T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI

AHMET YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ OKTAY ARIKAN

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI

Ahmet YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 13/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ARIKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ARIKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Altuğ BOZKURT

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim GÜNEŞ

İstanbul Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında ve akademik hayatımın her aşamasında benden yardımını hiç bir zaman esirgemeyen, destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi. Oktay ARIKAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yine tez çalışması süresince kendisinden destek gördüğüm Ayhan Koyun, Kerim Çolak, Furkan Karakuş, Ender Güzeller, İsmail Adıyıl ve Selehattin Harmandar'a değerli katkıları için teşekkür ederim.

Ayrıca her türlü desteklerinden dolayı değerli mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana destek olan, yaptığım tüm çalışmalarda varlıklarını hissettiğim, eğitim ve öğretimime önem veren çok değerli ve kıymettar rahmetli babaannem Şerife Yıldız başta olmak üzere annem Zeliha Yıldız, babam Talip Yıldız ve tüm aileme teşekkürü borç bilirim.

Haziran, 2018

Ahmet YILDIZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2
1.1.1 Enerji Depolama Sistemlerine Ait Literatür İncelemesi 2
1.1.2 Sürüş Tekniklerine Yönelik Literatür İncelemesi 5
1.1.3 Optimize Edilmiş Trenler Arası Süre (TAS) ve Hız Yönetimine Yönelik Literatür İncelemesi 7
1.1.4 Enerji Verimli Cer Sistemine Yönelik Literatür İncelemesi 8
1.1.5 Yardımcı Tesislerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Literatür İncelemesi 13
1.2 Tezin Amacı 16
1.3 Hipotez 17

BÖLÜM 2

ŞEHİR İÇİ RAYLI SİSTEM TÜRLERİ VE ELEKTRİKSEL ALTYAPI 18

2.1 Şehir İçi Raylı Sistem Türleri 18
2.1.1 Metro 19
2.1.2 Hafif Metro 19
2.1.3 Hafif Raylı Sistem 20
2.1.4 Tramvay 20
2.1.5 Banliyö 21
2.1.6 Maglev Trenler (Magnetic Levitation Trains) 22

2.1.7 TOS (Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler) 22
2.2 Raylı Sistemlerde Temel Yapılar 23
2.2.1 Raylı Sistem Elektrifikasyonu 23
2.2.1.1 Güç (Transformatör) Merkezleri 24
2.2.1.2 Havai Katener Sistemi 29
2.2.1.3 Sinyalizasyon ve Haberleşme 32
2.2.1.4 Üçüncü Ray Sistemleri 34
2.2.2 Demiryolu Alt Yapısı 35

BÖLÜM 3

RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ 37

3.1 Frenleme Enerjisinin Geri Kazanılması 37
3.2 Enerji Depolama Sistemleri 38
3.3 Enerji Tasarruflu Sürüş 39
3.4 Trenler Arası Süre (TAS) Yönetimi 40
3.5 Optimize Edilmiş Tren Hız Yönetimi 40
3.6 Enerji Verimli Cer Sistemi 41
3.6.1 Süper İletken Kablo İle Enerji İletimine Dayalı Enerji Verimliliği 42
3.6.2 Araç Kütle Azaltımı 42
3.6.3 Katener Sistemlerinin Paralellenmesi 43
3.6.4 Tersinir Cer Trafoları 43
3.6.5 Yüksek Gerilim DC İle Enerji İletimi 44
3.6.6 Yardımcı Tesisler Tarafı Enerji Tasarruf Yaklaşımları 44

BÖLÜM 4

SİSTEM TANITIMI 46

4.1 M1 Hattı Tanıtımı 47
4.1.1 $M1_A$ Yenikapı-Atatürk Havalimanı Hattı Tanıtımı 50
4.1.1.1 İstasyonlar 51
4.1.1.2 Hizmete Açılış Tarihleri 51
4.1.1.3 İşletme Bilgileri 51
4.1.1.4 İstasyon Yapıları 52
4.1.2 $M1_B$ Hattı Tanıtımı 52
4.1.2.1 İstasyonlar 53
4.1.2.2 Hizmete Açılış Tarihleri 53
4.1.2.3 İstasyon Yapıları 53
4.1.3 Elektrifikasyon Sistemi 54
4.1.4 Transformatör Merkezleri 55
4.2 M5 Hattı Tanıtımı 57
4.2.1 M5 Hattı İstasyonları 60
4.2.2 M5 Hattı Hizmete Açılış Tarihleri 60
4.2.3 M5 Hattı İşletme Bilgileri 60
4.2.4 M5 Hattı İstasyon Yapıları 61

BÖLÜM 5

MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMASI 62

5.1 M1 Hattı Modelleme ve Analiz Çalışmaları 63
5.1.1 Senaryo 1: Katener Hatlarının Paralellenmesi (Jumper-Atlama Kabloları) 63
5.1.1.1 Güç Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi 64
5.1.1.2 Çekilen Akım Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi 71
5.1.1.3 Paralellemenin Hat Gerilimi (Trenin Pantografının Ucundan Okunan Gerilim) Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 76
5.1.2 Senaryo 2: Trenin Toplam Kütle Artışının Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi 77
5.1.3 Maliyet Analizi 80
5.2 M5 Hattı Modelleme ve Analiz Çalışmaları 83
5.2.1 ETAP Yazılımında Model Oluşturulması 83
5.2.1.1 Orta Gerilim Kabloların Modellenmesi 84
5.2.1.2 Cer Transformatörlerinin Modellenmesi 85
5.2.1.3 İç İhtiyaç Transformatörlerinin Modellenmesi 88
5.2.2 Analiz Çalışmaları 91
5.2.2.1 Durum-1: Maksimum Yüklenme 92
5.2.2.1.1 Senaryo-1: Mevcut Durum 92
5.2.2.1.2 Senaryo-2: Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum 94
5.2.2.1.3 Senaryo-3: Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum 95
5.2.2.1.4 Senaryo-4: 3x(1x240) mm^2 Kablo Yerine 3x(1x95) mm^2 Kablo Kullanılması Durumu 98
5.2.2.1.5 Karşılaştırma 99
5.2.2.2 Durum-2: Ortalama Yüklenme 100
5.2.2.2.1 Senaryo-1: Mevcut Durum 100
5.2.2.2.2 Senaryo-2: Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum 101
5.2.2.2.3 Senaryo-3: Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum 103
5.2.2.2.4 Senaryo-4: 3x(1x240) MM2 Kablo Yerine 3x(1x95) MM2 Kablo Kullanılması Durumu 105
5.2.2.2.5 Karşılaştırma 105
5.2.2.3 Durum-3: Gerçek Ortalama Yüklenme 107
5.2.2.3.1 Senaryo-1: Mevcut Durum 107
5.2.2.3.2 Senaryo-2: Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum 108
5.2.2.3.3 Senaryo-3: Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum 110
5.2.2.3.4 Senaryo-4: 3x(1x240) mm^2 Kablo Yerine 3x(1x95) mm^2 Kablo Kullanılması Durumu 112
5.2.2.3.5 Karşılaştırma 113
5.2.3 Maliyet Analizi 114
5.2.3.1 Maksimum Yüklenme Durumunda Maliyet Analizi 114

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 118

KAYNAKLAR

EK-A

M1A-M1B HATTI ELEKTRİFİKASYON SİSTEMİ……126

EK-B

M5 HATTI ETAP MODELİ……133

ÖZGEÇMİŞ 137

SİMGE LİSTESİ

CO_2	Karbondioksit
I	Akım
P_k	Kayıp güç
R	Direnç

KISALTMA LİSTESİ

A	Amper
ABS	Auxiliary Battery Substation (Yardımcı Akülü Transformatör Merkezi)
AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
AG	Alçak Gerilim
ARDM	Acceleration Rate Decided Modification
ATC	Automatic Train Control (Otomatik Tren Kontrolü)
ATO	Automatic Train Operation (Otomatik Tren Operasyonu)
DASs	Driving Advice Systems (Sürüş Tavsiye Sistemleri)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DDM	Distance Dediced Modification
Dk	Dakika
EDLYC	Electrochemical Double Layer Capacitor (Elektrokimyasal Çift Katmanlı Kapasitör)
EDS	Enerji Depolama Sistemleri
ETAP	Electrical Power System Analysis & Operation Software
FESS	Flywheel Energy Storage Systems (Volanlı Enerji Depolama Sistemleri)
FW	FlyWheel (Volan)
HVAC	Heating, Ventilating, Air Conditioning, Cooling (Isıtıma, Havalandırma, İklimlenirme, Soğutma)
HVDC	High Voltage Direct Current (Yüksek Doğru Gerilim)
HT	Headway Time (Trenler Arası Süre)
HTS	High Temperature Superconducting (Yüksek Sıcaklıklı Süperiletken)
Hz	Hertz
Km	Kilometre
kV	Kilovolt
kWh	Kilowatt saat
kW	Kilowatt
LFA	Load Flow Analysis (Yük Akış Analizi)
LRT	Light Rail Transit (Hafif Raylı Ulaşım)
LV	Low Voltage (Alçak Gerilim)
m	metre
Maglev	Magnetic Levitation Trains
MV	Medium Voltage (Orta Gerilim)
MW	Megawatt
OCS	Overhead Catenary System (Havai Katener Sistemi)
OG	Orta Gerilim

RMS	Root Mean Square (Ortalama Karekök)
Sa	Saat
SFES	Superconducting Flywheel Energy Storage (Süperiletken Volanlı Enerji Depolama)
SMB	Superconducting Magnetic Bearing (Süperiletken Manyetik Yatak)
SI	Section Isolator (Bölüm İzolatörü)
SIL	Safety Integrity Level (Güvenlik Bütünlüğü Seviyesi)
Sn	Saniye
SoC	State of Charge (Şarj Durumu)
SRM	Switched Reluctance Machine (Anahtarlı Relüktans Motoru)
TAS	Trenler Arası Süre
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TM	Trafo Merkezi
TOS	Tam Otomatik Sürücüsüz Sistem
TPC	Train Performance Calculator (Tren Performans Hesaplayıcısı)
TS	Tabu Search
UIC	International Union of Railways (Uluslararası Demiryolu Birliği)
UITP	International Public Transport Association (Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği)
V	Volt
VEDS	Volanlı Enerji Depolama Sistemleri
W	Watt
Wh	Watt saat

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Londra metrosunun yardımcı tesisler enerji dağılımı [1] 14
Şekil 1. 2 İstanbul metrosu m4 hattı Kadıköy istasyonu yardımcı servisler güç tüketim değerleri 14
Şekil 1. 3 İstanbul metrosu m4 hattı Bostancı istasyonu yardımcı servisler güç tüketim değerleri 15
Şekil 2. 1 Kadıköy-Kartal metro hattı (1500 V DC besleme) 19
Şekil 2. 2 Hafif metro hattı (İstanbul) 20
Şekil 2. 3 Tramvay (İstanbul) 21
Şekil 2. 4 Banliyö hattı (İstanbul-Pendik) 21
Şekil 2. 5 Maglev tren (Almanya) 22
Şekil 2. 6 Sürücüsüz tren 23
Şekil 2. 7 Transformatör merkezi ekipmanları [44] 27
Şekil 2. 8 Katener sistemi besleme tek hat şeması [46] 28
Şekil 2. 9 Katener sistemi ekipmanları [46] 32
Şekil 2. 10 Üçüncü ray sistemi 35
Şekil 4. 1 $M1_A$-$M1_B$ hattı istasyon şeması 47
Şekil 4. 2 $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması 48
Şekil 4. 2 $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması (devamı) 49
Şekil 4. 2 $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması (devamı) 50
Şekil 4. 3 Raylı sistem elektrifikasyon örneği [44] 54
Şekil 4. 4 $M1_A$ - $M1_B$ hattı orta gerilim sisteminin basitleştirilmiş diyagramı [44] 55
Şekil 4. 5 Enerji besleme diyagramı 56
Şekil 4. 6 M5 Hattı basitleştirilmiş tek hat şeması 58
Şekil 4. 6 M5 hattı basitleştirilmiş tek hat şeması (devamı) 59
Şekil 4. 7 M5 hattı istasyon şeması 60
Şekil 5. 1 240 mm^2 kablo ETAP modeli 84
Şekil 5. 2 95 mm^2 kablo ETAP modeli 84
Şekil 5. 3 3,3 MVA Cer transformatör ETAP modeli 85
Şekil 5. 4 3300 kVA cer transformatör ETAP programı empedans bilgisi 86
Şekil 5. 5 2400 kVA cer transformatör ETAP programı empedans bilgisi 87
Şekil 5. 6 2,4 MVA Cer transformatörü ETAP modeli 88
Şekil 5. 7 2 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri 90
Şekil 5. 8 1,6 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri 90
Şekil 5. 9 1 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri 91
Şekil 5. 10 0,63 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri 91

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Örnek raylı sistem projeleri 24
Çizelge 2.2 Raylı sistem elektrifikasyonu gerilim seviyeleri 25
Çizelge 4.1 Transformatör merkezi kurulu güç bilgisi 56
Çizelge 5.1 Tren bileşimi verileri 64
Çizelge 5.2 Aksaray TM güç çıkış sonuçları 64
Çizelge 5.3 Bağcılar TM güç çıkış sonuçları 65
Çizelge 5.4 Bahçelievler TM güç çıkış sonuçları 66
Çizelge 5.5 Belpa TM güç çıkış sonuçları 66
Çizelge 5.6 DTM TM güç çıkış sonuçları 66
Çizelge 5.7 Kirazlı TM güç çıkış sonuçları 67
Çizelge 5.8 Menderes TM güç çıkış sonuçları 67
Çizelge 5.9 Mimarsinan TM güç çıkış sonuçları 68
Çizelge 5.10 Otogar TM güç çıkış sonuçları 68
Çizelge 5.11 Sağmalcılar TM güç çıkış sonuçları 69
Çizelge 5.12 Ulubatlı TM güç çıkış sonuçları 69
Çizelge 5.13 Yenikapı TM güç çıkış sonuçları 70
Çizelge 2.14 Tüm TM'lerin RMS güç değerleri toplamı sonuçları 70
Çizelge 5.15 Aksaray TM akım çıkışı sonuçları 71
Çizelge 5.16 Bağcılar TM akım çıkışı sonuçları 71
Çizelge 5.17 Bahçelievler TM akım çıkışı sonuçları 72
Çizelge 5.18 Belpa TM akım çıkışı sonuçları 72
Çizelge 5.19 DTM TM akım çıkış sonuçları 73
Çizelge 5.20 Kirazlı TM akım çıkışı sonuçları 73
Çizelge 5.21 Menderes TM akım çıkışı sonuçları 74
Çizelge 5.22 Mimarsinan TM akım çıkışı sonuçları 74
Çizelge 5.23 Otogar TM akım çıkışı sonuçları 75
Çizelge 5.24 Sağmalcılar TM akım çıkışı sonuçları 75
Çizelge 5.25 Ulubatlı TM akım çıkışı sonuçları 75
Çizelge 5.26 Yenikapı TM akım çıkışı sonuçları 76
Çizelge 5.27 Tren pantografının ucundan okunan minmum gerilim değerleri 77
Çizelge 5.28 Tren kütle artışının enerji tüketimine etkisi 78
Çizelge 5.29 kWh / kişi başına enerji tüketim değerleri 79
Çizelge 5.30 Wh / kişi*km başına enerji tüketim değerleri 80
Çizelge 5.31 1x120 mm^2 bakır kablo fiyatı 80

Çizelge 5.32 Paralelleme kablosu adetleri 80
Çizelge 5.33 Paralelleme kablosu kurulum maliyeti 81
Çizelge 5.34 Paralelleme kablosu kurulum maliyeti 82
Çizelge 5.35 Siemens 3300 kVA cer transformatör etiket bilgisi 85
Çizelge 5.36 2400 kVA cer transformatör etiket bilgisi 88
Çizelge 5.37 2000 kVA cer transformatör etiket bilgisi 89
Çizelge 5.38 1600 kVA cer transformatör etiket bilgisi 89
Çizelge 5.39 1000 kVA cer transformatör etiket bilgisi 89
Çizelge 5.40 630 kVA cer transformatör etiket bilgisi 90
Çizelge 5.41 Maksimum yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları 92
Çizelge 5.42 Maksimum yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 93
Çizelge 5.43 Maksimum yüklenme altında transformatör sayısının düşürüldüğü durum için transformatör kayıpları 94
Çizelge 5.44 Maksimum yüklenme altında transformatör sayısının düşürüldüğü durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 95
Çizelge 5.45 Mevcut ve güçleri düşürülmüş yeni transformatörler 96
Çizelge 5.46 Maksimum yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için transformatör kayıpları 96
Çizelge 5.47 Maksimum yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 97
Çizelge 5.48 Maksimum yüklenme altında mevcut durum için 95 mm^2 CU kablo kayıpları 98
Çizelge 5.49 Maksimum yüklenme altında uygulanan senaryolarda toplam kayıplar 98
Çizelge 5.50 Maksimum yüklenme altında 240 mm^2 kesitli kablo ile 95 mm^2 kesitli kabloların toplam kayıpları 99
Çizelge 5.51 Ortalama yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları 100
Çizelge 5.52 Ortalama yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 101
Çizelge 5.53 Ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için transformatör kayıpları 102
Çizelge 5.54 Ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 102
Çizelge 5.55 Ortalama yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için transformatör kayıpları 103
Çizelge 5.56 Ortalama yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 104
Çizelge 5.57 Ortalama yüklenme altında mevcut durum için 95 mm^2 cu kablo kayıpları 105
Çizelge 5.58 Ortalama yüklenme altında uygulanan senaryolarda toplam kayıplar 106
Çizelge 5.59 Ortalama yüklenme altında 240 mm^2 kesitli kablo ile 95 mm^2 kesitli kabloların toplam kayıpları 107
Çizelge 5.60 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları 107

Çizelge 5.61 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 108
Çizelge 5.62 Gerçek ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için transformatör kayıpları 109
Çizelge 5.63 Gerçek ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 110
Çizelge 5.64 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları 111
Çizelge 5.65 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları 112
Çizelge 5.66 Gerçek Ortalama yüklenme altında mevcut durum için 95 mm^2 CU kablo kayıpları 113
Çizelge 5.67 Gerçek ortalama yüklenme altında uygulanan senaryolarda toplam kayıplar 113
Çizelge 5.68 Gerçek ortalama yüklenme altında 240 mm^2 kesitli kablo ile 95 mm^2 kesitli kabloların toplam kayıpları 114
Çizelge 5.69 Transformatör maliyetleri 115
Çizelge 5.70 Transformatör maliyet karşılaştırmaları 116
Çizelge 5.71 M5 hattı baralar arası 240 mm^2 OG kablo uzunlukları 117
Çizelge 5.72 240 mm^2 CU kablo maliyetleri 117

ÖZET

RAYLI SİSTEMLERDE ELEKTRİKSEL ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI

Ahmet YILDIZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Oktay ARIKAN

Enerji verimliliği kavramı, işletmedeki verimi, kaliteyi ve sürekliliği düşürmeden kullanılan enerji miktarının en aza indirilmesi olarak tanımlanabilir.

İlk yatırım maliyetleri son derece yüksek olan raylı ulaşım sistemlerinin en önemli giderlerinden birisi de enerji tüketim maliyetleridir. Bundan dolayı, enerjinin etkin şekilde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Raylı sistemlerde elektrik güç talebi ve enerji tüketimi sabit olmayıp; zamana, ağ içinde çalışan trenlere, yolcu sayısına ve işletim sistemlerine bağlı olarak sürekli değişmektedir. Raylı sistemi oluşturan tüm alt sistemlerin etkileşimleri karmaşık olduğundan enerji tüketimlerini öngörmek ve değerlendirmek zordur. Bu nedenle enerji verimliliğini iyileştirmek, detaylı çalışmaların yapılması, uygun yöntemlerin kullanılması ve elde edilen sonuçların hassas analizlerinin gerçekleştirilmesi ile mümkün olabilmektedir.

