW	127	TM2	5096 kW	84	TM2
TM2&TM4	13727 kW	228	TM3	3985 kW	132	TM1	5147 kW	85	TM3
TM3&TM5	13288 kW	221	TM4	8135 kW	135	TM4	4539 kW	75	TM4
TM4&TM6	11540 kW	192	TM5	6780 kW	113	TM5	4083 kW	68	TM5
TM5&TM7	5850 kW	195	TM9	6022 kW	100	TM4	3546 kW	59	TM4
TM6&TM8	8067 kW	268	TM9	3749 kW	125	TM9	2083 kW	69	TM9
TM7&TM9	12372 kW	206	TM8	6943 kW	115	TM8	4241 kW	70	TM8

Transformatör merkezleri güç değerleri tablosu incelendiğinde maksimum anlık gücün TM3’de 13727 kW değerindedir. Yüklenme oranı açısından baktığımızda en kötü durum TM6&TM8 merkezinin devre dışı kaldığı ve TM9’un yüklendiği durum. Bu durumda anlık maksimum güç yüklenmesi %268 seviyesindedir.

%150 yüklenme sınırı olan ortalama güç 1 Dakika kısmında yüklenme oranı %100-%135 aralığındadır. Değerler izin verilen sınırlar içerisinde kalmaktadır. Ortalama güç 2 saat kısmında yüklenme oranı %59-%85 aralığındadır. En kötü durum TM2&TM4 merkezlerinin

devre dışı kaldığı TM3'ün yüklendiği durum. Bu durumda maksimum güç yüklenmesi 5147 kW ile %85 yüklenme oranı ile gerçekleşmiştir. Değerler sınırlar içerisinde.

Tablodaki değerler verilen yüklenme oranları ile incelendiğinde komşu olmayan iki transformatör merkezinin devre dışı kalması senaryosunda tablodaki değerler elde edilmiştir. 210 saniye işletmenin sorunsuz şekilde yapılabileceği görülmektedir.

#### 4.4 KOMŞU İKİ TRAFİ MERKEZİNİN DEVRE DIŞI KALMASI

##### Transformatör Merkezleri Akım Değerleri:

Yük akış analizi bölümünde girdiğimiz elektrifikasyon değerleri ile anlık maksimum hat besleme ve geri dönüş akım değerleri elde edilmiştir.

**Tablo 4.11 :** 300 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri.

Transformatör Merkezi Devre Dışı	Maksimum Yüklü Transformatör	Besleme Hattı 2(A)	Besleme Hattı 1(A)	Geri Dönüş Hattı (A)	Besleme Hattı (A)	Besleme Hattı 3(A)	Geri Dönüş Hattı 1 (A)
TM1&TM2	TM3	4069	2162	3337	2949	2293	3674
TM2&TM3	TM4	4024	1559	3846	3207	2334	3668
TM3&TM4	TM5	3962	1763	3465	3460	2033	3283
TM4&TM5	TM6	3954	2258	3551	3854	2734	3487
TM5&TM6	TM4	2440	2838	4015	1519	3926	3725
TM6&TM7	TM8	3124	1579	2445	3369	2571	4006
TM7&TM8	TM6	2611	3125	2718	2008	3869	3126
TM8&TM9 (500 s)	TM7	2504	2940	2652	1734	2949	3008

Tabloya baktığımızda anlık maksimum besleme akımı TM3 merkezinde 4069 A değerinde, geri dönüş akımının TM4 merkezinde 4015 A değerinde olduğu görülmektedir.

### **Transformatör Merkezleri Gerilim Değerleri:**

EN 50163 standartlarına göre 1500 V DC beslemeli sistemlerde minimum hat gerilimi 1000 V maksimum gerilim 1800 V olmalıdır. EN 50122-1:2011 standartlarına göre ray gerilimi sürekli durumlar için 120 V geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır.

**Tablo 4.12 :** 300 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri.

Devre Dışı Transformatör Merkezi	Maksimum Hat Gerilimi	Minimum Hat Gerilimi	Maksimum Ray Gerilimi
TM1&TM2	1512	1247	141
TM2&TM3	1503	1356	129
TM3&TM4	1507	1371	132
TM4&TM5	1505	1376	117
TM5&TM6	1502	1397	105
TM6&TM7	1498	1402	102
TM7&TM8	1514	1374	128
TM8&TM9 (500 s)	1544	1256	124

Minimum hat gerilimi hat sonu olan TM1&TM2' nin devre dışı kalması durumunda 1247 V' tur. Maksimum ray gerilimi ise TM1&TM2' nin devre dışı kalması durumunda 141 V' tur. Minimum hat gerilimi için elde edilen değer 1247 V sınırlar dahilinde bulunmaktadır.

EN 50122-1 standartına göre sürekli halde ( $t > 300$  sn) 120 V geçmemesi, ( $1 \text{ sn} < t < 300$  sn) aralığında en fazla 150 V ile sınırlandırılmıştır. ( $t \leq 1 \text{ sn}$ ) gibi çok kısa süreler için ise 160 V ile sınırlandırılmıştır.

Ray geriliminin 120 V üzerinde kalma süresi 6 saniye olduğundan dolayı minimum hat gerilimi ve maksimum ray gerilimi izin verilen sınırlar arasında kalmaktadır.

### **Transformatör Merkezleri Güç Değerleri:**

Komşu olmayan iki transformatör merkezinin devre dışı kalması senaryosunda TM1-TM9 arasından komşu olmayacak şekilde tüm merkezler devre dışı bırakılarak en fazla yüklenme ve

en kötü durumlarda çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Transformatör merkezleri 300 saniye işletme senaryosuna göre anlık, dakikalık ve saatlik olarak sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.13** : 300 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri.

Devre Dışı Transformatörler	Maksimum Güç (kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör	Ortalama Güç 1 Dakika(kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör	Ortalama Güç 2 Saat (kW)	%(yüklenme oranı)	Maksimum Yüklü Transformatör
TM1&TM2	9733 kW	162	TM3	6388 kW	104	TM3	3659 kW	61	TM3
TM2&TM3	6575 kW	219	TM1	4410 kW	147	TM1	2510 kW	84	TM1
TM3&TM4	8951 kW	149	TM5	5591 kW	93	TM5	3247 kW	54	TM5
TM4&TM5	8544 kW	142	TM3	5547 kW	92	TM3	3329 kW	55	TM3
TM5&TM6	8683 kW	144	TM4	5677 kW	94	TM4	3257 kW	54	TM4
TM6&TM7	8797 kW	146	TM5	5358 kW	89	TM5	2927 kW	48	TM5
TM7&TM8	6315 kW	210	TM9	3907 kW	130	TM9	2537 kW	84	TM9
TM8&TM9 (500 s)	6497 kW	108	TM7	3604 kW	60	TM7	2237 kW	37	TM7

Yüklenme oranı açısından baktığımızda en kötü durum TM2&TM3 merkezinin devre dışı kaldığı ve TM1'in yüklendiği durum. Bu durumda anlık maksimum güç yüklenmesi %219 seviyesindedir.

Ortalama güç 2 saat kısmında yüklenme oranı%37-%84aralığındadır. Değerler sınırlar içerisindedir.

Tüm transformatör merkezlerinin devre dışı kalma durumları 300 saniye ile tren işletmesinin sağlanabileceği, TM8&TM9 hat sonu komşu transformatörlerin devre dışı kalması durumu 500 saniye ile işletmenin yapılması durumuna göre sonuçlar elde edilmiştir.