Dünya üzerindeki büyük kentlerde önemli problem oluşturan ve yaşam kalitesini düşüren trafik kriterleri, fosil yakıtlardan kaynaklanan çevre kirliliği ve ekonomik sorunlar raylı ulaşım sistemlerinin toplu taşımacılıktaki payının giderek artmasına yol açmaktadır. Ancak, raylı sistem ağlarının enerji tüketimlerinin büyüklüğü ve bunun olabildiğince verimli kullanılması ihtiyacı ayrı bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkemiz açısından değerlendirildiğinde İstanbul, nüfus, kentiçi raylı ulaşım sistemi ve enerji tüketimi açısından önemli bir merkez olarak karşımıza çıkmaktadır. Şuan 149 kilometre uzunluğa sahip İstanbul raylı toplu taşıma sistemi, yılda yaklaşık 300 milyon kWh enerji tüketmektedir. Tüketilen enerji dağılımları tramvay ve metro hatlarında farklılık göstermektedir. Örneğin, metro hatlarında tüketilen enerjinin %45'i trenlerin hareket etmesi için kullanılırken %55'i iç ihtiyaç için kullanılmaktadır. Tramvay gibi yer üstünde giden raylı ulaşım sistemleri için ise bu oran %95'i trenler, %5 iç ihtiyaç olarak

kullanılır. Hızla inşaatı devam eden raylı sistemlerle birlikte İstanbul, 2023 sonrası nihai hedefte pek çok yeni hattı bitirmeyi planlamaktadır. Bunlarla birlikte, hat uzunluğunun 1000 kilometreye yaklaşması beklenmektedir. Bu nedenle, raylı sistemlerde enerji tasarrufu çalışmaları çok büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında kent içi raylı sistemlerde cer ve sabit tesisler enerji tüketimine etki eden genel hususlar verilecektir. Ardından model olarak seçilen M1 hattı, RAILSIM programı üzerinde modellenerek DC yük akış analizleri gerçekleştirilecektir. Bu hat için enerji verimliliğinin artırılması üzerine simülasyon çalışmaları yapılacaktır. Devamında ise M5 hattı, ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) üzerinde modellenerek OG (Orta Gerilim) ve AG (Alçak Gerilim) tarafı yük akışları, trafo ve kablo yüklenmeleri ile kayıpları incelenecektir. Çeşitli işletme senaryoları simülasyon üzerinde tekrarlanarak hattın optimum çalışma senaryosu belirlenecektir.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistemler, enerji verimliliği, ETAP, RAILSIM, modelleme, DC yük akış analizi, AC yük akış analizi, enerji depolama sistemleri

ABSTRACT

INCREASING THE ELECTRICAL ENERGY EFFICIENCY IN RAIL SYSTEMS

Ahmet YILDIZ

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Asst. Assoc. Dr. Oktay ARIKAN

The concept of energy efficiency can be defined as the reduction of the amount of energy used without decreasing utility, quality and continuity in operation.

One of the most important expenses of railway transportation systems, where the initial investment costs are extremely high, is the energy consumption costs. Therefore, the efficient use of energy is of great importance. Electric power demand and energy consumption in rail systems are changing depending on time, network, trains, number of passengers and operating systems. Since the interactions of all subsystems that make up the rail system are complex, it is difficult to predict and evaluate energy consumption. For this reason, it is possible to improve energy efficiency by carrying out detailed studies, using appropriate methods and performing precise analysis of the results obtained.

Traffic criteria, environmental pollution caused by fossil fuels and economic problems those cause significant problems in big cities and decrease the quality of life lead to the increasing percentage of rail transit systems in public transportation. However, the magnitude of the energy consumption of rail system networks and the need to use it as efficiently as possible is an another problem.

When evaluated from the point of our country, Istanbul is an important center in terms of population, urban rail transport systems and energy consumption. Istanbul urban rail public transport system, which is approximately 149 kilometers long, consumes nearly 300 million kWh energy annually. Consumed energy distributions vary on tram and subway lines. For example, 55% of the energy consumed on subway lines is used for trains to move, while 45% is used for internal needs. For rail systems such as trams, this ratio is used as 95% for trains and 5% for internal requirements.

Along with the rail systems that continue to be constructed rapidly, Istanbul is planning to complete many new lines at the final destination after 2023. However, the length of the line is expected to be 1000 km. Thus, energy saving studies are very important in rail systems.

In this thesis study, general factors affecting the energy consumption of traction and fixed installations in urban rail systems will be given. Then, the M1 line selected as the model will be modeled on the RAILSIM program and DC load flow analysis will be performed. Simulation studies will be performed to increase energy efficiency for this line. Afterwards the M5 line will be modeled on the ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) program and the MV (Medium Voltage) and LV (Low Voltage) side load flows, transformer and cable loads and losses will be examined. The various operating scenarios will be repeated on the simulation to determine the optimal operating scenario for the line.

Keywords: Rail systems, energy efficiency, ETAP, RAILSIM, modelling, DC load flow analysis, AC load flow analysis, energy storage systems

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ulaşım sektörü gelişen ve gelişmekte olan ülkelerde en çok enerji tüketen ve çevreyi kirleten işletmelerden biridir. Örneğin, Avrupa Birliğinde, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık % 31'ine neden olmaktadır. Bu sektör içinde Büyükşehir taşımacılığı toplam CO_2 emisyonlarının yaklaşık % 25'inden sorumludur [1]. Buna ek olarak, yüksek hava kirliliği ve trafik sıkışıklığı kentsel alanlardaki ulaşım ile ilgili önemli konulardır. Raylı ulaşım sistemlerine, yüksek taşıma kapasitesi, güvenilirliği, yerel emisyonlarının olmaması ve metropol ulaşımının trafik etkisini azaltma potansiyeline sahip olması sebebiyle giderek daha fazla ilgi duyulmaktadır.

Ülkemiz açısından bakıldığında, başta İstanbul olmak üzere büyük şehir belediyelerinde metro ve tramway yatırımları hızla devam etmektedir. Sadece İstanbul Büyükşehir belediyesinin yeni yatırımları çerçevesinde 2019'da tüm ulaşım unsurları ile entegre 400 kilometreden fazla raylı sistem hedefi olduğu bilinmektedir. Bu hedef Haliç Tüp Geçiş Tüneli, Kabataş Transfer Merkezi ve 6 yeni metro hattı için çalışmalar başlatılmıştır.

Artan kapasite talepleri ve yükselen enerji maliyetlerine rağmen, kentiçi raylı sistemler hizmet kalitesini azaltmaksızın enerji tüketimini en aza düşürmelidir. Şuan yaklaşık 149 kilometre uzunluğa sahip İstanbul toplu taşıma sistemi yılda 300 milyon kWh'e yakın enerji tüketmektedir.

Kentsel demiryolu enerji tüketimi, birbirine bağlı faktörlerden oluşan geniş bir yelpazede tanımlanmaktadır. Trenlerin çektiği cer gücü, sabit tesislerde bulunan asansör, yürüyen merdiven, havalandırma, ısıtma-soğutma, depolar, araç bakım atölyeleri, aydınlatmalar vb. sistemlerin enerji tüketimleri hattın yapısına, yolcu sayısına ve kullanım amaçlarına

göre değişiklik gösterir. Bu nedenle, alt sistem düzeyinde enerji tasarrufuna odaklanmak yerine, sisteme geniş bir açıdan bakmak gereklidir.

Elektrik enerjisinin kullanıldığı bütün sistemlerde enerji tasarrufu büyük bir rol oynadığı gibi Raylı Toplu Taşıma sistemlerinde de büyük güç ihtiyacı gerektiği için enerji tasarrufu çalışmaları önem arz etmektedir. Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC – www.uic.asso.fr) enerji tasarruf yöntemlerini araştırıp, değerlendirecek bir proje yürütmüş ve bu konuda Mart 2003 tarihinde bir rapor yayınlayarak, şuana kadar uygulamaya geçirilmiş olan ve potansiyel fayda içeren çeşitli teknoloji ve yaklaşımları belirlemiştir [2].

Benzer şekilde, Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP – www.uitp.com) de şehiriçi raylı toplu ulaşım sistemlerinde enerji tüketimini azaltıcı tedbirler üzerine sürekli çalışmakta ve bu konuda özel toplantılar düzenlemektedir [2].

1.1 Literatür Özeti

Raylı sistemlerde elektriksel enerji verimliliğinin artırılması üzerine önem arz eden çalışmaların tanıtıldığı literatür özeti başlıklar başlıklar halinde sunulmuştur.

1.1.1 Enerji Depolama Sistemlerine Ait Literatür İncelemesi

Burch, 1911 yılında Torino-Modane dağ demiryolunda 34 kW/sa enerji depolayan 44 ton Volan (FlyWheel, FW)'ın kurulduğunu ve 1988'de bu sistemin, Japonya'daki Zushi Keihin Electric Express Demiryolunda, rejeneratif enerjiyi depolamak amacıyla kurulduğunu duyurmuştur [3,4].

Hansang Lee ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları bir çalışmada, 100 kWh'lik süper-iletken volan enerji depolama sistemi (SFES, Superconducting Flywheel Energy Storage System) kullanılarak pik güç azaltımı ve enerji verimliliği iyileştirmesinin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Yaptıkları çalışmada enerji akışını kontrol etmek için iki yönlü kontrolör uygulanmıştır. Kontrolör, katener voltajını, rotorun açısal hızıyla tahmin edilen şarj durumu ile algılayarak volanlı enerji depolama sisteminde (VEDS) depolanan enerjiyi şarj etmeye veya boşaltmaya karar vermektedir [5]. VEDS'lerin 7 transformator merkezi ve 22 istasyonun bulunduğu Daejeon Metro sisteminde kurulduğu öngörülmüştür. Çalışma sonucunda 360 sn sefer aralığı ile tepe gücü, 9334 kW'dan, 5959

kW'a % 36.7 oranında azalmıştır. Bu, temel ücretin % 36.7 oranında düşürülmesi anlamına gelmektedir. Nisan 2012'de temel ücret 60.000 dolar olarak alınmış olup, bu ücret için maliyet tasarrufu yaklaşık 22.000 dolar olmuştur. 1 ay boyunca, SFES'in 7 istasyonda kurulmasıyla 24.037 doların tasarruf edilebileceği doğrulanmıştır. 2011 yılında 3 milyon dolarlık elektrik ücreti göz önüne alındığında, elektrik masrafının yaklaşık % 10'undan tasarruf edilebilebileceği sonucu öngürülmüştür [5].

2004'te R. de Andrade Jr ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada gerilim düşümü ve anlık enerji kesintilerini karşılaması amacıyla süper iletkenli yüksek hızlı volanlı enerji depolama sistemleri incelenmiştir. Bu çalışmada, volanlı enerji depolama sistemlerinin yatak (rulman) kayıplarını ve hava sürtünme kayıplarını azaltarak, maksimum verim alınması amaçlanmıştır. Bu sistemde, rulman kayıplarının minimize edilmesi için bir süperiletken manyetik yatak (SMB, superconducting magnetic bearing) ve hava sürtünmesini önlemek için bir vakum haznesi kullanılmıştır. Volan sistemini çalıştırmak için ise sağlamlığı ve boşta çalışma kaybı olmaması nedeniyle anahtarlamalı relüktans motoru (SRM, switched reluctance machine)'ndan faydalanılmıştır [6]. Sistem, seri bağlı güç şebekesi, kuplaj dönüştürücüsü, SRM sürücüsü, SRM ve volan'dan oluşur. Sonuç olarak bu çalışmada SMB ve SRM ile volanlı enerji depolama sistemlerinin gelişimi incelenmiştir. FESS'i kontrol etmek için tasarlanan ön güç elektroniği simülasyonu, bu sistemin, gerilim düşüşlerini telafi edebileceğini göstermektedir.

Doğu Japonya Demiryolu Şirketinde, DC çekişli güç kaynağı sistemindeki ilk enerji depolama aygıtı, 2013 Şubat ayında Haijima transformator merkezinde (TM) ikinci enerji depolama aygıtı ise, 2014 Mart ayında Okegawa transformatör merkezine kurulmuştur [7]. Doğu Japon Demiryolu Şirketi'nde yapılan araştırmaların sonuçları, yaklaşık 7,5 dakika tren çalışma aralığında enerji depolama sistemi kurulumunun etkili olduğunu göstermektedir [8]. Kurulan sistemin özellikleri şu şekildedir:

Bu enerji depolama aygıtlarında kullanılan lityum iyon pillerin gerilimi yaklaşık 700 V olup, DC/DC dönüştürücü vasıtasıyla 1,5 kV doğru akım barasına bağlanmaktadır. Depolama pilleri ile ilgili olarak, kullanılabilir pil ömrünü uzatmak için şarj durum aralığı (SOC, State of Charge) %30'dan %50'ye sınırlandırılmıştır [7]. Yuuki Lino ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, Haijima ve Okegawa transformatör merkezlerinde Lityum-İyon piller

kullanılarak oluşturulan depolama sistemlerinden elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Yuuki Lino ve arkadaşları çalışmalarına başladıklarında, Haijima TM'deki enerji depolama sistemi kurulumundan itibaren iki yıldan fazla süre ve Okegawa TM'deki depolama sistemi kurulumundan itibaren ise bir yıldan fazla süre geçmiştir. Bu süreler sonrasında bazı veriler incelenmiştir. Haijima TM'deki enerji depolama sistemi üzerinden tüketilen enerjinin yıllık miktarı 400 MWh/yıl olarak ölçülmüştür. Bu değer Haijima TM'de yıl boyunca toplam cer enerjisinin yaklaşık %4'üne tekabül etmektedir. Buna ek olarak, Okegawa TM'deki enerji depolama sistemi üzerinden tüketilen enerjinin yıllık miktarı 750 MWh/yıl'dır ve bu ise, Okegawa TM'de yıl boyunca toplam çekme enerjisinin yaklaşık %8'idir. Burada Yuuki Lino ve arkadaşları Doğu Japonya Demiryolları Şirketi'nin Haijima ve Okegawa TM'lerinde lityum iyon piller kullanılarak oluşturulan enerji depolama sisteminin genel durumu ve işletim durumunu açıklamışlardır [7].

JR West (Batı Japonya Demiryolları Şirketi) tarafından, katener sisteminde gerilim düşümü telafisi için 2006 yılında SHIN-HIKITA transforamtör merkezinde lityum iyon tabanlı depolama sistemi kurulduğu bildirilmiştir [9]. Doğu Japonya Demiryolları Şirketi ise, Ome hattı üzerindeki HAIJIMA transformatör bölgesinde bir lityum-iyon pil sistemi kurulduğunu ve 20 Şubat 2013'te faaliyete geçirildiğini duyurmuştur [9].

Regina Lamedica ve arkadaşları tarafından yapılan projede, hat ve trafonun kapasitesinden daha yüksek bir başlangıç gücüne sahip trenlerin çalışmasına olanak sunan, batarya tabanlı enerji depolama sistemi ile donatılmış bir yardımcı trafo merkezi (ABS, Auxiliary Battery Substation) temelli, yenilikçi bir çözüm önerilmektedir. Önerilen bu çözümün, yüksek performanslı trenlerin enerji çekişi sırasında, zayıf konvansiyonel 3 kV besleme hattı üzerindeki tepe akım değerini ve gerilim düşüşlerinin etkisini azaltabileceği görülmüştür. ABS'nin konvansiyonel besleme sistemini desteklediği yeni nesil yüksek hızlı trenleri besleyen, gerçek bir İtalyan 3 kV DC demiryolu sistemi üzerinde kapsamlı bir simülasyon sistemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, tepe akım azaltımı ve gerilim düşümü telafisi açısından ABS'nin etkinliğini doğrulamaktadır. Ayrıca, ABS yapısının demiryolu besleme hattındaki kayıpları azaltmaya ve enerji tasarrufunu arttırmaya olanak tanıdığı görülmüştür. ABS'nin elektriksel modeli, batarya modülleri, DC/DC dönüştürücü ve güç akışı denetleyicisinden oluşmaktadır. DC/DC dönüştürücü, şebeke gerilimi, şebeke gerilim değişimi ve bataryaların şarj durumları (SoC, state of charge)'na göre, bir enerji

yönetimi stratejisi kullanarak akü modüllerini şarj veya deşarj eder. Demiryolu sistemi modeli, 'yarı statik' geriye dönük metodu temel alan bir demiryolu simülatöründe uygulanmıştır. Önerilen ABS'nin etkinliği, Roma Termini tren istasyonunu Leonardo da Vinci uluslararası havalimanına bağlayan demiryolu hattında uygulanarak doğrulanmıştır. Özellikle, testler ROMA TERMINI-FIUMICINO demiryolu hattının MAGLIANA-FIUMICINO rota kesimi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak önerilen bu sistem daha dengeli bir hat gerilimi ve ana trafo tarafından sağlanan tepe akımının önemli ölçüde azaltımını (%43,2) sağlamaktadır. Ayrıca hat gerilim düşümünün %5,26 ve kayıpların ise %22,4 oranında azalmasıyla sonuçlanmıştır [10].

Enerji depolamaya ilişkin ilk uygulama Londra metrosunda gerçekleştirilmiştir ve günümüzde de New York Far Rockaway hattında kinetik enerji depolama teknolojisi kullanılmaktadır. Tamamen statik süperkapasitör tabanlı enerji depolama sistemi olarak ise Almanya, Köln şehrinde bu teknoloji uygulanmıştır [11].

1.1.2 Sürüş Tekniklerine Yönelik Literatür İncelemesi

Otomatik Sürüş sistemi günümüzde birçok yeni hatta uygulanmaktadır. Trenler sistem tarafından enerji verimli sürüş prensipleri göz önüne alınarak otomatik olarak sürülmektedir. Otomatik sürüşün avantajı manuel sürüşteki makinist ve işletme hatalarının en düşük seviyeye indirilmesidir [2]. Raylı ulaşım sistemlerinde cer enerjisi tüketimi, toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturur. Bu nedenle, enerji tasarruflu sürüş kontrolü, şehir içi raylı ulaşım sistemlerinin enerji tüketimini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. ATO (Automatic Train Operation, Otomatik Tren İşletimi) sistemi raylı ulaşım sisteminde trenleri sürmek için yaygın olarak uygulanmaktadır. ATO, demiryolu hat parametrelerine, planlanan zaman çizelgesine ve araç koşullarına dayalı olarak uygun hız eğrisini üretir. ATO'nun kontrol stratejisi, trenin tam olarak tavsiye edilen hız eğrisi boyunca çalışmasını sağlar. Özellikle, ATO'nun kontrol stratejisi, uygulanan hızı önerilen hız ile karşılaştırarak trenin çekiş gücünü veya frenleme kuvvetini belirlemektir. Ayrıca tren duruşunun hassasiyeti, dakikliği, enerji tasarrufu ve sürüş konforu gereksinimlerini karşılamaktır [12]. Sürüş tekniklerine ve otomatik sistemin özelliğine göre enerji tasarruflu sürüş durumunda %30'un üzerinde enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [13].

Taksim-4 Levent arasında işletilmekte olan İstanbul Metrosu, normal işletme şartları altında otomatik olarak sürülmektedir. ATO sistemi ATC (Automatic Train Control, Otomatik tren kontrolü)'den gelen talimatlar doğrultusunda iki istasyon arasındaki en uygun maksimum hızı 5 değişik opsiyon içinden seçerek kullanmakta ve bunun enerji tasarrufu sağladığı bildirilmektedir. Ancak, modern sistemlerde maksimum hızı artırarak ve sonrasında boşta gitme (coasting) moduna geçilmesinin daha fazla enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmektedir [2].

Shuqi Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ATO'nun kontrol stratejisi göz önüne alınarak tren enerji tüketiminin daha doğru bir modeli sunulmuştur. Sunulan modele dayalı önerilen hız eğrisini en iyi duruma getirmek için ARDM (Acceleration Rate Decided Modification, Hızlandırma Oranı Karar Modifikasyonu) ve DDM (Distance Dediced Modification, Uzaklık Kararlı Değiştirme) olarak adlandırılan iki Tabu Arama (TS, Tabu search) algoritması modifikasyonu tanıtılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliğini doğrulamak için vaka çalışmaları Beijing Metrosu temel alınarak yürütülmüştür. Tren işletimi Jinghailu ve Ciqunan istasyonları arasındaki kısım için optimize edilmiştir. DDM ile TS algoritmaları tarafından optimize edilen çekiş enerjisi azaltma yüzdesi %8,93 ve ARDM ile önerilen algoritmanın tren operasyonu enerji azaltma yüzdesi ise %2,54 olarak elde edilmiştir [12].