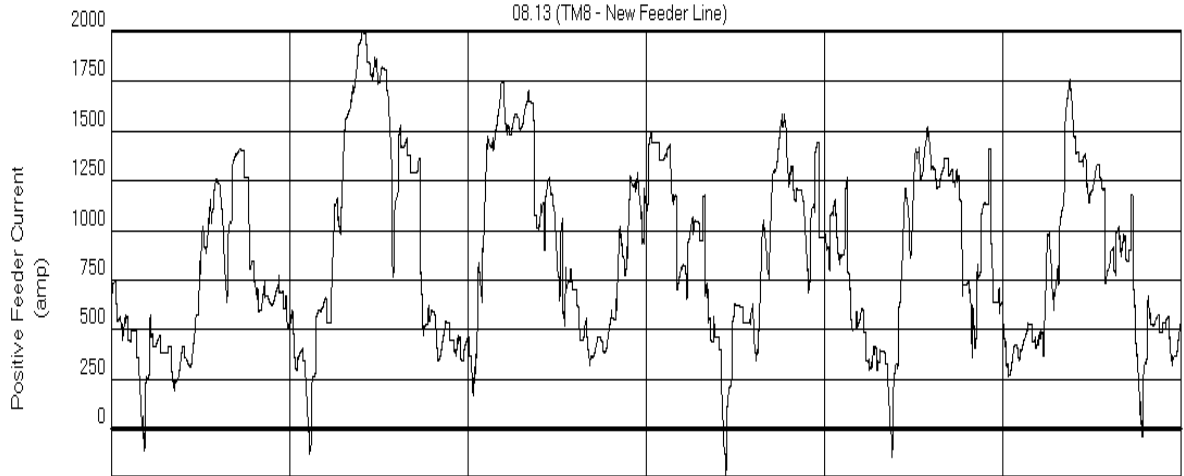
Tablodaki değerler verilen yüklenme oranları ile incelendiğinde komşu olmayan iki transformatör merkezinin devre dışı kalması senaryosunda tablodaki değerler elde edilmiştir 300 saniye süre ile işletmenin sorunsuz şekilde yapılabileceği görülmektedir.

#### 4.5 GÜNCEL İŞLETME SEFER SIKLIĞI DURUMU

M5 hattı güncel işletme sefer sıklığı yoğun saatlerde 270 saniyedir. Tüm transformatör merkezleri devrede iken 270 saniye sefer sıklığı ile simülasyon yapılmıştır.

##### Transformatör Merkezleri Akım Değerleri:

Yük akış analizi bölümünde girdiğimiz elektrifikasyon değerleri ile anlık maksimum hat besleme ve geri dönüş akım değerleri elde edilmiştir.



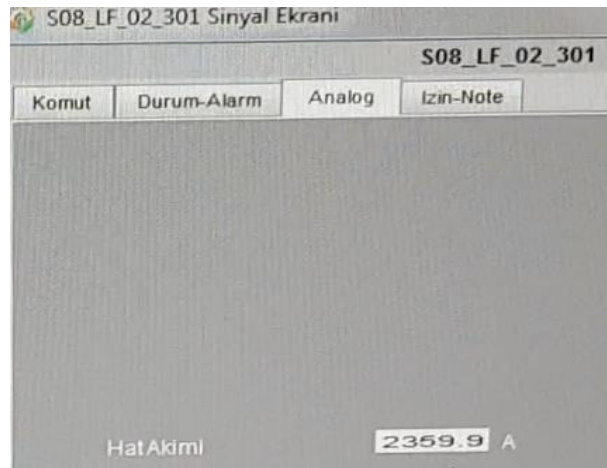
Şekil 4.2 : TM8 anlık maksimum akım grafiği çıktısı.

Besleme Hattı 2(A) ; Hat 2 TM1 yönü beslemesi, Besleme Hattı 1(A); Hat 1 TM1 yönü beslemesi, Geri Dönüş Hattı(A); Hat 2 geri dönüş hattı, Besleme Hattı(A); Hat 2 TM9 yönü beslemesi, Besleme Hattı 3(A); Hat 1 TM9 yönü beslemesi, Geri Dönüş Hattı 1(A); Hat1 geri dönüş hattını temsil eder.

**Tablo 4.14 :** 270 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri akım değerleri.

Transformatör	Besleme Hattı 2(A)	Besleme Hattı 1(A)	Geri Dönüş Hattı (A)	Besleme Hattı (A)	Besleme Hattı 3(A)	Geri Dönüş Hattı 1(A)
TM1	0	1534	1549	1236	0	2073
TM2	2124	1698	2769	2337	2421	2972
TM3	2126	2094	2056	1185	2681	2541
TM4	2342	1673	2045	1626	2504	2306
TM5	2603	1589	2327	1476	2218	1945
TM6	2246	1562	1886	1231	2564	1984
TM7	2075	1469	2247	1578	2437	2083
TM8	2490	2050	2477	2003	2491	2355
TM9	2732	0	2649	0	2592	2781

Tabloya baktığımızda anlık maksimum besleme akımı TM5 merkezinde 2603 A değerinde, geri dönüş akımının TM2 merkezinde 2972 A değerinde olduğu görülmektedir.

**Şekil 4.3 :** Maksimum hat akımı saha ölçümü.

Yapılan simülasyon çalışmasının doğruluk yüzdesinin karşılaştırılması için M5 hattı Çarşı İstasyonu (TM5) yoğun işletme sefer sıklığında saha verileri elde edilmiştir. Maksimum hat akım değeri(S08 LF-02) Çarşı istasyonu hat 2 TM1 tarafında meydana gelmiştir. Bizim simülasyon sonuç sütunumuzda besleme hattı 2(A) olan TM5 bölümüne denk gelmektedir. Saha ölçümlerine göre maksimum hat akımı değeri 2359.9 A olarak görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarına göre TM5 maksimum besleme hattı akım değeri 2603 A olarak bulunmuştur. Saha verileri ile karşılaştırıldığında yaklaşık %10'luk bir fark bulunmuştur. Bu fark rejeneratif frenleme etkisi, sinyalizasyon gibi parametreler girilmediğinden oluşmuştur. Simülasyonun çıktılarının gerçekliği konusunda kabul edilebilir bir farktır.

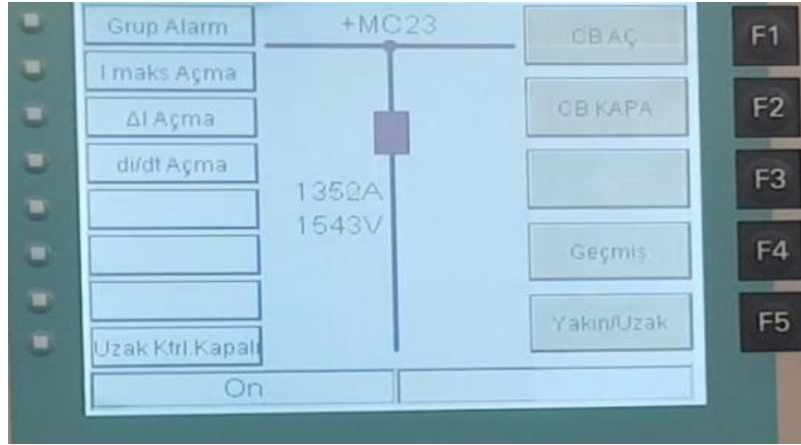
### **Transformatör Merkezleri Gerilim Değerleri:**

EN 50163 standartlarına göre 1500 V DC beslemeli sistemlerde minimum hat gerilimi 1000 V maksimum gerilim 1800 V olmalıdır. EN 50122-1:2011 standartlarına göre ray gerilimi sürekli durumlar için 120 V geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır.

**Tablo 4.15 :** 270 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri hat ve ray gerilim değerleri.

Transformatör Merkezi	Maksimum Hat Gerilimi	Minimum Hat Gerilimi	Maksimum Ray Gerilimi
TM1	1527	1470	91
TM2	1525	1470	91
TM3	1525	1471	90
TM4	1528	1468	92
TM5	1530	1470	90
TM6	1527	1472	90
TM7	1522	1470	93
TM8	1526	1474	91
TM9	1530	1462	95

Minimum hat gerilimi TM9'da 1462 V' tur. Ray gerilimi ise 95 V' tur. Elde edilen değerler yukarıda belirtilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.