Birçok bilim insanı çekiş enerji tüketimini azaltmak için enerji tasarrufu sağlayan tren kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Chang, dakiklik, sürüş konforu ve enerji tüketimi gereksinimlerini karşılamak için optimize edilmiş süzülme kontrolü uygulayarak tren operasyonlarını optimize etmek için genetik algoritma kullanmıştır [14]. Howlett, sürekli tren kontrolü problemi için optimal anahtarlama noktalarını bulmak amacıyla Pontryagin ilkesini kullanmıştır. Ayrıca, ayrık kontrol problemindeki her sabit kontrol dizisi için yakıt maliyetini en aza indirmek amacıyla en uygun anahtarlama zamanlarını elde etmiştir [15]. Ke, enerji tüketimini en aza indirgemek için kombinatoryal bir optimizasyon modeli önermiş ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla tren hız yörüngesini optimize etmek için karınca kolonisi optimizasyon algoritmalarının MAX-MIN ant sistemini kullanmıştır [16]. Miyatake, enerji tasarruflu tren hız profillerini bulmak için yapılabilecekleri belirtmiş ve formülasyonu çözmek için dinamik programlama, gradyan yöntemi ve sıralı kuadratik programlama gibi üç yöntemi karşılaştırmıştır [17].

1.1.3 Optimize Edilmiş Trenler Arası Süre (TAS) ve Hız Yönetimine Yönelik Literatür İncelemesi

Kentsel raylı ulaşım sistemlerinde istasyonlar arasındaki mesafeler kısa olmasına rağmen, uygulamalı araştırmalar, süzülme ile çekiş enerji tüketiminde önemli düşüşlerin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, sırasıyla Londra ve İstanbul metro sistemlerinin belirli hatları için trenler arası sefer süresi azaltılarak yapılan çalışma süresinde % 5'lik bir artışla yaklaşık % 20 enerji tasarrufu sağlandığı bildirildi [18,19].

Normal sefer süresi 6 dakika olan Taipei hızlı toplu taşıma (Taipei Mass Rapid Transit, Taipei MRT) hattının optimal sefer aralığını bulmak için, Bo-Chih Peng ve Nanming Chen yaptıkları çalışmada iki farklı durumu analiz etmişlerdir [20]:

Durum 1, pik saatler sırasındaki sefer süresini ayarlamak,

Durum 2, bazı trenlerin kalkışlarını geciktirerek basitçe yapılan sefer süresi değişiminin rejeneratif enerjinin diğer trenler tarafından alıcılığını artırıp artırmadığını kontrol etmek, olarak tanımlanmıştır.

Durum 1 için yapılan çalışmada trenler arası sefer süresi, 1 saatlik süre içinde 1'er dakika azaltılarak 6 dakikadan 2 dakikaya kadar düşürülmüş ve simülasyon çalışmları yapılmıştır. Sonuç olarak, trenler arası sefer süresi 360 saniye olduğu durumda enerji tasarrufu %31,69 iken 120 saniye için %37,88 olduğu ortaya konulmuştur. Rejeneratif enerji alıcılığında ise, sefer süresi 360 saniye olduğu durumda %77,42 ve 120 saniye iken ise %92,58 olarak görülmüştür. Genel bir sonuç olarak her iki durum için de optimal sefer süresinin 120 saniye olması durumunda, yenilenmiş enerjinin diğer trenler tarafından alınmasında artış ve enerji tasarrufu olduğunu görülmüştür.

Gerben M. ve Rob M. P.'nin yaptıkları çalışmada ise sefer süresinin 300 saniyeden 270 saniyeye düşürülmesi durumunun etkisini araştırmışlardır. Bu durumda, mekanik frenleme ile kıyaslandığında rejeneratif frenlemenin %18 den %25'e çıktığı ancak genel enerji tüketiminin arttığı görülmüştür [18].

Hızlanma profilleri ve maksimum hız limitleri demiryolu hizmetlerinde cer enerji tüketimini belirleyen kritik faktörlerdir. Bu nedenle, emniyet ve zamanlama kısıtlamaları dahilinde, hız optimizasyonu önemli enerji tasarruflarını sağlayabilmektedir. Örneğin,

yolculuk uzunluğundaki artışı telafi etmek için ek bir tren gerekli olmasına rağmen, Brüksel metro hattındaki hız sınırlarının (72 km/sa den 60 km/sa'e ve 60 km/sa den 50 km/sa'e) yeniden ayarlanması %15 cer enerji tasarrufu ile sonuçlanmıştır. Sao Paulo sistemi için en enerji verimli sürüş profili, ivmelenme oranlarının arttırılması pahasına azami hızın düşürülmesi olarak görülmüştür [21]. Süzülme (coasting), cer motorlarına güç uygulamamak anlamına gelir, böylece araçlar istasyonlara yaklaşırken hareket direnci nedeniyle yavaşlar. Optimum süzülme noktalarını ve ilgili hız profillerini belirlemek için literatürde farklı metodolojiler önerilmiştir [22-17].

Optimum enerji tasarrufu için belirlenecek hız profilinin temel özellikleri,

- Yüksek başlangıç ivmesi,
- İstasyonlar arası mesafeyi, yolcu yoğunluğuna, zaman çizelgesine ve hat geometrisini göze alarak en uygun düşük boşa alma hızı,
- Uzun boşta gitme süresi,
- Yüksek frenleme ivmesi,
- Düşük bekleme süresi, olarak sıralanabilir.

Eğer bu prensipler uygulanabilirse, sürücülerin sürüş durumlarına göre %20-30 arasında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [13].

1.1.4 Enerji Verimli Cer Sistemine Yönelik Literatür İncelemesi

Raylı ulaşım sistemlerindeki aktif güç kayıpları, akımın karesi ile orantılıdır ($P_k=I^2*R$). Bu nedenle, ağdaki farklı trenlerin aynı anda hızlanmasından kaynaklanan yüksek güç değerleri (yüksek akımlar) sınırlanarak, kayıplar önemli ölçüde azaltılabilir. Kayıplarını azaltmak için bir başka seçenek ise besleme hatları için düşük dirençli malzemeler seçmektir. Nispeten yüksek yatırım maliyetleri gerektirmesine rağmen, artan sayıda üçüncü raylı güç sistemleri (örn. London Underground), standart çelik iletken raylar yerine %50 daha az dirence sahip aluminyum esaslı raylarla değiştirilerek iletim kayıplarını azaltmışlardır [23].

H.Ohsaki ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, DC demiryolu hattında süper iletken güç kablolarının etkileri incelemiştir. MATLAB-Simulink tabanlı sayısal analiz modelleri, tek ve

çift hatlı demiryollarının dc elektrik besleme sistemi için yapılandırılmıştır. Sonuçlar, süper iletken güç kablolarının rejenerasyon oranını ve sistem enerji tasarrufunu iyileştirdiğini ve transformatör yüklenmesini çok etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermektedir. Bir demiryolu hattının taşıma kapasitesinin arttırılması gerekiyorsa, hat boyunca mevcut transformatör merkezlerini değiştirmeden, süper-iletken kabloların devreye sokulmasıyla bunun başarılabileceği ifade edilmiştir [24].

Masaru Tomita ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, süperiletken besleyici sistem, test pistinde kurulmuş, testler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sistem dünyada ilk kez ticari bir hatta uygulanmıştır. İki trafo merkezi arasına döşenen 31 m süperiletken kablo sistemindeki doğrulama testini takiben, test pistinde 310 m'lik daha uzun bir süper iletken besleyici kablo sistemi kurulmuştur. Enerji analizinin sonuçları olarak, süper iletken besleyici sisteminin getirilmesinin faydaları, daha yüksek yenilenmiş enerji etkinliği, düşük enerji kaybı, trafolar arasındaki yük dengelenmesi ve yaklaşık %5 enerji tasarrufu olabilir. CO_2 emisyonu miktarı bakımından düşünüldüğünde, yıllık dünyadaki $3{,}6x10^5$ ton CO_2/yıl azalma olabileceği öngörülmüştür. Geleceğin programı olarak, süper iletken besleyici kablo, 2017-2018 yıllarında Tokyo metropolünün ticari hatlarına dahil edilecektir. Ardından 2021'de Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Teşkilatı tarafından desteklenen bir projeye 2000 m uzunluğunda bir süper iletken kablo tanıtılacaktır [25].

Dünya'nın en uzun ve en yüksek gerilim iletebilen süperiletken güç iletim kablosu, Nexans tarafından geliştirilmiş ve üretilmiştir. Bu kablolar, Amerika'daki en büyük belediye elektrik tesislerinden biri olan Long Island Güç Otoritesi LIPA'da yapılan testlerde başarılı olmuştur. 138 kV, 574 MVA ve 600 metrelik güç bağlantısı ve paralel çalışan 3 süperiletken kablo, yüksek gerilimde faaliyet gösteren bir tesise döşenen dünyanın ilk süperiletken (HTS, High temperature superconducting) kablo sistemidir. Bu kablolar, 574 MVA gücü geçirebilecek yapıdadır. Başka bir deyişle, 300.000 eve elektrik enerjisi iletebilir. Kablonun en iyi performansla çalıştığının anlaşılması için gereken sürenin ardından LIPA, süperiletken kabloları tesisin kalıcı bölümlerine döşemeyi planlamaktadır [26].

Hafif olan araçlar, ilerlemeye karşı daha düşük mekanik direnç göstermektedir. Ağır araçlar ile aynı performansa ulaşmak için daha az kinetik enerjiye ijtiyaç duyarlar. Bu

nedenle raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan taşıtların toplam kütlesinin en aza indirilmesi, cer enerjisi tüketimini azaltacaktır. Cer enerji tasarruf yüzdesinin, kütle azaltma yüzdesine oranının, kentsel raylı sistemler için yaklaşık 0,6-0,8 arasında olduğu tahmin edilmektedir ancak rejeneratif frenleme kullanıldığında bu oran biraz daha düşük olabilmektedir [27].

Katener sistemleri vasıtası ile araçlara ulaştırılan enerji, servis sırasında çeşitli süreçlerde tüketilmektedir. Aracın işletme hızına ulaşıncaya kadar ivmelenmesi Newton'un Kinetik enerji eşitliğine göre, aracın kütlesi ve hızı enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Kinetik enerjiyi üretmek için ivmelenme gereklidir ancak çok hızlı ivmelenmek gereğinden fazla enerji tüketimine sebep olur. Çünkü kinetik enerji, hızın karesi ile artmaktadır. Bunun yanında tren kütlesindeki %10 oranda bir artış, araç enerji tüketiminin %6-8 oranında artmasına sebebiyet vermektedir [6]. Ayrıca, demiryolu aracının kütlesinin azaltılması yola daha az zarar verir, tekerleklerin ve frenin aşınmasını azaltır, bu nedenle sistemin işletme ve bakım masraflarını düşürür [28].

Araç ağırlığının enerji tüketimine etkisini göstermek amacıyla, aracın boş halinden tam yüklenmesine kadar tren içindeki yolcu sayısı 50'şer arttırılarak testler yapılmıştır. Simülasyonda yolcu ağırlığı 71 kg olarak alınmıştır. Simülasyon sonucunda boş halden tam dolu hale geçene kadar araç ağırlığı %60 artarken, enerji tüketimindeki artış %42 olmuştur. Kişi*km için enerji tüketimi 250 yolcu durumunda yaklaşık 10 Wh iken, 1000 yolcu taşınması durumunda 3,30 Wh olarak belirlenmiştir [2].

DC gerilim ile beslenen çift hatlı sistemlerde her iki yola ait katener sistemleri yalıtkan kablolar ile paralellenebilmektedir. Hatların paralellenmesi akım bölüşümünü artırarak sistemin rahatlamasını sağlaması ve enerji kayıplarını azaltması gibi avantajlara sahiptir. Paralelleme kablolarının sıklığının enerji tüketimi üzerine etkisi Açıkbaş ve Söylemez tarafından araştırılmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır: Trenler arası sefer süresi (HT, Headway Time)'nin de etkisini göstermek amacıyla, testler 360 saniye ve 180 saniye olmak üzere iki farklı HT'de yapılmıştır. İki katener sistemi önce HT'nin 300 sn sonra da 180 sn olduğu durumda, her 2000, 1000, 500, 250 ve 100 metrede bir paralellenmiş ve testler tekrar edilmiştir. HT 180 sn iken paralelleme 2000 metrede bir olduğu durumda

%2,67, 100 metrede ise %4,49; HT 360 sn iken paralelleme 2000 metrede bir olduğu durumda %2,14, 100 metrede ise %4,41 enerji tasarrufu sağlandığı gösterilmiştir [29].

Diyot doğrultucular kullanan konvansiyonel DC transformatör merkezlerinin aksine, tersinir transformatör merkezleri (çift yönlü veya evirici trafo merkezleri olarak da bilinir), çift yönlü güç akışı sağlayan invertörleri içerir. Bu, araçların frenlemesi sırasında üretilen enerji fazlalığının güncel AC şebekesine geri döndürülebileceği ve mevcut mevzuata bağlı olarak işletmecinin şebekesinde (aydınlatma, yürüyen merdivenler, ofisler vb.) kullanılabileceği veya enerji tedarikçisine satılabileceği anlamına gelmektedir. Tersinir transformatör merkezleri ESS (energy storage system)'ler ile karşılaştırıldığında daha az dönüşüm kaybı ile çalışırlar, ancak hattaki rezistif kayıplar transformatör merkezinin konumuna göre önemli olabilir. Dahası, AC hatlar kalıcı olarak alıcı olduğu için, frenleme enerjisini geri kazanma imkanı sunuyorlar. Ancak, katenersiz çalışmaya izin vermezler ve gerilim dengelemesi veya tepe güç azaltma amaçları için kullanılamazlar. Buna ek olarak, nispeten yüksek yatırım maliyetleri sunar. Birkaç çalışma, bu teknolojinin mevcut şehir içi raylı sistemlerde cer enerji tüketiminin %7-11'ini azaltabileceğini göstermektedir [30, 31].

Optimum kapasitede rejeneratif inverter tesis etmek için, cer transformatör merkezlerinde tüketilen ve rejenere edilen enerji miktarını araştırmak gereklidir. Diyotlu doğrultucuya bir rejeneratif inverter ters paralel bağlanırsa rejenere edilen fazla enerji şebekeye geri verilebilir, aksi takdirde araç üstündeki fren rezistörlerinde harcanacaktır. Bir enerji tasarruf etkisi söz konusudur. Bunun yanı sıra aracın fren kapasitesi iyileşecek ve hattın alıcılığının artması ile birlikte ATO (automatic train operation) performansı artacaktır [32].

Tersinir cer transformatör merkezlerinden beklenen faydalar şunlardır [33]:

- Frenleme enerjisinin geri kazanımı oranının artırılması ile trenler arasında doğal enerji transferini mümkün kılarak, fren rezistörlerinin kullanımı ortadan kalkacaktır, buna bağlı olarak tren kütlesi ısısında azalma olacaktır.
- Ac tarafta güç faktörü iyileştirilmesi ve harmonik seviyelerinin azaltılması sağlanacaktır.

Tersinir transformatör merkezleri ve/veya hat boyu enerji depolama üniteleri orta düzeyde yoğun trafiğe sahip raylı sistem ağları için kullanılabilmektedir. Bu sistemlerin ekonomik değerlendirmesi her bir raylı sistem için kendi özelinde; raylı sistem ağı topografyası, katener sistem empedansları, araç karakteristikleri (tren kütlesi, hızı) ve işletme şartları(tarifeler, iklim şartları) gibi kendine özgü değerleri göz önüne alınarak yapılabilir [34].

Yüksek gerilim ile enerji iletimi, enerji tasarrufu açısından faydalı olduğu bilinen bir gerçektir. Raylı sistemlerde çok çeşitli gerilim seviyelerinde enerji iletimi mevcuttur. 600V DC, 750V DC, 1500V DC, 3000V DC, 15 kV AC ve 25 kV AC 50 Hz. AC sistemler ana hat uygulamalarında kullanılırken dünyanın hemen hemen tüm toplu taşıma sistemleri DC sistemleri ile beslenir. Elektrik sistemi ve güç elektroniğindeki gelişmeler yeni yapılan hatlarda 1500 V DC beslemeye olanak tanımıştır. Toplamda 176 km olarak mevcut olan Madrid metrosunun Metrosur ring hattı, 600V DC ile enerjilendirildi. Ancak mevcut bu hattın yeni uzatımı için 1500V DC sistem tercih edilmiştir [35].

Bazı Asya ve Avrupa ülkelerinde kullanılan besleme sistemleri aşağıda sunulmuştur [35]:

- Almanya, İngiltere ve Fransa gibi toplu raylı taşıma sisteminde önde gelen ülkeler 600 ve 750V DC sistemler kullanmaktaydılar. Bununla birlikte, yeni inşaa edilen hatlar için tercih edilen sistem 1500V DC besleme sistemidir.
- İspanya ve İtalya'da kullanılan yaygın sistem, 1500 V DC sistemdir.
- Asya ülkelerinin çoğunda besleme sistemi olarak 1500 V DC sistem kullanılmaktadır. Singapur'un NE hattında 1500V DC sistem seçilmiştir.
- Tren konfigürasyonunun beş vagonu veya pphpd (Passenger per hour per direction) > 25000'i aştığı çoğu durumda, güç sistemi 1500 V DC olarak seçilmektedir.

Gerilim değişiminin enerji tasarrufuna etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Açıkbaş'ın SimuX programı kullanarak yaptığı simülasyon çalışmasında 750 V DC ile 1500 V DC besleme sistemlerini çeşitli parametreleri dikkate alarak karşılaştırmıştır. Trenler arası süreyi (TAS) 150s ve 300s olarak 2 farklı TAS olarak ve trenin yük durumunu da tam yükte (Fully Loaded = 271 ton) ve yarı yükte (Half Loaded = 219 ton) olmak üzere 2 farklı yük

durumu göz önünde bulundurarak testlerini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, 1500 V DC sistemin 750 V DC sistem üzerinde bir çok avantajı olduğunu belirtmiştir. Açıkbaş'ın İstanbul'un Anadolu yakasında yapılması planlanan Üsküdar-Ümraniye Metro hattına ilişkin veriler ile yapmış olduğu bu çalışmada besleme sisteminin 750 V DC yerine 1500 V DC seçilmesi durumunda elde edilecek tasarrufun %10 mertebelerinde olacağı belirlenmiştir. Benzer şekilde Kadıköy-Kartal hattına ilişkin veriler ile yapılan çalışmasında da 2025 yılı işletme şartlarında yıllık tasarrufun 12,5 milyon kWh olarak gerçekleşeceğini bulmuştur [35].

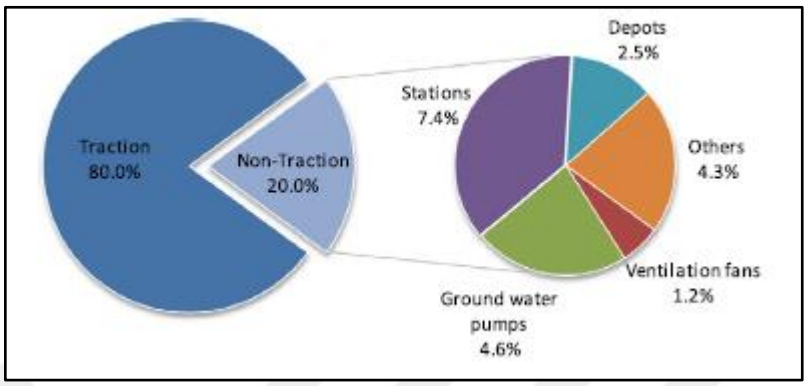
1.1.5 Yardımcı Tesislerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Literatür İncelemesi

Raylı ulaşım sistemi istasyonları ve özellikle de metro istasyonları, yolcu hareketliliği ile ticari hizmetleri birleştiren ve yolcu konforunun büyük önem taşıdığı komplike sistemlerdir. Temel enerji tüketimi tipik olarak HVAC (Heating, Ventilating, Air Conditioning, Cooling; Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme, Soğutma) 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, genellikle HVAC ekipmanları enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturmaktadır [36].

Stok depolarında ve araç bakım alanlarında enerji tüketimi esas olarak, demiryolunun kontrolü, bakımı ve temizliğinden kaynaklanmaktadır. Bu işlemler sadece depo tesislerinin çalışması için enerji gerektirmekle kalmaz, aynı zamanda aracın aydınlatma veya HVAC gibi bazı yardımcı sistemlerinde enerji tüketimi anlamına gelir.