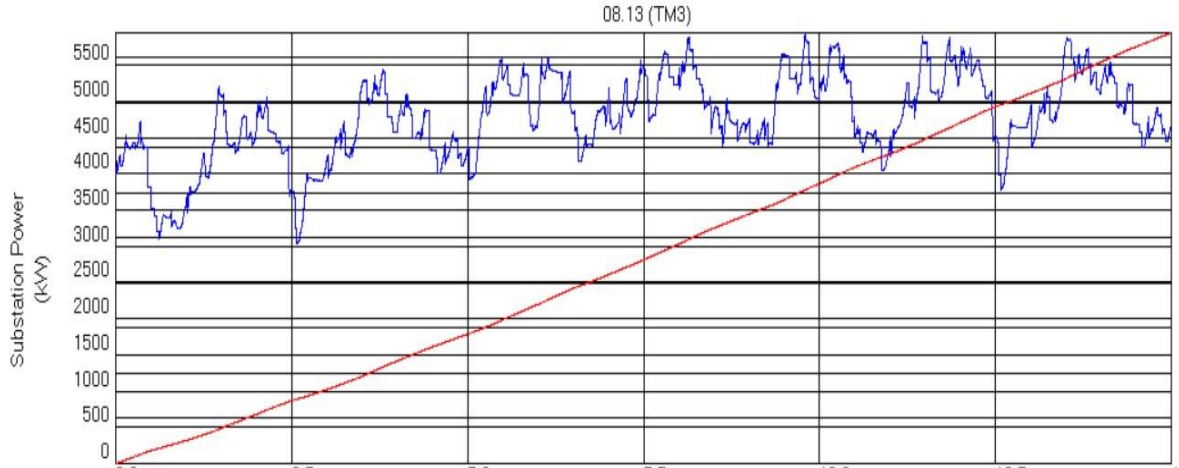
**Şekil 4.4 :** Minimum hat gerilimi saha ölçümü.

Yapılan simülasyon çalışmasının doğruluk yüzdesinin karşılaştırılması için M5 hattı Çarşı İstasyonu (TM5) yoğun işletme sefer sıklığında saha verileri elde edilmiştir. Hat gerilim değerleri için ölçümleri alındığında minimum gerilim değeri 1543 V olarak görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarına göre TM5 minimum hat gerilimi değerlerine göre 1470 V olarak bulunmuştur. Saha verileri ile karşılaştırıldığında yaklaşık %5'lik bir fark bulunmuştur. Bu fark simülasyonun verilerinin gerçekliği konusunda kabul edilebilir bir farktır.

#### **Transformatör Merkezleri Güç Değerleri:**

Yük akış analizi bölümünde transformatör merkezi oluşturma bölümünde doğrultucuların nominal kurulu güç değerlerini girerek TPC bölümünde girdiğimiz tren ve işletme senaryolarına göre tablodaki sonuçlar elde edilmiştir. Transformatör merkezleri 270 saniye işletme senaryosuna göre anlık, dakikalık ve saatlik olarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : TM3 maksimum güç grafiği çıktısı.

Tablo 4.16 : 270 s işletme durumu koşullarında transformatör merkezleri güç değerleri.

Transformatör	Maksimum Güç (kW)	%(yüklenme oranı)	Ortalama Güç 1 Dakika (kW)	%(yüklenme oranı)	Ortalama Güç 2 Saat (kW)	%(yüklenme oranı)
TM1	3203 kW	106	2188 kW	73	1800 kW	60
TM2	6210 kW	103	4621 kW	77	3000 kW	50
TM3	5985 kW	99	4972 kW	83	3267 kW	54
TM4	6034 kW	100	5222 kW	87	3379 kW	56
TM5	4082 kW	68	2991 kW	50	2004 kW	33
TM6	4003 kW	66	2555 kW	42	1976 kW	33
TM7	4256 kW	70	3004 kW	50	2153 kW	36
TM8	5584 kW	93	4609 kW	77	3451 kW	58
TM9	3766 kW	125	2666 kW	89	1922 kW	64

Verilen tabloda anlık maksimum gücün TM2 merkezinde 6.210 MW değeri ile gerçekleştiği görülmektedir fakat bu güç talebi çift doğrultucu ile sağlandığından dolayı yüklenme oranı %103'tür.

Ortalama güç 2 saatlik sonuçlarda 1922 kW seviyesinde %64 olarak yüklenmektedir. Yüklenme oranları güç taleplerinin nominal kurulu güce oranlanması ile hesaplanmıştır. Tablodaki değerler verilen yüklenme oranları ile incelendiğinde 270 saniye işletmenin sorunsuz şekilde yapılabileceği görülmektedir.