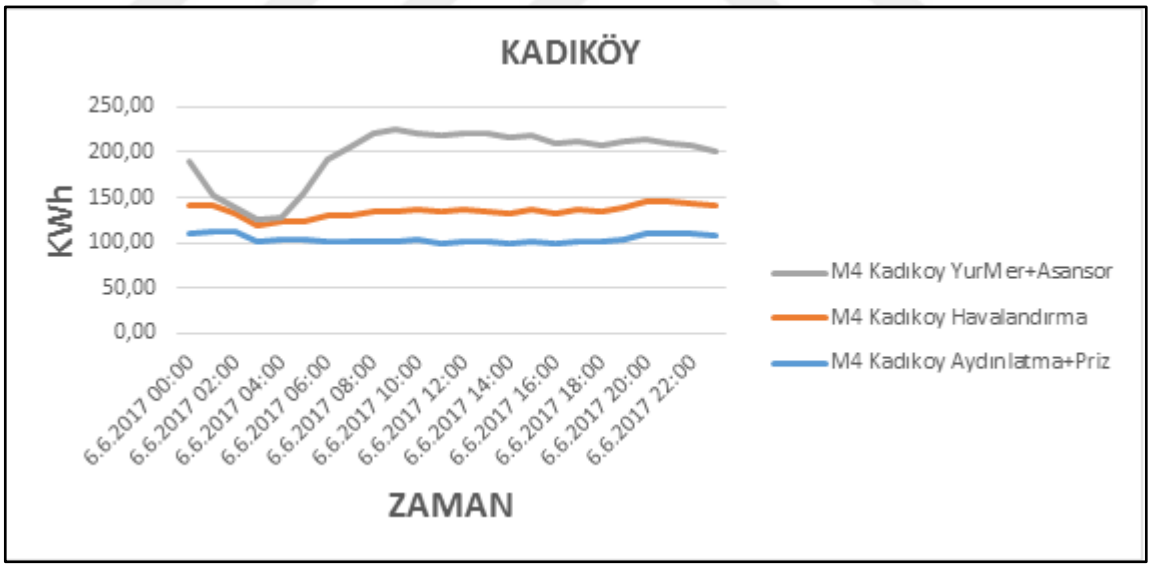
Kentsel raylı sistemlerdeki cer dışı enerji paylaşımı, sistemin yer altında mı yoksa yüzeyde mi işletildiğine ve iklim koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, tramvay sisteminde cer dışı enerji tüketimi çok düşük iken, metro sistemlerinde ortalama toplam enerji kullanımının yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır [37]. Bir başka yayında ise metro sistemlerinde tüketilen enerjinin yaklaşık yarısı yardımcı güçlere gitmekte iken cadde tramvay sistemlerinde yardımcı güç tüketiminin çok daha düşük olduğu değerlendirilmiştir [2]. Yardımcı tesis alt sistemler tarafından tüketilen enerji ile ilgili yayınlanmış veri eksikliği, kentsel raylı sistem için genelleştirilmiş rakamların verilmesini zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, bu tüketimler hakkında bir fikir vermek için Londra Metrosu'ndaki özel durum şekil 1'de

gösterilmektedir [38]. Burada istasyonlar çekiş gücüne bağlı olmayan toplam enerjinin yaklaşık % 37'sini tüketirken, depoların operasyonları % 12.5, tünel havalandırma fanları ise % 6'dır. Özellikle dikkat çekici olan, yardımcı tesis talebinin yaklaşık % 23'ünü oluşturan yer altı su pompalarının yüksek enerji tüketimidir.

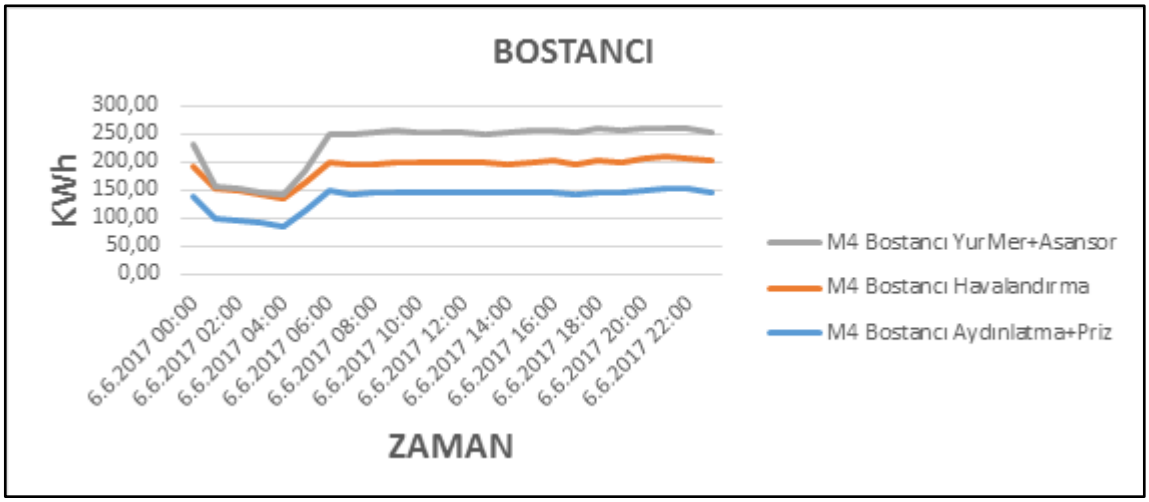


Şekil 1. 1 Londra metrosunun yardımcı tesisler enerji dağılımı [1]

Yardımcı servislerin güç tüketimlerini görmek için bir başka örnek, Metro İstanbul A.Ş den Kadıköy ve Bostancı İstasyonları için alınmıştır. Şekil 2 ve 3'te tüketilen enerji değerleri zamana bağlı olarak kWh cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 1. 2 İstanbul metrosu m4 hattı Kadıköy istasyonu yardımcı servisler güç tüketim değerleri



Şekil 1. 3 İstanbul metrosu m4 hattı Bostancı istasyonu yardımcı servisler güç tüketim değerleri

Sistemin yeraltında olduğu düşünülerek, emniyetten taviz verilmeden yapılabilecek olan bazı tasarruf sağlayıcı önlemler [2].

- İstasyon tasarımlarında mümkün mertebe güneş ışığından faydalanma,
- Aydınlatma sistemlerinin optimum şekilde sağlanması ve yüksek verimliliğe sahip elektronik balastlı lambaların kullanılması,
- Yürüyen merdivenlerde frekans sürücüleri uygulamaları,
- Yürüyen merdiven ve bantların yolcuya duyarlı hale getirilerek ihtiyaç olmayan zamanlarda çalışmasının önlenmesi,
- Ofis ve idari binaların ısı izolasyonun sağlanması,
- Planlı bakım faaliyetleri,
- Etkin bir çevre kontrol sistemi, olarak sıralanabilir.

Bu hususta yapılan bir uygulamada, Taksim-4.Levent metrosunda 85 adet yürüyen merdiven için Frekans Konvertörü ile yol verme uygulamasına geçilmiş olup, bu sayede merdivenler çift hızlı çalıştırılabilmekte ve yolcuların olmadığı durumlarda merdivenler 0,16m/s hızla hareket ettirilebilmektedir. Yapılan ölçümler yürüyen merdivenlerin enerji tüketiminde %40 oranında tasarruf yapıldığını göstermektedir.

Üsküdar-Çekmeköy metro hattında aydınlatma sistemi başlangıçta konvansiyonel etanj armatürler ile sağlanmaktaydı. Daha sonrasında bu armatürler, uygun aydınlatma şiddeti

sağlayan çift reflektörlü yeni armatürler ile değiştirilerek devreye alınmıştır. Bu sayede istenilen lüks değerleri de sağlanarak, kullanılacak armatürlerin gücü ve adetleri azaltılarak verimlilik sağlanmıştır.

Aydınlatmada enerji tasarrufuna yönelik olarak daha verimli lambaların tanıtımıyla önemli enerji tasarrufu sağlanabilir. Bielefeld ve Hon Kong metro istasyonlarında mevcut lambaları floresan ve led lambalarla değiştirerek sırasıyla, floresan lamba kullanma durumunda %32 ve led kullanma durumunda ise %40'lık bir enerji tasarrufu sağlanmıştır [1]. Ayrıca aydınlık yoğunluğunun otomatik olarak ayarlanması (trenler çalışmadığı saatlerde otomatik olarak kapatılması) da kayda değer enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.

Dinamik kontrol stratejilerinin uygulanması, HVAC sistemlerinde büyük bir enerji tasarrufuna ve nispeten küçük yatırımlarla konforda önemli gelişmelere neden olabilir [39]. Dolayısıyla, yolcu akışlarını, hava dolaşımını ve sıcaklık dağılımını anlamak ve tahmin etmek, istasyonlarda HVAC sistemlerinin optimal çalışmasını sağlamak için temel faktörlerdir.

Sonuç olarak, istasyonlarda enerji tasarrufu, tüm alt sistemlerinin entegreli yönetimi ile en üst düzeye çıkarılabilir. Bu nedenle, HVAC, aydınlatma ve yolcu konveyör sistemlerine adaptif kontrol stratejileri toplu olarak uygulandığında metro istasyonlarının enerji tüketiminde % 5-10'luk bir azalma beklenebilir [40].

1.2 Tezin Amacı

Elektrik enerjisinin kullanıldığı bütün sistemlerde enerji tasarrufu büyük bir rol oynadığı gibi raylı toplu taşıma sistemlerinde de büyük güç ihtiyacı gerektiği için enerji tasarrufu çalışmaları önem arz etmektedir. Bununla birlikte, artan kapasite talepleri ve yükselen enerji maliyetleri bağlamında, diğer ulaşım türlerinin çevresel performanslarını önemli ölçüde iyileştirdiği bir ortamda, kentsel raylı sistemler, hizmet kalitesini etkilemeksizin enerji kullanımını en aza indirgemelidir.

Günümüzde yaklaşık 149 km uzunluğa sahip İstanbul raylı toplu taşıma sistemi, yılda yaklaşık 300 milyon kWh'e yakın enerji tüketmektedir. Hızla inşaatı devam eden raylı sistemlerle birlikte İstanbul, 2023 sonrası nihai hedefte pek çok yeni hattı bitirmeyi

planlamaktadır. Bunlarla birlikte hat uzunluğu 1000 km olması beklenmektedir. Bu nedenle, raylı sistemlerde enerji tasarrufu çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

Dünya genelinde raylı sistemlerde enerji verimliliği çalışmaları yapılmaktadır. Birçok açıdan enerji tasarrufu çalışmaları belirlenebilir: enerji depolama sistemler, frenleme enerjisinin geri kazanılması, enerji tasarruflu sürüş yöntemleri, katener hatlarının paralellenmesi, tren kütle azaltımı, optimum enerji besleme senaryolarının oluşturulması, trafo ve kablo boyutlandırılmasının optimizasyonu, v.b. gibi.

Bu tezin amacı Türkiyede kullanılan raylı ulaşım sistemlerinde uygulanabilecek enerji verimliliğini artırma yöntemlerinin ortaya konulması ve seçilecek pilot bögelerde, belirlenen yöntemlerin simüle edilerek gerçekleştirilmesi ve verimlik ölçüsünün gösterilmesidir.

1.3 Hipotez

Raylı ulaşım sistemlerinde çeşitli yöntem ve önlemler ile enerji verimliliği artırılabilmektedir. Büyük güç gerektiren ve giderek yaygınlaşan raylı sistemlerde, yapılan küçük bir verimlilik çalışması bile, mevcut ve gelecekteki sistemlere büyük katkı sağlayacaktır.

Tez çalışmasında seçilen pilot bölgeler (M1 ve M5 hatları) için enerji verimliliği artırma çalışmaları yapılarak İstanbul'da kullanılan sistem için sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlarla da hem tüketilen enerjinin azaltılabileceği hem de tesis yapım maliyetlerinin düşürebileceği ortaya konulması hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

ŞEHİR İÇİ RAYLI SİSTEM TÜRLERİ VE ELEKTRİKSEL ALTYAPI

Kent içi raylı toplu taşıma sistemleri modern şehir içi ulaşım sistemleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemizde özellikle büyük şehirlerde (yaklaşık 20 milyon nüfusuyla İstanbul gibi) trafik sorununu hafifletmek ve karmaşıklıktan kurtarmak için sürdürrülebilir modern kent koşullarına uyumlu, kapasite, hız ve konfor bakımından uygun olan raylı toplu taşıma sistemleri öne çıkmaktadır.

Demir yolları boyunca enerji, gerilim hatları ile genellikle 2 şekilde trenlere ulaştırılır. Bunlardan ilki, şehirlerarası demir yollarında da kullanılan ve direkler vasıtasıyla trenin üzerinde seyreden havai hattır (katener). Diğeri ise, genellikle şehir içi hatlarda kullanılan ve raylardan birinin hemen dış tarafında bulunan üçüncü bir raydan oluşan hattır. Bu iletim hattına üçüncü ray hattı denir. Bir diğer sistem de bakım alanında park halindeki araçların enerji beslemesi amacıyla kullanılan depo alanı araç besleme sistemidir (Stinger).

2.1 Şehir İçi Raylı Sistem Türleri

Şehir içi raylı sistem türleri bazı kıstaslara göre birbirinden ayrılır. Bunlardan bazıları; yolcu taşıma kapasitesi, ticari hızı, virajların kurpu (çapı), lokomotife bağlı vagon sayısı, rayların geometrik özellikleri, sinyal sistemi, karayolu ile kesişme noktaları, karayolundan korunma oranı, istasyon uzunlukları, istasyonlar arası mesafe, yoğun saatlerde sefer sıklığı, v.b. olarak sıralanabilir. Raylı sistem çeşitleri hafif raylı sistemler (tramvay vb.) , ağır raylı sistemler (metro, banliyö vb.) ve diğer sistemlerden (monorail, maglev vb.) oluşmaktadır.

2.1.1 Metro

Metrolar, kendi içinde kapalı bir sistem olan, kendisine ait araç ve yolu bulunan, diğer sistemlerle yolu kesişmeyen, yer altında veya üstünde hareket eden, şehir içi toplu taşımada en yüksek yolcu taşıma kapasitesine sahip ve dünyada yaygın olarak büyük şehirlerde kullanılan raylı toplu taşıma sistemleridir. Metro istasyonlarının uzunluğu 200 m civarındadır. Metro araçlarının boyları da 180-200 metre kadar olabilmektedir. Saatte tek yönde yaklaşık 60.000-70.000 adet arası yolcu taşıma kapasitesine sahiplerdir [41]. Metrolarda enerji temini katener, rijit katener veya 3. ray şeklinde tesis edilen sistemlerden sağlanmaktadır. Yaygın olarak 600 V DC, 750 V DC, 1500 V DC ve 3000 V DC gerilim seviyelerinde yapılmaktadır.



Şekil 2. 1 Kadıköy-Kartal metro hattı (1500 V DC besleme)

2.1.2 Hafif Metro

Hafif raylı sistemler kendine ait özel bir yolu olan tek araç veya 4-6 araçlık kısa diziler halinde sinyalizasyon sistemine tabi olarak işletilen elektrikli ulaşım sistemleridir. Çoğunlukla yer altında açılan tünellere döşenen hatlarda ortalama 70-90 km/sa hızla hareket ederler. Genellikle 1432 mm ray açıklığındaki hatlarda katener, rigid katener veya üçüncü raydan enerji beslemesi yapılır. Hafif metro hatları da metro hatları gibi tam

tecritli güvenli sistemlerdir. İstasyon uzunlukları 100 m civarındadır. Tek yönde saatte yaklaşık 35.000-60.000 adet yolcu taşıma kapasitesine ulaşabilirler [42].



Şekil 2. 2 Hafif metro hattı (İstanbul)

2.1.3 Hafif Raylı Sistem

Ray açıklığı genellikle 1435 mm olan, bir sürücü tarafından sinyalizasyon sistemine uygun olarak kumanda edilen, ortalama 60-80 km/sa hız ile işletilen raylı toplu taşıma sistemleridir. Günümüz büyük kentlerinde yaşamı ve ulaşımı kolaylaştıran bir sistemdir.

En belirgin özelliği kendine ait bir yolu vardır ve diğer kullanıcılardan ayrılmıştır. İstasyonlar arasındaki mesafe yaklaşık olarak 600-1000 m arasındadır. Yaklaşık 300 yolcu kapasiteli araçlardan oluşan diziler halinde 80 km/sa hıza kadar çıkabilir. Enerji temini, 750 V DC veya 1500 V DC gerilim seviyelerinde, katener veya üçüncü ray sistemlerinden sağlanır [42].

2.1.4 Tramvay

Karayolu vasıtaları ile aynı yolu kullanan, yol ve trafik durumuna göre bir sürücü tarafından kumanda edilen, enerjisini ray boyunca bulunan katener hatlarından genellikle 750 V DC gerilim üzerinden alan, alçak zeminli araçların kullanıldığı yolcu taşıma kapasitesi en düşük olan raylı toplu ulaşım sistemidir. Ortalama ticari hızları 25-35 km/sa civarında

olup yolcu indirmek veya bindirmek için yaklaşık her 300-500 metrede bir durakları mevcuttur [42].



Şekil 2. 3 Tramvay (İstanbul)

2.1.5 Banliyö

Banliyö sistemleri genellikle şehir dışındaki yerleşim yerlerine yolcu taşımak için kullanılan sistemlerdir. Güvenli ve konforlu bir şekilde yüksek kapasitede yolcu taşıyabilir. İstasyonlar yerleşim yerlerine göre belirlenir. Demiryollarına ait hatları kullanabilmesi bir avantajdır. Hat genişliği 1435 mm olan bu sistemler besleme enerjisini katener sisteminden genellikle 15-25 kV AC gerilim seviyesinden sağlanmaktadır.



Şekil 2. 4 Banliyö hattı (İstanbul-Pendik)

2.1.6 Maglev Trenler (Magnetic Levitation Trains)

Bir nesnenin manyetik güç aracılığıyla hareketinin sağlandığı teknolojiler için Maglev terimi kullanılmaktadır. Maglev sisteminde hat boyu bobinlere alternatif akım verilerek manyetik alan oluşturulup trenin mıknatıslarınının kilitlenmesi sağlanır. Böylece aracın mıknatısları ile yol boyunca bulunan bobinler, aracın dogrusal hareketini sağlayan, tek bir senkron motor oluşturur. Araç hızı bobinlere verilen akım frekansının değiştirilmesi ile denetlenir [42].



Şekil 2. 5 Maglev tren (Almanya)

2.1.7 TOS (Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler)

Raylı sistemlerde tam otomatik veya sürücüsü olmayan sistemler yaygınlaşmaktadır. Yeni açılan Üsküdar - Çekmeköy metro hattı sürücüsüz sistemlere örnek olarak verilebilir. Hareketli blok ve sabit blok sistemlerinde tam otomatik bilgisayar kontrollü tren sürüşü olanak sağlamaktadır. TOS sisteminin avantajları güvenlik, emre amadelik, yüksek kalitede hizmet, yüksek işletme esnekliği, düşük bakım maliyeti ve minumum çevresel etkidir [43].



Şekil 2. 6 Sürücüsüz tren

2.2 Raylı Sistemlerde Temel Yapılar

Raylı sistemler demiryolu ve elektrifikasyon sistemi olmak üzere iki temel yapıdan oluşmaktadır. Demiryolu kısmı alt yapı, ray inşası, istasyon inşası gibi işleri kapsarken elektrifikasyon ise araçlar, güç merkezleri, katener sistemi gibi yapıları kapsamaktadır.

2.2.1 Raylı Sistem Elektrifikasyonu

Şehir içi elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde hat boyunca tesis edilmiş transformatör merkezlerinden gelen AC veya DC gerilim araçlara iletilmektedir. AC akım ile çalışan sistemlerde doğrultucu gurubuna gerek duyulmadan belirlenen AC gerilim değerlerine indirilerek cer gücü enerjisi temini sağlanır. Enerji iletimi için katener, rijit katener veya 3. ray gibi yapılar kullanılmaktadır.

Raylı sistemlerin elektrifikasyonu aşağıdaki sistemlerden oluşmaktadır.

- Güç merkezleri
- Katener sistemi veya 3. ray
- Sinyalizasyon sistemleri
- Haberleşme sistemleri

- Uzaktan kontrol (SCADA) sistemleri
- İstasyon ve diğer sabit tesislerin elektrik-elektronik işleri

Ana demiryollarında yaygın olarak 25 kV AC, tek fazlı 50 Hz frekanslı sistem veya 750 V DC sistem kullanılır. Banliyö türü sistemler genelde AC yüksek gerilim kullanırken özellikle tramvay ve metro gibi sistemlerde 600 V, 750 V, 1500 V veya 3000 V DC gerilim kullanılmaktadır. Bu sistemlerin dışında bazı ülkelerde kullanılan farklı sistemler de vardır; Orta Avrupa'da 15 kV AC 16,6 Hz frekanslı tek fazlı sistem, Afrika'da 50 kV sistemler ve bazı ülkelerde 3000 V DC sistemler örnek verilebilir [42] .

Aşağıdaki şekilde Metro İstanbul AŞ firmasının işletmesini yaptığı İstanbul içinde yer alan metro ve tramvay hatlarının elektrifikasyon sistemi hakkında bilgiler paylaşılmıştır [44].

Çizelge 2. 1 Örnek Raylı Sistem Projeleri

HAT İSMİ	GERİLİM SEVİYESİ	KATENER SİSTEMİ	SİSTEM TİPİ
M1	750 V DC	KONVANSİYONEL	LRT
M2	750 V DC	3. RAY	METRO
M3	1500 V DC	RİJİT	METRO
M4	1500 V DC	RİJİT	METRO
T1	750 V DC	KONVANSİYONEL	TRAMVAY
T4	750 V DC	KONVANSİYONEL	TRAMVAY

2.2.1.1 Güç (Transformatör) Merkezleri

Raylı sistem hatlarında araçların ve istasyonların elektrik enerjisi, hat boyunca devam eden transformatör merkezleri tarafından karşılanmaktadır. Bu merkezler tramvay ve hafif metrolarda istasyonlardan bağımsız iken metrolarda istasyonlarla aynı bölgede yer

almaktadır. Bu güç merkezlerinin adedi ve konfigürasyonu raylı sistem tipine ve hat uzunluğuna göre değişmektedir.

AC sistemler genellikle ana hat uygulamalarında kullanılırken, hemen hemen dünyadaki bütün toplu ulaşım sistemleri DC yapılarla beslenir. Toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan gerilim düzeyleri 3000 V DC'ye kadar çıkar. Bazı ülkelerde, 1500 ve 3000 V DC sistemler de ana hat uygulamalarında kullanılmaktadır.

AC sistem ve DC sistem arasındaki temel fark, DC sistemlerde şebekeden alınan elektrik güzergah üzerindeki transformatör merkezlerinde uygun DC gerilimlere doğrultularak hatta verilirken, AC sistemlerde indirici ve doğrultucular tren üzerinde bulunur. Yüksek kapasiteli alçak hızlı sistemlerde trenler kısa sefer süreleri ile çalışıyorlarsa, DC sistem AC sistemden daha ekonomik olur. Buna karşılık, yüksek hızlı şehirlerarası çalışan ve sefer süreleri daha uzun olan trenler için AC sistem daha ekonomiktir. Dünya genelinde tren gerilim seviyeleri belirli değerler aralığında çalışmakta olup bu değerler EN 50163 standardında tanımlanmıştır. İlgili değerlerin gösterimi Çizelge 2. 1'de yapılmıştır [45].

Çizelge 2. 2 Raylı sistem elektrifikasyonu gerilim seviyeleri

	Un	Umin2	Umin1	Umax1	Umax2
DC 600 V	600		400	720	770
DC 750 V	750		500	900	950
DC 1500 V	1500		1000	1800	1950
DC 3000 V	3000		2000	3600	3900
AC 15 kV	15000	11000	12000	17250	18000
AC 25 kV	25000	17500	19000	27500	29000

Un: Nominal gerilim
Umin1: En düşük kalıcı gerilim
Umin2: En düşük geçici gerilim
Umax1: En yüksek kalıcı gerilim
Umax2: En düşük geçici gerilim

Güç dağıtımının fonksiyonu, şalt tesisine belli gerilim ve frekans değerlerinde gelen enerjiyi, tüketiciye nominal değerleri sağlayacak şekilde ulaştırmaktır. Şalt tesisi tipleri şöyle özetlenebilir:

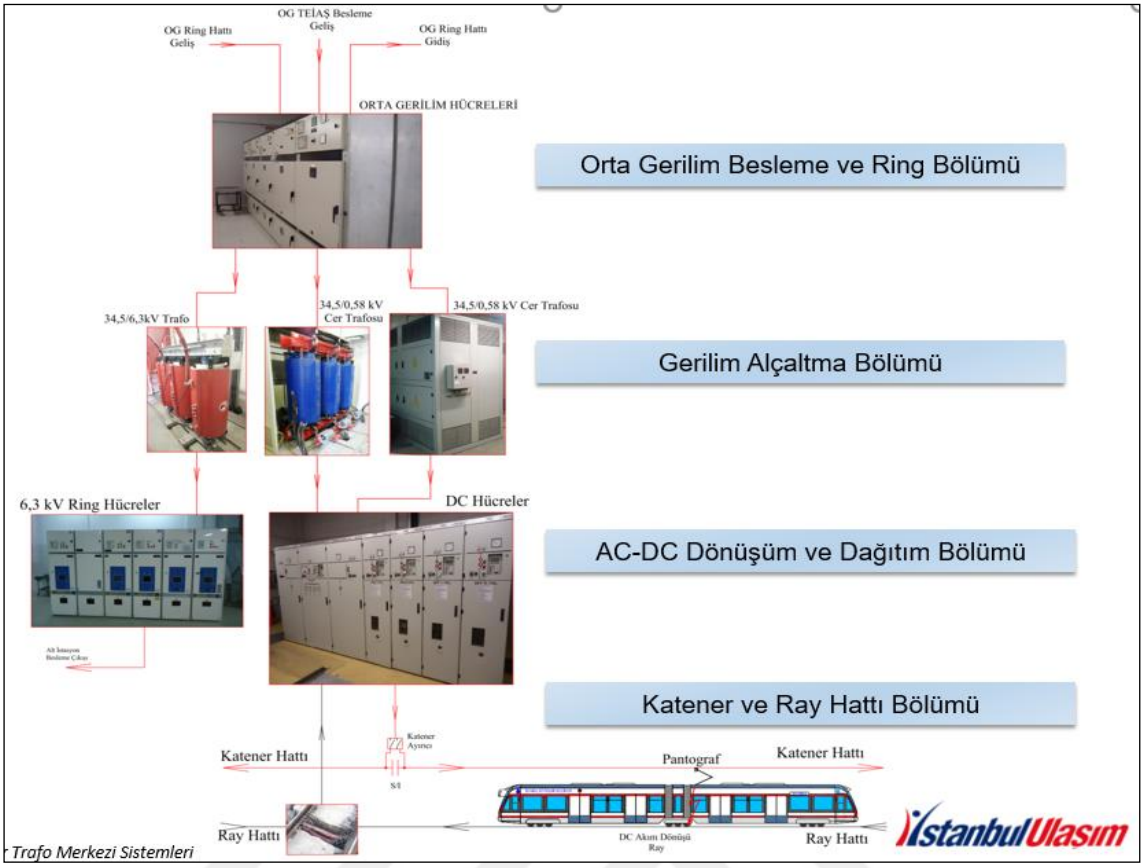
Transformatör Merkezleri: İletim hattından nominal frekansta alınan gerilim, katener sistemine tek fazlı AC gerilim olarak verilmektedir.

Cer Gücü Redresör Merkezi: Şebekeden alınan üç fazlı AC gerilimi, sistem için uygun DC gerilime dönüştürerek katener sistemine veren merkezlerdir.

Merkezi Olmayan Dönüştürücü Merkezi: Şebekeden alınan üç fazlı AC 50 Hz frekanslı gerilim, makine veya güç elektroniği devreleri ile AC 16,7 Hz gerilime dönüştürülerek sisteme verilir.

Anahtarlama Postaları: Farklı şalt sistemlerinden enerjiyi alarak, besleyeceği kısmın özelliklerine uygun enerjiyi cer sistemine veren veya farklı kısımlar arasında bağlantı sağlayan gruplamalardır.

Transformatör merkezleri TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) yüksek gerilim şalt tesisi üzerinden fider aracılığı ile mevcut OG şalt sistemine bağlanır. OG şalt sisteminde doğrultucular 750 V DC katener beslemeli sistemlerde AC 36kV / 580V'luk transformatörler üzerinden beslenirken M5 Hattı gibi 1500 V DC katener beslemeli sistemlerde 36kV / 1200 V'luk trafolar üzerinden beslenir. Her transformatör merkezinde ikili sistem bulunmaktadır. İkili sistem iki doğrultucu transformtörü ve iki doğrultucu ile dört adet çıkış fiderinden oluşmaktadır. Doğrultucular 580V AC gerilimi 750 V DC nominal gerilime 1200 V AC gerilimi ise 1500V DC gerilime çevirirler. Eskiden bu merkezlerde 6-darbeli dönüştürücü kullanılırken günümüzde 12-darbeli dönüştürücüler tercih edilmektedir. Elde edilen bu DC gerilim DC şalt sistemi kesici ve ayırıcı üzerinden geçerek havai hat katener sistemini veya 3.ray sistemini besler ve pozitif tarafı oluşturur. 750 V DC ile 600 V DC şalt tesisleri arası mesafe 2-3 km'yi bulurken, 1500 ve 3000 V DC beslemeli sistemlerde bu mesafeler daha büyüktür. 1500 V'luk sistemler 750 V' luk sistemlere göre, elektrik hatlarından daha az akım çekerler dolayısıyla bu da iletken kayıplarında ($P_k=I^2.R$) ve kesitlerinde azalma sağlamaktadır. Bu nedenlerden ötürü, yeni inşa edilen metro hatlarında, örneğin M4 ve M5 gibi, 1500 V DC tercih edilmektedir. Kent içi raylı sistemlerde yolcu güvenliği dikkate alınarak, çok yüksek gerilimler kullanılmamaktadır. Şalt tesislerinin çıkış gücü tramvay sistemlerinde 1-2 MW arasında değişirken ağır metro sistemlerinde bu değer 10 MW mertebelerine kadar çıkmaktadır.

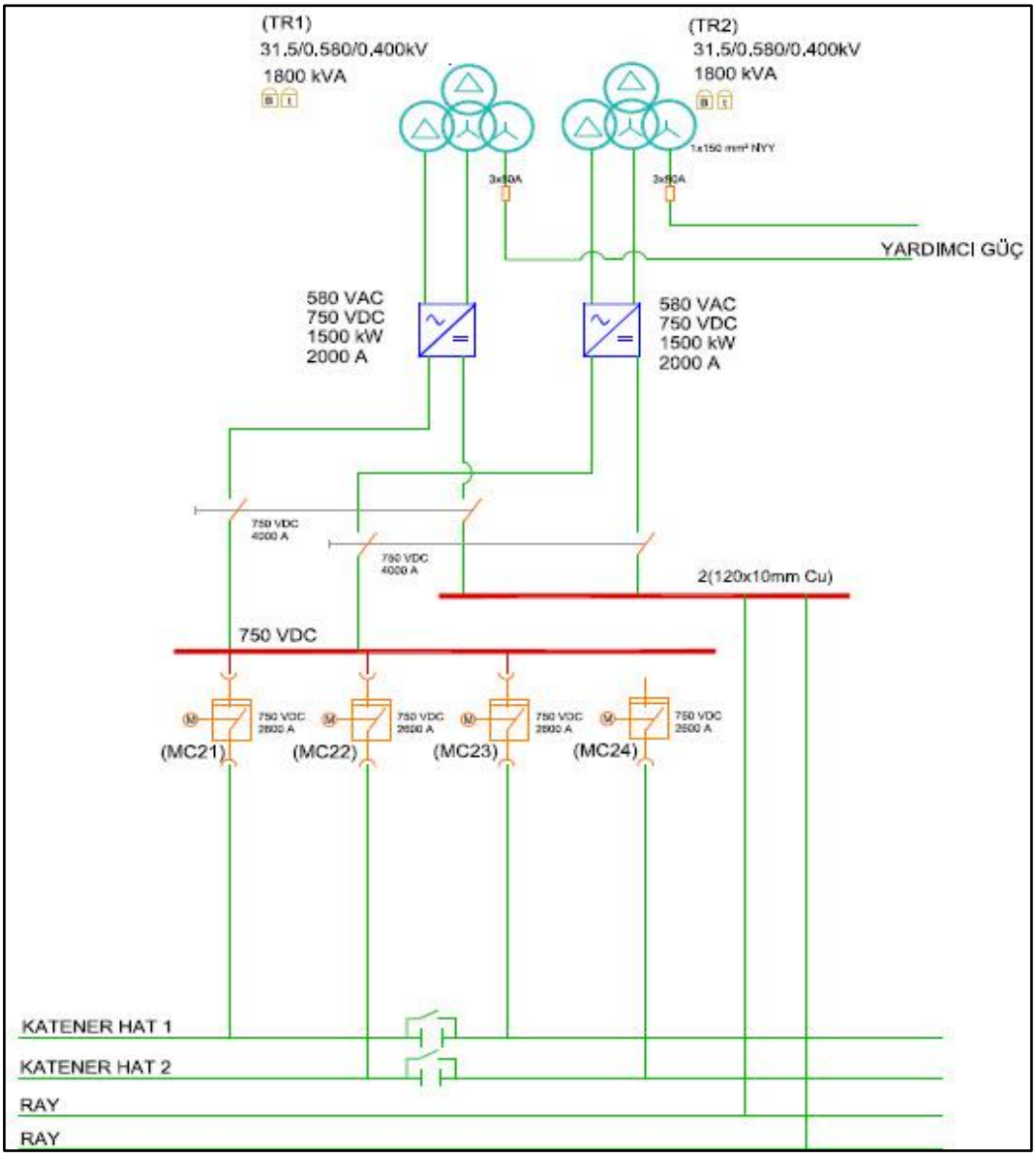


Şekil 2. 7 Transformatör merkezi ekipmanları [44]

Kentsel DC beslemeli raylı sistem hatlarında, raylar bir iletken gibi elektriksel devreyi tamamlayan eleman görevi görmektedir. Transformatör merkezinde doğrultucunun pozitif ucundan çıkan ve katenere gelen DC besleme akımı, araç tekerinden geçtikten sonra raylar üzerinden devam ederek tekrar transformatör merkezinde doğrultucu negatif ucuna bağlanır ve devresini tamamlar. Böylece DC devre tamamlanmış olur.

Elektrikli raylı ulaşım sistemleri güç temininde iki temel tüketici bulunmaktadır: Cer gücü ve yardımcı güç tesisleri. Cer (çekiş) gücü, trenleri besler. Yardımcı istasyonlarda bulunan asansörler, yürüyen merdivenler, aydınlatma, ısıtma-soğutma, havalandırma, haberleşme gibi sistemler tarafından kullanılmaktadır.

Yardımcı güç temin sistemi indirme, doğrultma ve dağıtma fonksiyonlarını sağlayan cer gücü transformatör merkezi, istasyon transformatör merkezi ve 34,5 kV ana iletim hattı ile enterkonektedir.



Şekil 2. 8 Katener sistemi besleme tek hat şeması [46]

Şekil 2. 8'de verilen bir cer gücü trafo merkezi şu bileşenlerden oluşmaktadır:

- Redresör trafosu
- Redresör
- DC şalt hücreleri
- OG şalt hücreleri
- Ana dağıtım trafosu
- AG dağıtım sistemi

- Yardımcı güç panoları
- Kesintisiz güç kaynağı (UPS)
- 110 V DC veya 48 V DC besleme aküleri
- Uzaktan izleme ve kumanda sistemi (PLC)

2.2.1.2 Havai Katener Sistemi

Elektrikli vasıtalara her türlü iklim ve çevre şartlarında, demiryolunun çeşitli geometrik şekillerinde, belirlenmiş hızda kesintisiz, araçlrın pantografları vasıtasıyla elektrik enerjisini aldığı, can ve mal emniyetine zarar vermeden elektrikli vasıtalara elektrik enerjisi sağlayan elektrikli cer hava hatlarına, havai hat katener sistemi (Overhead Catenary System- OCS) denilmektedir. Fiziki yapısından kısaca bahsedecek olursak, seyir teli (kontak teli), katener teli (taşıyıcı veya portör teli), iki tel arası iletken teller ve bunların asılması ile izolesini sağlayan direkleri ile izolatörler, konsollar ve çeşitli ekipmanlardan oluşmaktadır.

Bu sistemlerin kuruluş amacı, demiryolları boyunca tesis edilmiş olan transformatör merkezlerinden gelen AC veya DC gerilim ile araçları beslemektir. 1500 V ve üzeri gerilimlerde katener sisteminin kullanılması zorunludur. Dolayısı ile ana hat demiryolu işletmeciliğindeki tüm elektrikli hatlar katener sistemleri ile donatılmıştır.

Kullanılacak katener sisteminin yapılanmasını belirleyen başlıca faktörler: o hattaki trenlerin maksimum hızı, trenler arası sefer süresi, tren özellikleri ve transformatörlerin konumlandırılmasıdır.

Herhangi bir elektrikli raylı sistemin katener iletken kesiti ve transformatör merkezleri arasındaki mesafenin uygun değerlerde seçilebilmesi için sistemin tüm karakteristiklerini gözönünde bulunduran detaylı bir simülasyon yapılmalıdır.

Şekil 2. 7'de ekipmanları gösterilen katener sistemi ile ilgi tanımlar aşağıdaki gibidir:

Seyir Teli: Seyir teli (kontak teli) elektrikli cer ünitelerinin pantografları aracılığı ile elektrik alamsını sağlayan, yani enerjiyi taşıyan teldir. Elektrikli ver ünitelerinin pantografları seyir teline sürtünerek elektrik akımını alırlar.

Portör Teli: Katener hatlarında seyir telinin üzerinde ikinci bir sert çekilmiş örgülü bakırdan oluşan tel seyir teline eşlik eder. Bu ele portör teli veya taşıyıcı tel adı verilir. Görevi seyir telini taşımak ve seyir telinin her daim dümdüz olması, eğrilmeden esnemeden durmasını sağlamaktır.

Pandül Teli: Örgülü bakırdan çekilmiş olan pandül (askı) teli, seyir telinin portör teline asılmasını ve böylece seyir telinin sehimsiz çalışmasını sağlayan teldir. Aynı zamanda akım iletme görevini de üstlenir.

Sehim: İki askı noktası arasındaki iletken telin düşey olarak sarkmasına sehim denir.

Seyir Teli Yüksekliği: Ray mantarı üst kodundan seyir teline olan mesafedir.

Sistem Yüksekliği: Seyir teli ile portör teli arasındaki mesafedir

Dezeksman (Gezinme): Pantografların seyir (kontak) teline temas eden kömürlü kısımlarının homojen bir şekilde aşınmalarını sağlamak için kontak telinin zikzak yaparak ilerlemesine dezeksman denir.

Kurb: Katener hattına ait yolun düz olmayan virajlı kısımlarına verilen isimdir.

Aligman: Katener hattına ait yolların düz olan kısımlarına denir.

Span: İki direk arasındaki mesafedir. Aligmanda direk arası mesafeler uzun, kurb bölgelerinde de daha kısa olmaktadır.

Etap: Katener sisteminin mekaniği gereği hattı yekpare yapmak veya istenildiği kadar uzatmak mümkün değildir. Böyle bir durum, mümkün olmadığı gibi bakım ve katener hattının işletimi açısından da sorun teşkil edecektir. Bundan dolayı havai hat katener sistemi bölümlere ayrılmıştır. Bu bölümlere etap denilmektedir. Sistemin kesintisiz olması için etaplar hat boyunca ekipman bölgeler ile birbirine irtibatlandırılmıştır.

Ekipman Bölge (Overlap): Bir etabın bitip diğer etabın başladığı çakışma bölgesine ekipman bölge denir. Ekipman bölgelerde elektriksel olarak sürekliliğin sağlanması amacıyla tertip edilen düzeneğe ekipman denir.

Seksiyon (Section, Sekşın, SI) Bölgesi: Koruma, işletme ve bakım kolaylığı sağlamak amacıyla, bir transformatör redresör merkezinin beslediği havai hat bölgesi diğer transformatör redresör merkezinin beslediği havai hat bölgesinden ayrılmış / izole

edilmiştir. Bu izolasyonu sağlayan ekipmana seksiyon izolatörü (SI), transformatör merkezlerinin'nin beslediği her bölgeye de seksiyon bölgesi denir.