**Şekil 4.6 :** Maksimum anlık güç saha ölçümü.

Yapılan simülasyon çalışmasının doğruluk yüzdesinin karşılaştırılması için M5 hattı Çarşı İstasyonu (TM5) yoğun işletme sefer sıklığında saha verileri elde edilmiştir. Transformatör güç değerleri için ölçümleri alındığında 1 dakikalık maksimum değeri 3800 kW olarak görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarına göre TM5 maksimum güç değerlerine göre 4082 kW olarak bulunmuştur. Saha verileri ile karşılaştırıldığında yaklaşık %7'lik bir fark bulunmuştur. Bu fark simülasyonun verilerinin gerçekliği konusunda kabul edilebilir bir farktır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan simülasyon çalışmasında M5 (Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy) metro hattı elektrifikasyon yönünden çeşitli senaryolar uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.

M5 Hattı için belirlenen senaryolar referans alınarak; normal işletme durumu (120 saniye sefer sıklığı), bir transformatör merkezi devre dışı olma durumu (150 saniye sefer sıklığı), komşu olmayan iki transformatör merkezi devre dışı kalma durumu (210 saniye sefer sıklığı), Çekmeköy-Dudullu TM hariç komşu iki transformatör merkezi devre dışı kalma durumu (300 saniye sefer sıklığı) Çekmeköy-Dudullu TM devre dışı kalma durumu (500 saniye sefer sıklığı) ve güncel işletme senaryosu (270 saniye sefer sıklığı) olmak üzere 5 ayrı senaryo oluşturulmuştur.

M5 hattı OG(34.5 kV) sistemi Ayrılıkçeşme GIS, Ümraniye GIS, Dudullu GIS olmak üzere 3 ana beslemeden enerji almaktadır. Ayrılıkçeşme GIS(TM1-TM2-TM3), Ümraniye GIS(TM4-TM5-TM6), Dudullu GIS(TM7-TM8-TM9) transformatör merkezlerini enerjilendirmektedir. M5 Hattı toplam kurulu cer gücü 59.4 MVA' dır.

Sonuçlar neticesinde; M5 Hattı normal işletme (120 saniye sefer sıklığı) durumunda herhangi bir problem oluşmadan ilgili parametreler belirlenen sınırlar dâhilinde kalarak çalışmaktadır.

150 saniye (bir transformatör merkezinin komple devre dışı kalma) durumunda ilgili değerler belirlenen sınırlar içinde kalmasına karşın bu senaryoda herhangi bir transformatör merkezinin daha devre dışı kalması durumunda ray gerilimi belirlenen sınırlar dışında kalacağından uygulanması uygun değildir.

210 saniye (komşu olmayan transformatör merkezlerinin devre dışı kalması) durumunda ilgili değerler belirlenen sınırlar içindedir. Bu senaryoda devre dışı kalan transformatörler yan yana olmasa dahi devre dışı kalan üçüncü transformatör merkezinin de bu bölgede olması durumunda ray gerilim belirlenen sınırların üzerine çıkacağından uygulanması güvenli bir durum değildir.

Güncel işletme durumunda en yoğun saatlerde 270 saniye işletme durumu incelenmiştir. Bu durumda elde edilen değerler belirlenen sınırların oldukça altındadır. Yolcu sayısı ve işletme sefer sıklığı daha düşük olduğunda bazı transformatör merkezleri devre dışı bırakılarak işletme

devam ettirilebilir. Devre dışı bırakılacak transformatör merkezleri belirlenerek bu durumdaki ray gerilim değerleri de incelenerek değerlendirilmelidir.

Güncel işletme senaryosu (270 saniye) Çarşı istasyonu (TM5) için simülasyon verileri ve saha verileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre anlık güç değeri açısından %7'lik, minimum hat gerilimi açısından yaklaşık %5'lik, hat akımı açısından %10'luk fark meydana gelmiştir. Bu değerler arasındaki farklar kabul edilebilir düzeydedir. Saha sonuçları ile birlikte simülasyon verileri karşılaştırılmış ve simülasyonun gerçekliği ortaya konulmuştur.