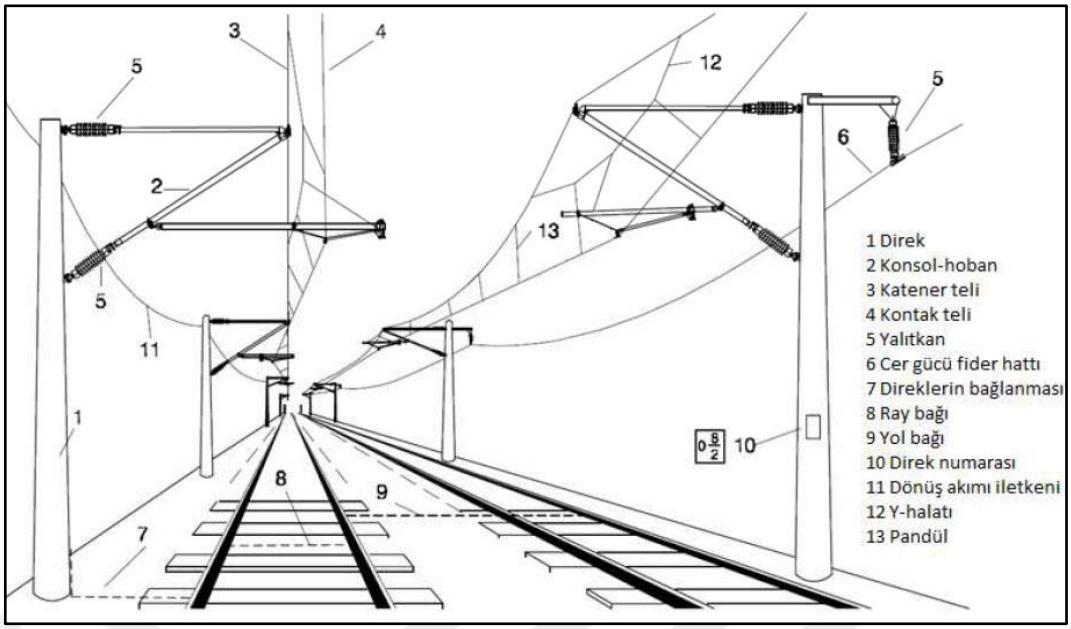
Besleme Bölgesi: Her transformatör merkezinin yakınlarındaki havai hat katener sistemi üzerinde bulunan ve havai hat ayırıcılarından oluşan bölgedir.

Elle Kumandalı Ayırıcı: Havai hat üzerinde bulunan sisteme göre akım taşıma kapasitesi olan ekipmanlardır. Elle kumandalı ayırıcılara bir kol vasıtası ile kumanda edilir. Kapalı (devrede) veya açık (devre dışı) pozisyonlarında bir asma kilit ile kilitlenmektedirler.

Motorlu Ayırıcı: Havai hat üzerinde bulunan ve sisteme göre akım taşıma kapasitesi olan ekipmanlardır. Kilitli ve emniyet anahtarlı bir dolap içerisindeki elektrik motorunun doğrudan veya hidrolik sistem vasıtası ile tahrik ettiği mekanik aksam ile kumanda edilir. Motorlu ayırıcılara hem uzaktan (Scada) hem de yerel olarak komut verilebilir

Antişominman (Mid-Point): Otomatik gerdirme sistemleri ile etabın her iki başından gerdirilmiş iletken tellerin, mevsimsel değişikliklerde nominal gerilme derecesinde kalması için etabın orta noktasında sabitlenmesine antişominman (mid-point) denir.

Konvensiyonel katener sistemi dışında yeni teknoloji sayılan rijit katener sistemi de günümüzde kullanılmaktadır. Rijit katenerde alüminyum kompozit dış çerçeve ve bakır kontak teli katener iletkenlerini oluştururlar. Bakımlarının az ve kolay olması, mekaniksel arıza azlığı, sabit ve bütünsel yapısı, akım taşıma kapasitesi gibi avantajlarından dolayı özellikle yeni yeraltı metro hatlarında 3.ray sistemi yerine tercih edilmektedir. En önemli avantajlarından biri, konvensiyonel katener sistemleri ile beraber aynı hat içerisinde kullanılabilmeleridir.



Şekil 2. 9 Katener sistemi ekipmanları [46]

2.2.1.3 Sinyalizasyon ve Haberleşme

Tramvay, Hafif Metro (LRT, light rail transit) ve Metro sistemlerinde hızlı, dakik ve emniyetli ulaşım önemlidir. Raylı ulaşım sistemlerinde emniyet ve dakiklik sinyalizasyon sistemleri ile sağlanır. Sinyalizasyon sistemi raylı sistemlerde emniyet bütünlüğü seviyesini (SIL) belirler. Metrolarda SIL4 ve tramwayda ise SIL2-3'tür. Sinyalizasyon sistemi ile sağlanan emniyet sayesinde yolcuların karşılacağı riskler düşürülmektedir [46].

Sinyalizasyon sistemi 2 ana öğeden oluşur. Bunlar saha Ekipmaları (Ray devreleri, Otomatik Makaslar, Sinyal Lambaları, Trenle haberleşme ekipmanları) ve merkezi anklaşman (interlocking) yazılımıdır [46].

Sinyalizasyon sistemi temel ögeleri aşağıda açıklanmıştır:

Ray devreleri: Trenlerin konumlarının belirlenmesinde kullanılır, izole cebre ray devreleri, kodlu ray devreleri, aks sayıcı ray devreleri, hareketli blok ray devreleri gibi çeşitleri vardır [46].

İzole cebireli ray devreleri: Raylar izole cebireler ile birbirinden elektriksel olarak ayrılır ve bu bölgelere gerilim uygulanır. Gerilimin kontrol edilmesi ile tren olup olmadığı anlaşılır. Eğer bölgeden geri dönüş gerilimi algılanıyorsa hattın o bölgesinde tren yoktur. Bölgede tren var ise rayları kısa devre olacağından dolayı geriye dönüş gerilimi alınmaz ve o

bölgede tren var olarak algılanır. Yani, gerilim varsa tren yok, gerilim yoksa tren vardır. Bunun sebebi ise, hata emniyetli şekilde çalışma mecburiyetidir. Arıza gibi sebeplerden dolayı uygulanan gerilim geri alınamazsa, o bölgede trenin olduğu farzedilir ve sistemde arıza olsa dahi en emniyetli duruma geçeceği için kazalar önlenir [46].

Kodlu ray devreleri: Bu sistemlerde ray bölgeleri arasında kapasitif ayırıcılar kullanılır. Aracın varlığının kontrol edileceği bölgede rayın bir ucundan ses frekansı verilir ve rayın diğer ucundan bir alıcı tarafından alınır. Eğer ses frekansında oynama, sapma gibi durum var ise, tren varmış gibi düşünülerek bölge kilitlenir. Kısa mesafeler trenler arası sefer sürelerinin düşük olduğu işletmelerde kullanılması avantajlıdır [46].

Aks Sayıcılı Ray Devreleri: Genellikle şehirlerarası raylı sistemlerde kullanılır. Sistem ray bölgesine giren aksları sayar ve giren-çıkan aksların eşitliğini kontrol eder, eğer eşit değil ise bölgede tren var olarak algılar [46].

Hareketli Blok (Moving Block) Ray Devreleri: Sistemde sanal ray devreleri kullanır. Ray devrelerinin uzunluğu trenin hızına, fren mesafesine, fren gücüne, eğim ve virajlara bağlıdır. Kontrol merkezindeki sistem trenlerin önündeki mesafeyi otomatik olarak ayarlar ve trenin hızını düşürür veya yükseltir. Genellikle 90 sn ve altındaki hat kapasitelerinde kullanılması daha ekonomiktir [46].

Sinyaller: Her ray bölgesinde, yol girişlerinde, makas ve istayon bölgerlerinde karayolu trafik ışıkları gibi trenlerin ilerlemesini veya durmasını kontrol eden trafik ışıkları bulunur. Genellikle dur komutunu geçen trenler otomatik olarak durdurulur ve güvenli seyir sağlanır. Hareketli blok sinyalizasyon sisteminde bloklar değişebileceği için hat boyunca sinyaller yoktur. Sadece istasyon veya makaslarda ihtiyaca göre konulabilir [46].

Makaslar: Trenlerin yön değişimleri makaslar yardımı ile olur. Makaslar, sinyalizasyon sisteminde yine aksamaya karşı korumalı (fail-safe) mantığına göre bölgede araç olduğu veya geçtiği durumda komut almazlar. Makasların konumu ile ilgili bir şüpheli durum olduğunda da yine makasın kumandasına izin verilmez [46].

Tren üstü ekipmanlar: Trenlerin üzerinde sinyalizasyon sisteminden gelen bilgileri alan ve ona göre treni hareket ettiren veya hareketini yönlendiren elektronik ünitelerdir. Trenin sinyale göre hareket etmesi sistemin en önemli bileşenidir [46].

Merkezi anklaşman (interlocking): Kumanda merkezinde tüm hat boyunca ekipmanların bilgileri toplanır. Bu bilgilere göre trenin bir ray bölgesine girmesine izin verilip verilmeyeceğine karar verilir. Bir makas veya ray bölgesine herhangi bir tren girdiğinde o tren bu ray bölgesini terk edene kadar bölge kilitlenir ve bölgede herhangi bir işlem yapılmasına izin verilmez. Bu şekilde trenler izin verilen bloktan diğer bloğa girmesi engellenmiş olur.

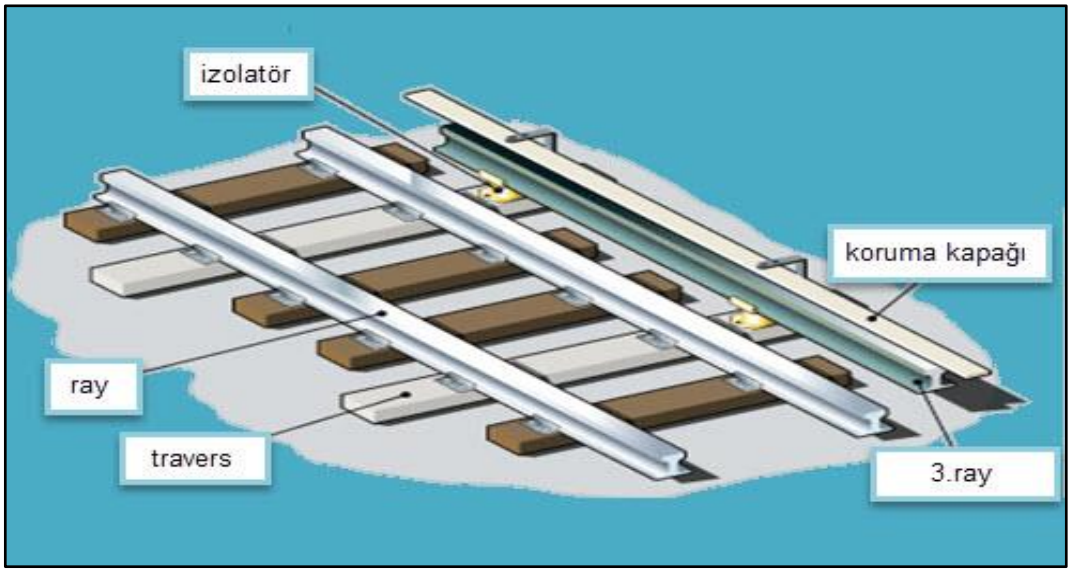
Merkezi kilitleme sistemi geçmişte röleler vasıtası ile yapılmakta idi. Yani meşgul olan bölgenin rölesi çeker ve diğer komutlar uygunamazdı. Yeni sistemlerde ise artık yazılımsal anklaşman sistemleri kullanılmaktadır. Merkezi kilitleme sistemleri en az 2 adet endüstriyel bilgisayardan oluşur ve yapılan işlemler her iki bilgisayarda ayrı ayrı kontrol edilerek sonuçlar karşılaştırılır. Eğer sonuçlarda farklılık varsa komut uygulanmaz [46].

Kilitlemenin fonksiyonları:

- Trenin gideceği güzergah dışındaki bütün yollar merkezi anklaşman (interlocking) sistemi tarafından kilitlenir.
- Trenin yön değiştireceği her noktada rota kilitleme ile yol tanzimi yapılır. Bütün elektrik motorlu makaslar doğru posizyona alınır ve mekanik olarak kilitlenir.
- Sinyal tanzimi yapılan alanda, yani trenin seyredeceği bölgede trenin varlığının takibi yapılır.
- Kilitlenen bölgeden trenin geçişi ile beraber diğer trenlerin geçişine müsaade edilebilmesi için otomatik serbest bırakılır [46].

2.2.1.4 Üçüncü Ray Sistemleri

Üçüncü ray sistemi, genel olarak taşıyıcı raylarla aynı seviyede bulunan elektriğin araca iletilmesini sağlayan ve metro sistemlerinde kullanılan bir yapıdır. Raylı sistem aracı, üçüncü raydan enerjiyi, araçların her iki tarafında bulunan ray pabucu yardımı ile alır. Trenin hareketi için bir taraftaki pabucun üçüncü raya temas etmesi yeterlidir. Ray pabucunun üçüncü raya olan teması yandan, alttan veya üstten şeklinde farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 2. 10 Üçüncü ray sistemi

2.2.2 Demiryolu Alt Yapısı

Raylı sistemde demiryolları altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Raylı sistem güzergahlarında hat profili düşük ve yüksek kotlardan oluşabilmektedir. Bu bölgelerin doldurulması, kazılması, delinmesi, tesfiyesi ve sıkıştırılması gibi işlemler altyapıyı oluşturmaktadır. Platformlar, dolmalar, tüneller, yarmalar, geçitler, köprüler, tahkimatlar altyapı elemanlarıdır. Şehir içi raylı sistemlerde ray altı dolgu betonu da altyapı elemanlarındandır.

Demiryolunda altyapı üzerine kurulan, üzerinde ray, travers balast, makas ve bunların bağlantı malzemelerinin tamamı üst yapıyı oluşturmaktadır.

Raylı sistem demiryolu ile ilgili tanımlar aşağıdaki gibidir.

Aliyman: Demir yolunun doğru (düz) kısımlarıdır.

Kurp: Aliymanları birleştiren, yolun eğri kısımlarıdır. En muntazam eğri parçası, bir dairenin yayı olacağından demir yolu kurpları da yarıçapı belli bir dairenin yayıdır.

Yarıçap: Demir yolu kurplarında çap kullanılmaz, yarıçap kullanılır ve “R” harfi ile ifade edilir.

Dever: Bir kurp da merkez kaç kuvvetini yenebilmek için, iç raya göre dış raya verilen yükseklik fazlası.

Varyant: Yolun çesitli sebeplerle güzergahı değiştirilmiş kısımlarıdır.

Makas: Demir yolu araçlarının bir yoldan diğer bir yola geçmesini sağlayan yol tesisine denir.

Eğim: Yolun iki değişik yükseklik arasındaki kısmına denir. Demiryollarında meğil binde olarak gösterilir. Yükseklik farkının, yükseklikleri farklı iki nokta arasındaki yatay mesafeye bölünmesi ile elde edilir.

Ekartman (Yolun açıklığı): Ray mantarı ile iç yanakları arasındaki yatay mesafeye denir.

Ray: Üzerinde demir yolu araçlarının rahat hareket etmelerini sağlamak, demir yolu araçlarından gelen ağırlıgı ve etkileri traverslere iletmek için döşenmiş demir çubuklara denir.

Travers: Raydan gelen yükleri, daha geniş bir yüzeye yayarak, balasta ileten, yolun açıklığını saptayıp, koruyan ve yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, rayın altına döşenmis yol üstyapı malzemesine “travers” denir.

Balast: Platformun üstüne döşenen, traverslerin aralarını dolduran ve traverse yataklık eden, sert ve sağlam taşlardan 30-60 mm ebadında, kırılmış, keskin köşeli ve keskin kenarlı kübik şekilli malzemeye balast denir [46].

BÖLÜM 3

RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKSEL ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Elektrik enerjisinin kullanıldığı bütün sistemlerde enerji tasarrufu olgusu başlıca çalışma konularındandır. Raylı toplu taşıma sistemlerinde de büyük güç tüketimleri gerçekleştiğinden enerji tasarrufu çalışmaları önem arz etmektedir. Bununla birlikte, artan kapasite talepleri ve yükselen enerji maliyetleri ile diğer ulaşım türlerinin çevresel performanslarını önemli ölçüde iyileştirdiği bir ortamda, şehiriçi demiryolu işletmeleri, hizmet kalitesini etkilemeksizin enerji kullanımını en aza indirgemelidir.

Ulaşım, gelişen ve gelişmekte olan ülkelerde en çok enerji tüketen ve çevreyi kirleten sektörlerden biridir. Örneğin, Avrupa birliğinde, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %31'inin ulaşım kaynaklı olduğu belirtilmektedir [1]. Bu nedenle, çevreci toplu taşıma sistemlerine olan ilgi hızla artmaktadır. Şehiriçi raylı ulaşım sistemleri yüksek taşıma kapsitesi, güvenliği, güvenilirliği ve çevresel performansı nedeniyle, çözüm olarak görülmektedir. Bundan dolayı, son yıllarda demiryolu sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için çeşitli enerji verimliliği çalışmaları yapılmaktadır.

3.1 Frenleme Enerjisinin Geri Kazanılması

Trenler hareket ve yükseklik kazandığı durumda kinetik ve potansiyel olarak enerji kazanır. Bu enerji motorların frenleme durumunda generatör olarak çalışması sayesinde elektrik enerjisine çevrilebilir. Üretilen elektrik enerjisi, katener sistemine geri besleme ile tekrar verilebilir. Bu olay, rejeneratif frenleme olarak bilinir ve çoğunlukla raylı sistemlerde

kullanılır [47]. Rejeneratif frenleme, araçların frenleme enerjisini elektrik enerjisi olarak geri kazanmak ve tekrar kullanmak olarak ifade edilebilir. Bu teknoloji, tipik olarak çok sayıda ve sık duruşlarla karakterize olduklarından dolayı, şehir içi raylı sistemlerde enerji tüketimini azaltmak için büyük bir potansiyel oluşturulabilir [48]. Açığa çıkan fren enerjisi hatta bulunan diğer trenler tarafından kullanılır veya araçların frenleme dirençlerinde yakılarak harcanır.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, teorik olarak, hatta kullanılan toplam enerjinin tren işletme sıklığına bağlı olarak yaklaşık %40'ı frenleme enerjisinin geri kazanımından sağlanabilir. Trenlerin 3 dakika veya altında işletildiği hatlarda, frenleme esnasında üretilen enerjinin büyük kısmının diğer trenler tarafından kullanılmakta olduğu bildirilmektedir [43]. Yoğunluğu daha az olduğu hatlarda, enerjinin büyük kısmı sargı dirençlerinde yakılmakta ve ortama ısı şeklinde verilmektedir. Bu bağlamda, enerji depolama teknolojileri aracılığı ile işletme maliyetlerine ilişkin önemli ölçüde enerji tasarrufu gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

3.2 Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama sistemlerine (EDS), olan ilgi son yıllarda önemli oranda artmıştır. Hem güç elektroniği hem de enerji depolama sistemlerindeki gelişmeler, enerji depolama sistemlerinin, şehiriçi raylı sistemlerde rejeneratif frenleme enerjisini yeniden kullanmak için bir seçenek haline gelmesini sağlamıştır. Enerji depolama sistemleri, tren üzerinde (On-Board) veya hattın belirli noktalarında (Wayside) kurulabilir [49]. On-board EDS, demiryolu araçlarının kendi fren enerjilerini geçici olarak saklamasına ve bir sonraki hızlanma evrelerinde kullanmalarına imkan sağlamaktadır. Öte yandan, hat kenarına kurulan EDS'ler yakın çevresinde bulunan trenlerden frenleme enerjisi toplamakta ve diğer hızlanan araçlar talep ettiği zaman serbest bırakmaktadır.