Oluşturulan simülasyon sonuçları ve işletmenin yoğunluk durumu göz önünde bulundurularak, senaryolarda belirlenen transformatörler devre dışı bırakılarak işletme sürdürülebilir. Bu durum elektrik maliyetleri açısından büyük fayda sağlayacaktır. Fakat bu durum tasarım aşamasında transformatör sayısı azaltılarak kalıcı şekilde değil işletme yoğunluk durumuna göre ve arıza koşullarına bağlı olarak belirli dönemlerde uygulanmalıdır.

Simülasyon sonuçları neticesinde ilgili hattın çeşitli işletme senaryolarına göre transformatör merkezlerinin yüklenme durumları incelenmiş ve kritik yüklenme oranına sahip durumlar belirlenmiştir. Bununla beraber bundan sonraki çalışmalarda DC simülasyonun yanı sıra rejeneratif enerji, sinyalizasyon ve OG simülasyonları ile birlikte inceleme yapılması planlanmaktadır. Böylece sadece transformatör yüklenme durumları değil kablo yüklenme oranları ve rejeneratif frenleme ile elde edilecek kazanımlar incelenebilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Açıkbş S., Söylemez M.T., Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, Computers in Railways IX, WIT Press, Boston, ISBN: 1-85312-715-9, pp 941- 950, 2004.
- [2] Karakuş, F, Yumurtacı, R. (2018), Raylı Sistemlerde Orta Gerilim Elektrifikasyon Sisteminin Modellenmesi ve Besleme Senaryolarının Belirlenmesi . EMO Bilimsel Dergi ,8 (1) , 41-48 .
- [3] Güzeller, E., Akçay, M. T., Albayrak, B. B., Kocaarslan, İ., Ersoy, A., & Tiryaki, H. 1500 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Hattı Trafo Yerleşiminin Optimizasyonu Ve Sultangazi-Arnautköy Hattına Uygulanması, 2017.
- [4] S.K. Chen, T.K. Ho Ve B.H. Mao., (2007), " Reliability Evaluations Of Railway Power Supplies By Fault-Tree Analysis" IET Electr. Power Appl., 1(2):161–172.
- [5] Mario A. Ríos Ve Gustavo Ramos, (2012), " Power System Modelling For Urban Massive Transportation Systems", Infrastructure Design, Signalling And Security İn Railway, 179-202.
- [6] Keskin, D., (2013), Kent İçi Raylı Sistemlerde Elektromekanik Sistemler Yatırım Maliyetleri, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- [7] European Commission "Roadmap to a single European transport area – towards a competitive and resource efficient transport system" <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>, 26 Mayıs 2016.
- [8] Aydın, T., (2013), Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesinde Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Kara, H., (2016), Enerji Tüketim Bazlı AHP Yöntemi İle Raylı Sistem Güzergah Seçimi Ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] <https://www.izmirmetro.com.tr/Haberler/439> , 20 Haziran 2020.
- [11] Ulusoy, A., (2010), Ulaşımında Raylı Sistemler Ve KAYSERAY, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [12] <https://www.railjournal.com/regions/asia/china-to-build-high-speed-maglev-test-line/> , 23 Ocak 2020.
- [13] <https://www.railway-technology.com/news/bombardier-led-consortium-signs-cairo-monorail-contract/> ,10 Ağustos 2020.
- [14] Milli Eğitim Bakanlığı MEGEP, (2006), ‘‘Raylı Sistem Teknolojisi’’, Ankara.