Uygun boyutlandırıldığında hem On-board hem de Wayside EDS'leri şehiriçi raylı sistemlerde kayda değer bir cer enerji taasrrufu sağlayabilir. Şebeke geriliminin stabilize edilmesine ve güç tüketiminin pik değerlerini kesmesine katkıda bulunabilirler. Buna ek olarak, tren üzerindeki EDS sistemleri katenersiz bölgeler için belirli dereceye kadar özerklik sağlayabilir (örneğin, tarihi şehir merkezlerinden geçen hatlar).

Kentsel demiryollarında kullanılacak EDS'ler için, elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (Electrochemical Double Layer Capacitor EDLYC), piller / bataryalar ve volanlar en uygun depolama seçeneklerdir [50,51].

3.3 Enerji Tasarruflu Sürüş

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda, bu konu farklı yönlerden incelenmektedir. Aracın enerji talebi rota, hattın eğimi, istasyonlar arası mesafe, duruş sayısı ve bunu takip eden ivmelenme hareketleri ile aracın maksimum hızı gibi değişkenlere bağlı olarak değişmektedir [2].

Günümüzde, bir sürücü faktörüne bağlı olmadan optimum sürüş stratejisini hesaplayan ve sürekli olarak güncelleyen sürüş öneri sistemleri mevcuttur. Güçlü benzetim programlarının gelişimi, mobil haberleşme ağları, ileri telematik çözümler, tren işletmesi ve tren kontrolünü etkileyen iyileştirmeler için uygun çözümler sunabilmektedir [52].

Hızlanma profilleri ve maksimum hız limitleri demiryolu hizmetlerinde çekiş enerji tüketimini belirleyen kritik faktörlerdir. Bu nedenle, emniyet ve zamanlama kısıtlamaları dahilinde, hız optimizasyonu önemli enerji tasarrufları sağlayabilmektedir. Bu tür yöntemlerde öncelik, zamandan kazanmak yerine enerjiden kazanmaktır. En basit şekli ile, tren maksimum hızda belli bir süre gittikten sonra boşta çalışma fazına alınmaktadır.

Manuel Sürüş yapılan işletmelerde eğitim yolu ile başlangıçta mümkün olduğunca yüksek ivme ile kalkış yapılarak, zaman çizelgesine göre mümkün olduğunca uzun süre boşta gitme şeklinde enerji tasarruflu sürüş teknikleri makinistlere öğretilir [13]. Bu enerji verimli sürüş tekniğinin sunduğu potansiyel, büyük oranda operasyonel veya basit teknolojik önlemler ile kullanılabilir. Bu nedenle, hat boyunca optimum hız ve süzülme noktalarını bildiren bilgi sistemlerinin kurulması ve sürücülerin verimli sürüş teknikleri ile eğitilmesi nispeten düşük yatırım maliyetleriyle önemli kısa vadeli cer tasarruflarına olanak vermektedir [53,54]. Buna ek olarak, sürüş öneri sistemleri (Driving Advice Systems: DASs), şehir içi raylı sistemlerde enerji tasarrufu için kabul görmeye başlamıştır. Her bir özgün yolculuk için tanımlanan önceden yüklenmiş algoritmalara ve verilere dayanan bu tür sistemler, makiniste çalışma saatine ve tren pozisyonuna göre en iyi stratejileri takip etmesini önerir [55,16]. Değerlendirme çerçevesinde bütün sürücülere

talimatları vermek ve buna göre eğitmek ile %10'luk bir cer enerjisi tüketimi kazancı olacağı öngörülmektedir [13].

Otomatik Sürüş sistemi günümüzde birçok yeni hatta uygulanmaktadır. Trenler sistem tarafından enerji verimli sürüş prensipleri göz önüne alınarak otomatik olarak sürülmektedir. Otomatik sürüşün avantajı manuel sürüşteki makinist ve işletme hatalarının izole edilmesidir [2]. Otomatik sürüş, demiryolu hat parametrelerine, planlanan zaman çizelgesine ve araç koşullarına dayalı olarak önerilen hız eğrisini üretir. Otomatik sürüşün kontrol stratejisi, trenin tam olarak tavsiye edilen hız eğrisi boyunca çalışmasını sağlar. Bu sürüşün kontrol stratejisi, uygulanan hızı önerilen hız ile karşılaştırarak trenin uygulanmış çekiş gücünü veya frenleme kuvvetini belirlemek ve tren duruşunun hassasiyeti, dakikliği, enerji tasarrufu ve sürüş konforu gereksinimlerini karşılamaktır [56].

3.4 Trenler Arası Süre (TAS) Yönetimi

Trenler arası süreyi ayarlamak, trenlerin frenleme esnasında ürettiği rejeneratif enerjinin daha verimli kullanılabilmesi açısından önemlidir. Rejeneratif frenleme tarafından üretilen ve diğer trenler tarafından tüketilen enerjinin alıcılığı tren işletimi için bir verimlilik ölçüsüdür. Genellikle, hattaki trenlerin yoğunluğu zirve saatler sırasında yüksektir. Aksine, yolcu sayısının çok olmadığı saatlerde düşük tren yoğunluğu için alıcılık, aynı anda bir istasyondan kalkan ve gelen trenlerin seyrekliği nedeniyle azalabilir. Enerji tasarrufu yüzdesi, daha kısa trenler arası süre (Headway) ve süzülme (Coasting) ile artar [57]. Tren frenleme esnasında rejeneratif enerjinin daha iyi kullanılmasını sağlamak için sefer süresi ayarlanarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu, rejeneratif enerjinin olabildiğince fazla kullanılmasını sağlamaktadır. Aksi taktirde, enerji ısı dağılımı ile kaybedilir [58].

3.5 Optimize Edilmiş Tren Hız Yönetimi

Hızlanma profilleri ve maksimum hız limitleri demiryolu hizmetlerinde çekiş enerji tüketimini belirleyen kritik faktörlerdir. Bu nedenle, emniyet ve zamanlama kısıtlamaları dikkate alınarak yapılacak, hız optimizasyonu çalışmaları önemli miktarda enerji tasarrufları sağlayabilmektedir.

Optimum enerji tasarrufu için hız profilinin taşıması beklenen özellikler,

- Yüksek başlangıç ivmesi,
- İstasyonlar arası mesafeyi, yolcu yoğunluğunu, zaman çizelgesini ve hat geometrisini dikkate alarak en uygun boşa alma hızı,
- Uzun boşta gitme süresi,
- Yüksek frenleme ivmesi,
- Düşük bekleme süresi, olarak sıralanabilir.

Eğer bu prensipler uygulanabilirse, sürücülerin sürüş durumlarına göre %20-30 arasında enerji tasarrufu sağlanabilir [13].

3.6 Enerji Verimli Cer Sistemi

Güç dağıtım şebekesindeki direnç kayıpları, akımın karesi ile orantılıdır. Bu nedenle, ağdaki farklı trenlerin aynı anda hızlanmasından kaynaklanan güç pik değerlerini sınırlayarak enerji kayıpları önemli ölçüde azaltılabilir. Güç kaynağı şebekesinde enerji kayıplarını azaltmak için bir başka seçenek, besleme hatları için düşük dirençli malzemeler seçmektir. Süper iletken kablolar konvansiyonel hat iletkenlerine bir alternatif teşkil edebilir. Ancak, umut verici olmasına rağmen bu teknoloji halen araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Yüksek gerilim seviyelerinde enerji iletimi ile de enerji tasarrufu yapılabilir.

Cer enerji tüketimini belirleyen başlıca faktörler şunlardır:

- Hattın geometrisi; eğimler, istasyonların sıklığı ve yerleri, kurplar (viraj), hız sınırlamaları, v.b. güzergaha bağlı kriterler.
- Araç özellikleri; kontrol lojiği, ağırlığı, yapısı, motor sistemi, araç içi yardımcı güç sistemleri, v.b. kriterler.
- Cer gücü besleme ve dağıtım sistemi; trafo merkezleri (TM) sayısı ve yerleri, katener/3. ray özellikleri, besleme düzeni, TM ekipman tipi, v.b. kriterler.
- İşletme mantığı; trenler arası süre (TAS), tren kompozisyonu, istasyon bekleme süresi, v.b. kriterler.

Bu faktörlerden bazılarında yapılacak değişiklikler ile mevcut hatlardaki toplam enerji tüketimi azaltılabilecektir [2].

3.6.1 Süper İletken Kablo İle Enerji İletimine Dayalı Enerji Verimliliği

Bu uygulamaların temeli sıfır ya da ihmal edilebilir direnç kayıplarına sahip, geleneksel bakır tellerle aynı boyutlarda olabilecek ancak çok daha yüksek akım taşıyabilen (yerine göre ~10-100 kat) yeni nesil süperiletken tel üretmektir. Günümüzün prototip çalışmaları ve tanıtımına başlanan yeni teknolojiler, çok damarlı ilk HTS (High Temperature Superconducting) tel üretiminin gerçekeştirildiğini ve yüksek performanslı bir şekilde üretildiğini göstermektedir. Bu yeni teknolojiler içerisinde uygun metallerin HTS süperiletkenler ile ince film şeklinde kaplaması ve ince film üretim süreçlerinin çeşitliliği ve kullanışlılığı ile daha düşük maliyetli ve üstün performanslı ikinci nesil (2G) HTS teller hızla ticari olarak piyasada yerini almaktadır [59].

HTS kablolar, aynı boyutlardaki konvansiyonel bakır kablolardan 3 ila 5 kat fazla güç iletebilir. Isıdan bağımsız, yoğun HTS kablolar, varolan geçiş bölgelerine döşenerek ileride tesis bünyesinde yapılabilecek büyümelerin maliyetini ve çevreye etkisini azaltmaya yardımcı olabilir. Konvansiyonel teknoloji ile imal edilen iletkenlerden daha az özdirenci olması nedeniyle, süperiletken kablolar, aşırı ısınan hatlardaki yükü iletmek ve şebeke sıkışıklıklarını azaltmak amacıyla enerji şebekelerinde kullanılabilirler [60].

Demiryolu güç iletimi için süper iletken kablo geliştirilmesi, rejenerasyon verimliliğinin artmasını, güç kaybının azalmasını, transformatör merkezleri arasındaki yük eşitlemesini ve daha küçük gerilim düşüşünden dolayı transformatör sayısının azalmasını sağlayabilecektir.

3.6.2 Araç Kütle Azaltımı

Daha hafif olan araçlar, ilerlemeye karşı daha düşük mekanik direnç gösterir ve talep edilen performans seviyesine ulaşmak için daha az kinetik enerji gerektirir. Bu nedenle, raylı taşıtın toplam kütlesinin en aza indirilmesi, çekiş enerjisi tüketimini azaltacaktır. Katener sistemleri vasıtası ile araçlara ulaştırılan enerji, servis sırasında çeşitli süreçlerde tüketilmektedir. Aracın işletme hızına ulaşıncaya kadar ivmelenmesi; Newton'un Kinetik

enerji eşitliğine göre, aracın kütlesi ve hızı enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Kinetik enerjiyi üretmek için ivmelenme gereklidir. Ancak, çok hızlı ivmelenmek gereğinden fazla enerji tüketimine sebep olur. Çünkü kinetik enerji, hızın karesi ile artmaktadır. Ayrıca, demiryolu aracının kütlesinin azaltılması yola daha az zarar verir, tekerleklerin ve frenlerin aşınmasını azaltır. Bu nedenle, sistemin işletme ve bakım masraflarını düşürür.

3.6.3 Katener Sistemlerinin Paralellenmesi

DC gerilim ile beslenen çift hatlı sistemlerde, her iki yola ait katener sistemleri veya raylar üzerindeki gerilim farklarını yok etmek amacıyla yalıtkan kablolar (jumper) ile paralellem yapılabilmektedir. Görüntüsel avantajının yanı sıra paralelleme aynı zamanda enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Hatların paralellenmesi, akım bölüşümünü arttırarak sistemin rahatlamasını sağlaması ve enerji kayıplarını azaltması gibi avantajlara sahiptir.

3.6.4 Tersinir Cer Trafoları

Diyot doğrultucular kullanan konvansiyonel DC transformatör merkezlerinin aksine, ters çevrilebilir transformatör merkezleri (çift yönlü veya evirici transformatör merkezleri olarak da bilinir), çift yönlü güç akışı sağlayan invertörleri içerir. Bu, rejenere edilmiş enerji fazlalığının güncel AC şebekesine geri döndürülebileceği ve mevcut mevzuata bağlı olarak işletmecinin şebekesinde (aydınlatma, yürüyen merdivenler, ofisler vb.) kullanılabileceği veya enerji tedarikçisine satılabileceği anlamına gelir. Tersine çevrilebilen transformatör merkezleri, EDS'ler ile karşılaştırıldığında daha az dönüşüm kaybı ile çalışırlar. Ancak, hattaki rezistif kayıplar transformatör merkezinin konumuna göre önemli olabilir. Dahası rejeneratif frenleme kaynaklı üretilen enerjiyi geri kazanma imkanı sunarlar. Ancak, katenersiz çalışmaya izin vermezler ve gerilim dengelemesi veya pik güç azaltması gibi amaçlar için kullanılamazlar. Buna ek olarak, nispeten yüksek yatırım maliyetleri sunarlar. Gerçekleştirilen bazı çalışmalar, bu teknolojinin mevcut şehir içi raylı sistemlerde cer enerji tüketiminin %7-11'ini azaltabileceğini göstermektedir [30,31].

Tersinir cer transformatör merkezlerinden beklenen faydalar şunlardır:

- Frenleme enerjisinin geri kazanım oranının artırılması ile trenler arasındaki doğal enerji transferini mümkün kılarak, fren dirençlerinin kullanımının ortadan kaldırılması, buna bağlı olarak da tren kütlesi ve ısısında azalma sağlanması,
- AC tarafta güç faktörü iyileştirilmesi ve harmonik seviyelerinin azaltılması [33].

Büyük şehirler için Bilbao metrosunda tersinir transformatör merkezi tesis edilmiştir. Sistem tarafından tüketilen enerjinin %30 ila %50'si arasında bir geri kazanım elde edilebileceği ifade edilmiştir [1].

3.6.5 Yüksek Gerilim DC İle Enerji İletimi

Yüksek doğru gerilim (HVDC High Voltage Direct Current) ile enerji iletimi son yıllarda güç elektroniğindeki gelişmeler sayesinde popülerleşmektedir. Raylı sistemlerde çok çeşitli gerilim seviyelerinde enerji iletimi mevcuttur; 600 V DC, 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC, 15 kV AC 16,7 Hz ve 25 kV AC 50 Hz. AC sistemler ana hat uygulamalarında kullanılırken, dünyanın hemen hemen tüm toplu taşıma sistemleri DC sistemle beslenir. Elektrik sistemi ve güç elektroniğindeki gelişmeler, yeni yapılan hatlarda 1500 V DC beslemeye olanak tanır. Üsküdar-Çekmeköy metro hattı 1500 V DC besleme ile çalışmaktadır.

$P_k=I^2*R$ formülünde görüldüğü gibi kaybolan güç akımın karesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, gerilim seviyesini artırmak çekilen akımı düşüreceğinden hat kayıplarını azaltacaktır.

3.6.6 Yardımcı Tesisler Tarafı Enerji Tasarruf Yaklaşımları

Bir raylı sistemin enerji tüketimi iki ana sınıfa ayrılabilmektedir; yolcuları taşıyan trenlerin tahriki (cer gücü) ve yolcuların bekleme yaptığı istasyonlar ile buralara erişim sağlayan alanların enerji ihtiyacını sağlayan yardımcı sistemlerin beslenmesi. Yardımcı tesisler şehir içi demiryolu sisteminin düzgün çalışmasını sağlamak için farklı servislerin kullandığı tüm enerjiyi kapsar. Bunlar genellikle yolcu istasyonları, depolar, sinyalizasyon sistemleri, tünel havalandırma fanları, yeraltı suyu pompaları, tünel aydınlatması, ofis-idari binalar ve bakım tesislerinin tüketimi gibi altyapı ile ilgili diğer tesislerden oluşur.

İstasyonlar ve özellikle metro istasyonları, yolcu hareketliliği ile ticari hizmetlerin birleştiği, insan ve konfor yönlerinin büyük önem taşıdığı karmaşık sistemlerdir. Ana enerji gerektiren tesisler tipik olarak HVAC (Heating, Ventilating, Air Conditioning, Cooling; Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme, Soğutma) 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, genellikle HVAC ekipmanı en büyük enerji tüketimine sebep olmaktadır [36].

Depolarda enerji tüketimi esas olarak, demiryolunun kontrolü, bakımı ve temizliğinden kaynaklanmaktadır. Bu işlemler sadece depo tesislerinin çalışması için enerji gerektirmekle kalmaz, aynı zamanda aracın aydınlatma veya HVAC gibi bazı yardımcı sistemlerinde enerji tüketimi anlamına gelir.

Kentsel raylı sistemlerdeki yardımcı tesislerin enerji tüketimi, sistemin yer altında mı yoksa yüzeyde mi işletildiğine ve iklim koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, tramvay sisteminde yarcımı tesislerin enerji tüketimi çok düşük iken, metro sistemlerinde çok daha fazladır.

Sistemin yeraltında olduğu düşünülerek, emniyetten taviz verilmeden yapılabilecek olan bazı tasarruf sağlayıcı önlemler [2]:

- İstasyon tasarımlarında mümkün mertebe güneş ışığından faydalanma,
- Aydınlatma sistemlerinin optimum şekilde sağlanması ve yüksek verimliliğe sahip elektronik balastlı lambaların kullanılması,
- Yürüyen merdivenlerde frekans sürücüleri uygulamaları,
- Yürüyen merdiven ve bantların yolcuya duyarlı hale getirilerek ihtiyaç olmayan zamanlarda çalışmasının önlenmesi,
- Ofis ve idari binaların ısı izolasyonun sağlanması,
- Planlı bakım faaliyetleri,
- Etkin bir çevre kontrol sistemi, olarak sıralanabilir.

BÖLÜM 4

SİSTEM TANITIMI

Metro İstanbul A.Ş bünyesinde bulunan M1 ve M5 metro hatları göz önünde bulundurularak çeşitli simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

M1 hattının Yenikapı-Havalimanı güzergahı üzerinde Rail-Sim programı ile DC yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. $M1_A$ ve $M1_B$ hatları, ray, eğim, viraj ve elektrifikasyon bilgileri açısından gerçek verileri ile modellenmiştir. Çeşitli senaryolara göre simülasyonlar yapılmış, elde edilen veriler karşılaştırılarak sunulmuştur.

M5 metro hattı, Üsküdar-Çekmeköy güzergahı, Üsküdar-Yamanevler istasyonları arasında yapılan OG simülasyonunda, elektrifikasyon sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) programının 12.5 numaralı sürümünden faydalanılmıştır. ETAP programında, M5 hattının açılışı tamamlanan 9 istasyonu (Üsküdar-Yamaneverler arası) için cer ve iç ihtiyaç transformatörleri, baralar ve kablo bilgileri gerçek verileri ile girilerek model oluşturulmuştur. OG yük akışı analizleri, transformatör ve kablo yüklenmeleri ile kayıpları incelenmiştir. Bu analizlerden elde edilen verilere göre değişik senaryolar uygulanarak, optimum işletme senaryosu, kablo kesitleri ve transformatör kapasiteleri belirlenmiştir.

Bu bölümde modelleme ve analiz çalışmaları yapılan M1 ve M5 metro hatları hakkında bilgi verilecektir.