- [15] Liu, S., Cao, F., Xun, J. Ve Wang, Y., (2015). "Energy-Efficient Operation Of Single Train Based On The Control Strategy Of ATO", IEEE 18th International Conference On Intelligent Transportation Systems, 15-18 September 2015, Las Palmas.
- [16] Albert, H., Levin, C., Vietrosa, E. Ve Witte, G., (1995). "Reducing Energy Consumption İn Underground Systems". International Metropolitan Railways Comitte, UITP, Eylül, 1995.
- [17] Açıkbaş, S. (2008), Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Keskin, İ., (2013), Raylı Sistemlerde Yol Tasarımının Enerji Tüketimi Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Baran, S, (2008), Şehir İçi Raylı Sistem İşletiminde Rejenaratif Frenleme Enerjisinin Kullanımı Ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] <https://aktif.net/tr/Aktif-Blog/Teknik-Makaleler/OG-Hucrelerin-Siniflandirma-Kriterleri>, 24 Temmuz 2020.
- [21] Omokhafa J. T Ve Ambafi G. J., (2011), Reliability Study Of Electric Circuit Breakers, Innovations İn Science And Engineering, (1):104-114.
- [22] Farran J.I., 2005, Implementation Of A Pioneering Light Rail System İn Bordeaux
- [23] Gonzalez-Gil, A., Palacin, R., Batty, P. Ve Powell, J.P. (2014), "A System Aproach To Reduce Urban Rail Energy Consumption", Energy Conversion And Management, 80: 509-524.
- [24] International Union of Railways (UIC), <http://www.railway-energy.org>, 5 Kasım 2017.
- [25] Gonzalez-Gil, A., Palacin, R. ve Batty, P., (2013), "Sustainable urban rail systems Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy", Energy Convers Manage, 75: 374-88.
- [26] Albrecht, T., (2004), "Reducing Power Peaks And Energy Consumption İn Rail Transit Systems By Simultaneous Train Running Time Control", Computers İn Railways IX, WIT Press, 74: 885-894.
- [27] Tural, B , Turan, M . (2020), Tren Frenleme Enerjisinin Maksimum Geri Kazanımı İçin Zaman-Planı Optimizasyonu . Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 1-9 . DOI: 10.31590/Ejosat.778644
- [28] Brisset, S. ve Gillon, F., (2015), "Improving Energy Efficiency in Railway Powertrains", 169-181.
- [29] Vazquez, S., Lukic, SM., Galvan, E., Franquelo, LG. ve Carrasco, JM., (2010), "Energy storage systems for transport and grid applciatons", IEEE Trans Ind Elextron, 17: 3881-3895.

- [30] Kadhim, R., (2009), "Energy storage systems for rail applications", Rail Safety and Standards Board (RSSB), October 2010, London.
- [31] Deutsche Bahn AG, (2003), "Evaluation of energy efficiency technologies for Rolling stock and train operation of railways", 5 Mart 2003, Berlin.
- [32] Thong, m., Ho, M. ve Siow, P.S., (2006), "Energy Conservation Measures for Rapid Transit Systems in Singapore", IPEC International Power Engineering Conference, 29 November-2 December 2005, Singapore.
- [33] Mellitt, B., Mouneimme, Z.S. ve Goodman, C.J., ( "Simulation Study of DC Transit Systems with Inverting Substations", IEE Proceedings B, Electric Power Applications, 131: 38-50.
- [34] Ankara Üniversitesi Süper İletken Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Enerji Sektörü ve Süper İletkenlik Uygulamaları, <http://cesur.ankara.edu.tr/superiletkenlik-hakkinda/superiletkenlik-uygulamalari/enerji-sektoru-ve-superiletkenlik-uygulamalari/>, 01 Ocak 2018.
- [35] Honjo, S., Mimura, T., Kitoh, Y., Noguchi, Y., Masuda, T., Yumura, H., Watanabe, M., Ikeuchi, M., Yaguchi, H. ve Hara, T., (2011), "Status of superconducting cable demonstration project in Japan", IEEE Trans. Appl. Supercond, 21: 967-971.
- [36] Romo, A. ve Ibaiondo, H., (2010), "Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid", 9th World congress on railway research, 6-8 September 2010, Ohrid.
- [37] Cornic, D., (2010), "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation", 9th World congress on railway research, 19-21 October 2010, Bologna.
- [38] Jyh-Cherng, Jong. Ve En-Fu, Chang., (2005), "models for estimating energy consumption of electric trains", Journal of Society of Transportation Studies, 6: 278-291.
- [39] Zhang, W. ve Wei, J., (2012), "The experimental research on Beijing subway air-conditioning system energy-saving", Applied Mechanics and Materials, 170: 2494–2498.
- [40] <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/Hatdetay?Hat=M5> , 20 Haziran 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Pertev Caner ŞAHİN
Doğum Yeri	Muğla
Doğum Tarihi	22.10.1992
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
E-Posta Adresi	pertevcanersahin74@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	