4.1 M1 Hattı Tanıtımı

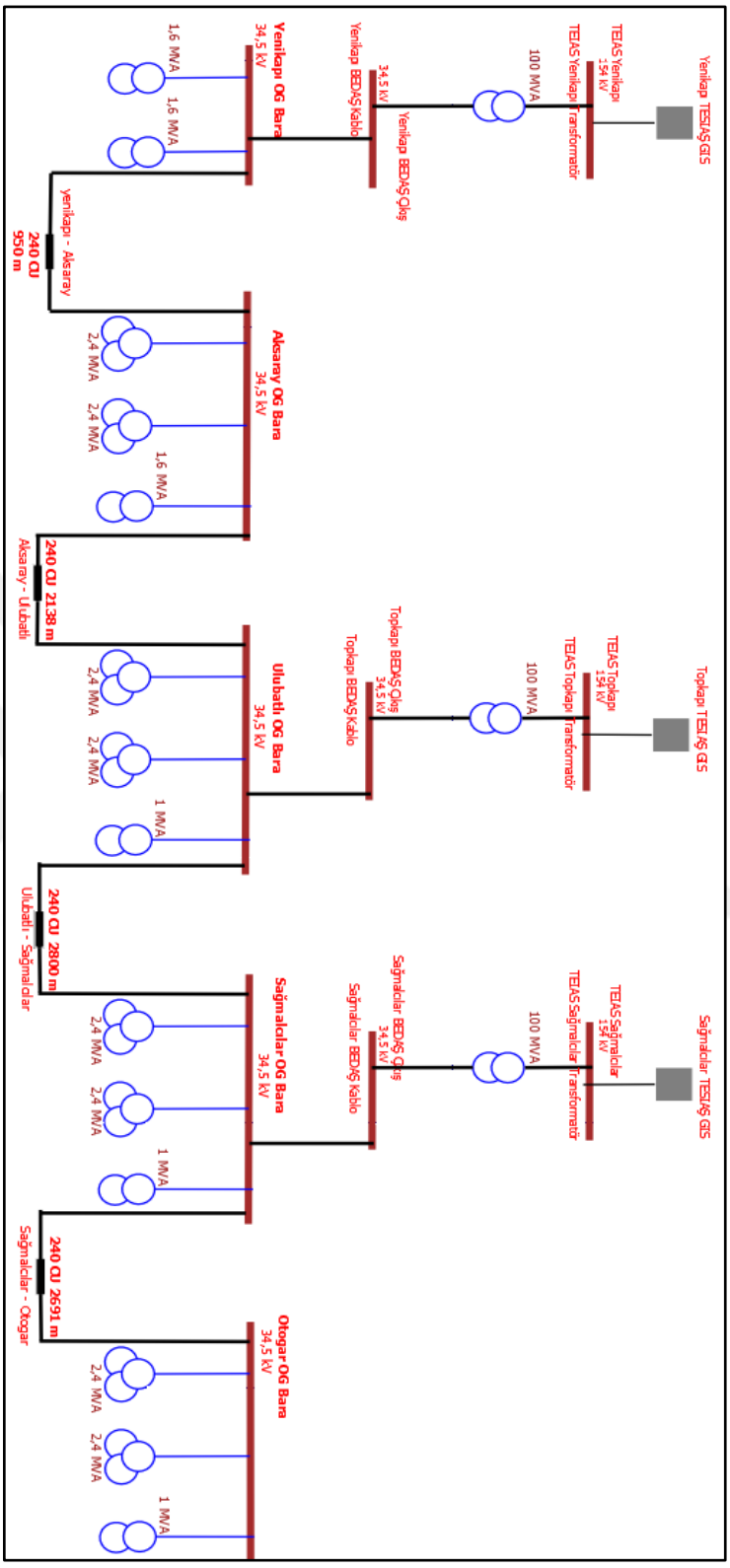
M1 hattı Metro İstanbul'un işlettiği en eski raylı sistem hattıdır. Bu hat Yenikapı İstasyonu'ndan Otogar istasyonuna kadar aynı yön, Otogar istasyonundan sonra $M1_A$ hattı Havalimanı, $M1_B$ hattı ise Kirazlı yönüne gitmektedir. $M1_A$-$M1_B$ hattı üzerinde bulunan 19 adet transformatör merkezi, 6 adet indirici merkez ve transformatör merkezleri arasında bulunan orta gerilim kabloları hafif metro hattının elektrifikasyon sistemini oluşturmaktadır.

Şekil 4. 1'de M1 hattı istasyon şeması verilmiştir.

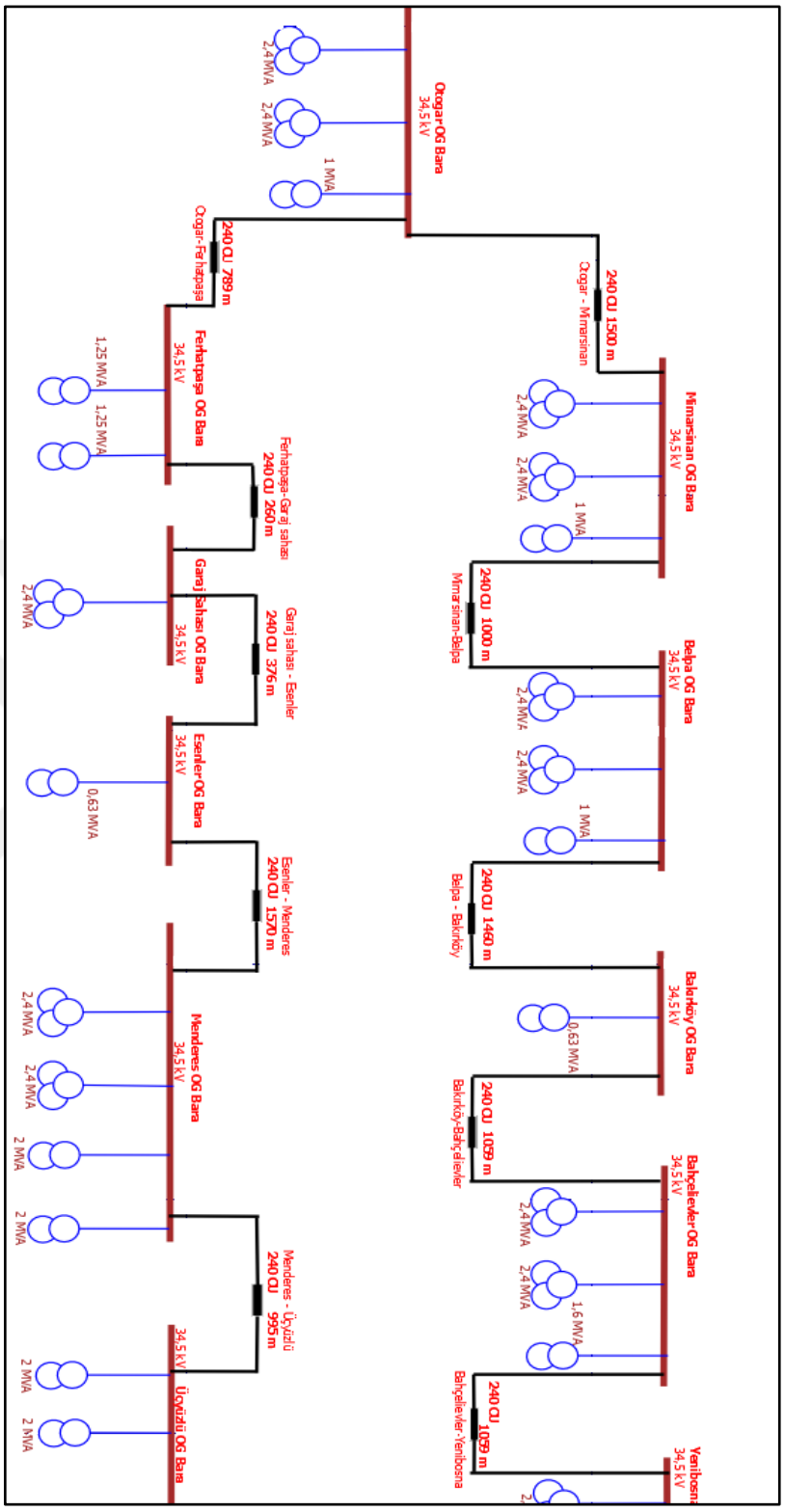
Şekil 4. 2'de $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması verilmiştir.



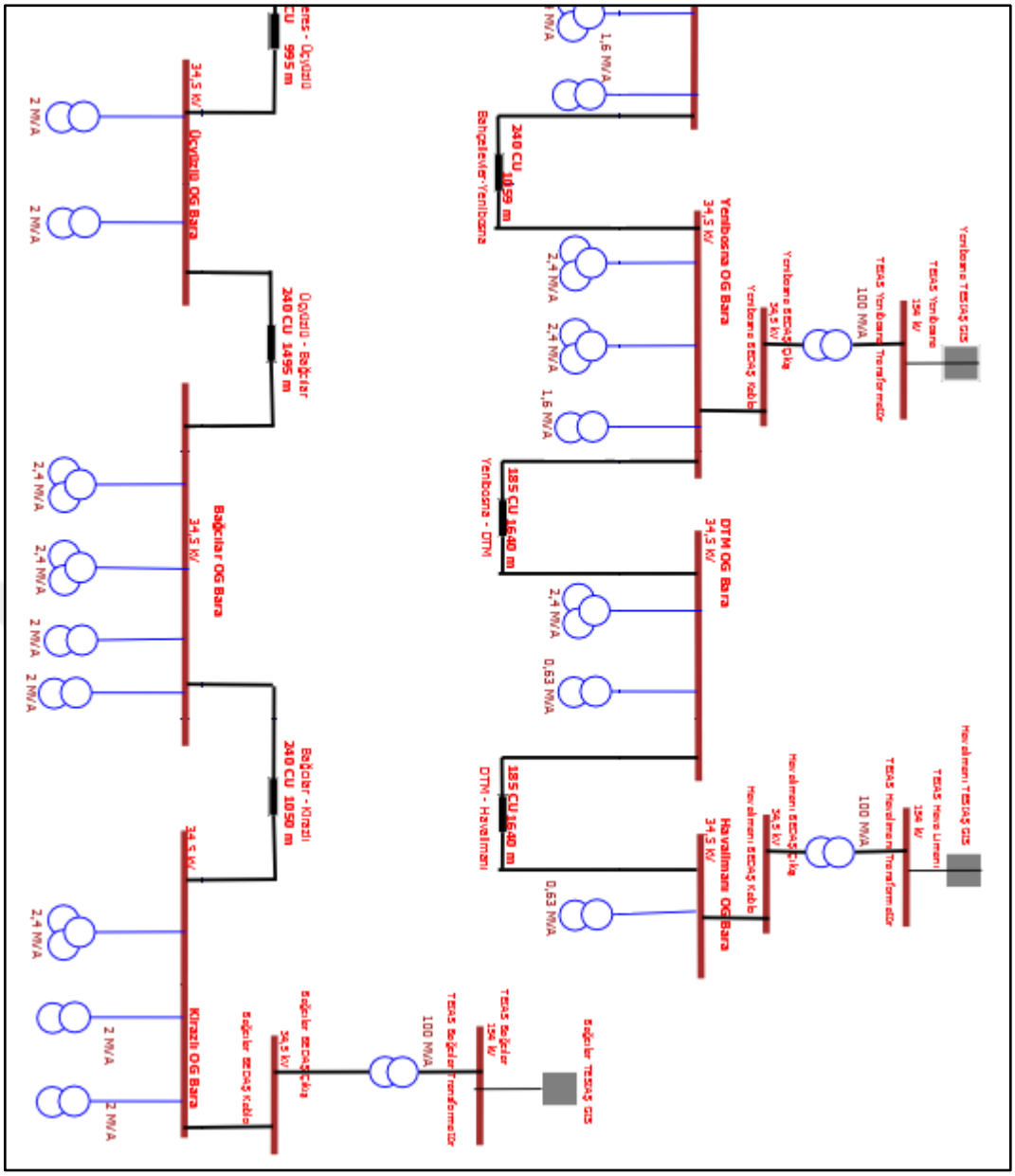
Şekil 4. 1 $M1_A$-$M1_B$ hattı istasyon şeması



Şekil 4. 2 $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması



Şekil 4. 2 $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması (devamı)



Şekil 4. 2 $M1_A$-$M1_B$ hattı basitleştirilmiş tek hat şeması (devamı)

4.1.1 $M1_A$ Yenikapı-Atatürk Havalimanı Hattı Tanıtımı

$M1_A$ Yenikapı-Atatürk Havalimanı Hafif Metro Hattı, Metro İstanbul'un işlettiği ilk raylı sistem hattıdır. Hat, Yenikapı bölgesinden başlar, Aksaray, Merter istikametinden Atatürk Havalimanı'na kadar uzanır. Atatürk Havalimanı'nı eski İstanbul bölgesine bağlayan raylı sistem hattıdır.

4.1.1.1 İstasyonlar

$M1_A$ istasyonları: Yenikapı, Aksaray, Emniyet/Fatih, Ulubatlı/Topkapı, Bayrampaşa-Maltepe, Sağmalcılar, Kartaltepe/Kocatepe, Otogar, Terazidere, Davutpaşa/Yıldız Teknik Üniversitesi, Merter, Zeytinburnu, Bakırköy-İncirli, Bahçelievler, Ataköy/Şirinevler, Yenibosna, DTM/İstanbul Fuar Merkezi, Havalimanı olmak üzere toplam 18 İstasyon bulunmaktadır.

4.1.1.2 Hizmete Açılış Tarihleri

- Aksaray -Kartaltepe: 03.09.1989
- Otogar - Zeytinburnu: 31.01.1994
- Zeytinburnu - Bakırköy: 07.03.1994
- Bakırköy - Ataköy: 26.07.1995
- Ataköy - Yenibosna: 25.08.1995
- Bahçelievler: 15.01.1999
- DTM - CNR Expo - Havalimanı: 20.12.2002
- M1B Uzatmasının Yolculu İşletmeye Açılması: 14.06.2013
- Yenikapı istasyonu açılışı: 09.11.2014

4.1.1.3 İşletme Bilgileri

- Hat Uzunluğu: 26,1 km.
- İstasyon Sayısı: 23
- Vagon Sayısı: 105
- Yenikapı-Havalimanı: 35 dk.
- İşletme Saatleri: 06:00/00:00
- Günlük Yolcu Sayısı: 400.000 yolcu/gün
- Yenikapı-Havalimanı 170 sefer/tek yön

- Sefer Sıklığı: Pik saatte 2,5 dakika

4.1.1.4 İstasyon Yapıları

Yenikapı - Atatürk Havalimanı ana hat güzergahında 18 istasyon, Otogar istasyonundan $M1_B$ bağlantısı üzerinde 5 istasyon olmak üzere toplam 23 istasyon bulunmaktadır. 10 tanesi ortak kullanılan orta peron, 11 tanesi ikili peron, Otogar'da bulunan bir tanesi ise 3 hattın geçiş yapabildiği ikili orta peron şeklinde inşa edilmiştir. $M1_B$ uzantısındaki istasyonlardan olan Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan ve Kirazlı istasyonları ise yer altı istasyonlarıdır. Kirazlı istasyonunda M3 Kirazlı – Başakşehir – Olimpiyatköy Metro Hattı ile aktarma imkanı sunmaktadır.

Tüm istasyonlarda kapalı oturma alanları bulunmakla beraber, istasyonlarda toplam 135 yürüyen merdiven ve 65 asansör faaliyet göstermektedir.

Bu hatta bulunan istasyon yapıları ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir:

6 adet Tünel İstasyon: Aksaray, Emniyet - Fatih, Topkapı - Ulubatlı, Bakırköy - İncirli, Bahçelievler, Havalimanı

3 adet Yerüstü Viyadük İstasyon: Davutpaşa, Merter, DTM - İstanbul Fuar Merkezi

9 adet Yerüstü İstasyon: Bayrampaşa-Maltepe, Sağmalcılar, Kartaltepe-Kocatepe, Otogar, Esenler, Terazidere, Zeytinburnu, Ataköy-Şirinevler, Yenibosna

5 adet Yeraltı İstasyon: Yenikapı, Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan, Kirazlı

4.1.2 $M1_B$ Hattı Tanıtımı

$M1_B$ Yenikapı - Kirazlı Metro Hattı 14.06.2013 tarihinde; M2 Yenikapı-Hacıosman Metro Hattı ve Marmaray entegrasyonunun sağlandığı Yenikapı İstasyonu'ndan başlayarak Otogar-Esenler-Bağcılar bölgelerinden geçerek Kirazlı İstasyonu'nda M3 Kirazlı - Başakşehir / Metrokent Metro Hattı'na entegrasyon sağlanarak açılmıştır.

4.1.2.1 İstasyonlar

$M1_B$ İstasyonları: Yenikapı, Aksaray, Emniyet / Fatih, Ulubatlı / Topkapı, Bayrampaşa-Maltepe, Sağmalcılar, Kartaltepe / Kocatepe, Otogar, Esenler, Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan, Kirazlı olmak üzere toplam 13 adet istasyondan oluşur.

4.1.2.2 Hizmete Açılış Tarihleri

- Açılış Tarihi: 14.06.2013
- Esenler: 04.12.1989
- Yeni Esenler İstasyonu Açılışı: 22.02.2012
- Yenikapı İstasyonu açılışı: 09.11.2014

4.1.2.3 İstasyon Yapıları

Yenikapı - Atatürk Havalimanı ana hat güzergahında 18 istasyon, Otogar istasyonundan $M1_B$ bağlantısı üzerinde 5 istasyon olmak üzere toplam 23 istasyon bulunmaktadır. 10 tanesi ortak kullanılan orta peron, 11 tanesi ikili peron, Otogar'da bulunan bir tanesi ise 3 hattın geçiş yapabildiği ikili orta peron şeklinde inşa edilmiştir. $M1_B$ uzantısındaki istasyonlardan olan Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan ve Kirazlı istasyonları ise yer altı istasyonlarıdır. Kirazlı İstasyonu'nda M3 Kirazlı – Başakşehir / Metrokent Metro Hattı ile aktarma imkanı sunmaktadır.

Tüm istasyonlarda kapalı oturma alanları bulunmakla beraber, istasyonlarda toplam 135 yürüyen merdiven ve 65 asansör bulunmaktadır.

Bu hatta bulunan istasyon yapıları ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir:

6 adet Tünel İstasyon: Aksaray, Emniyet - Fatih, Topkapı - Ulubatlı, Bakırköy - İncirli, Bahçelievler, Havalimanı

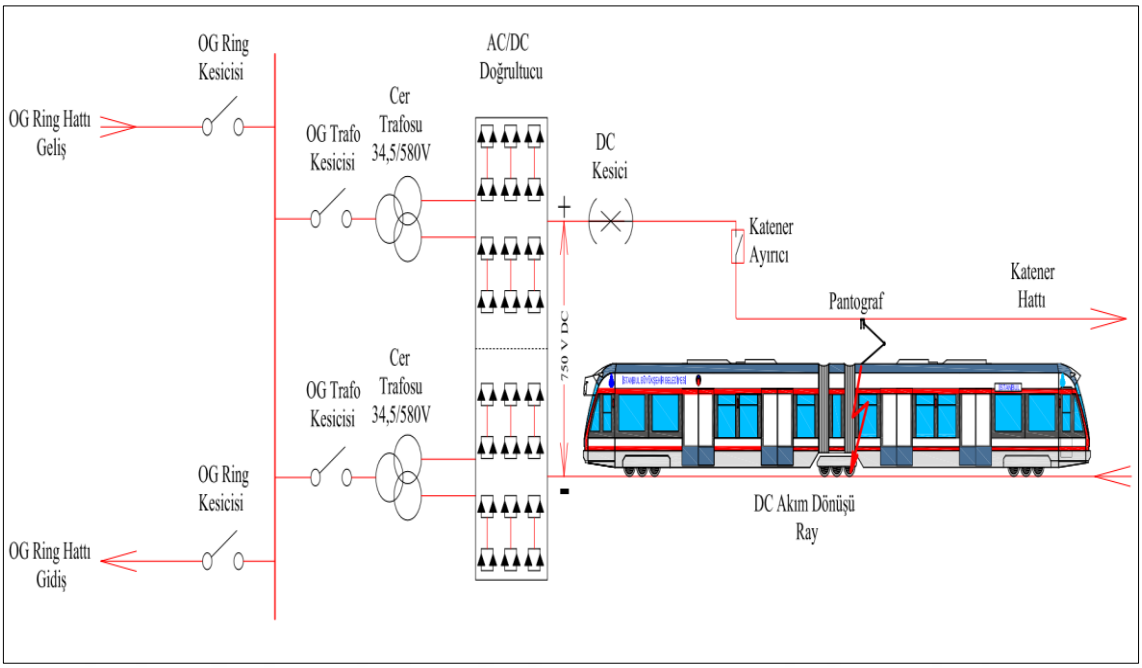
3 adet Yerüstü Viyadük İstasyon: Davutpaşa, Merter, DTM - İstanbul Fuar Merkezi

9 adet Yerüstü İstasyon: Bayrampaşa - Maltepe, Sağmalcılar, Kartaltepe - Kocatepe, Otogar, Esenler, Terazidere, Zeytinburnu, Ataköy-Şirinevler, Yenibosna

5 adet Yeraltı İstasyon: Yenikapı, Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar Meydan, Kirazlı

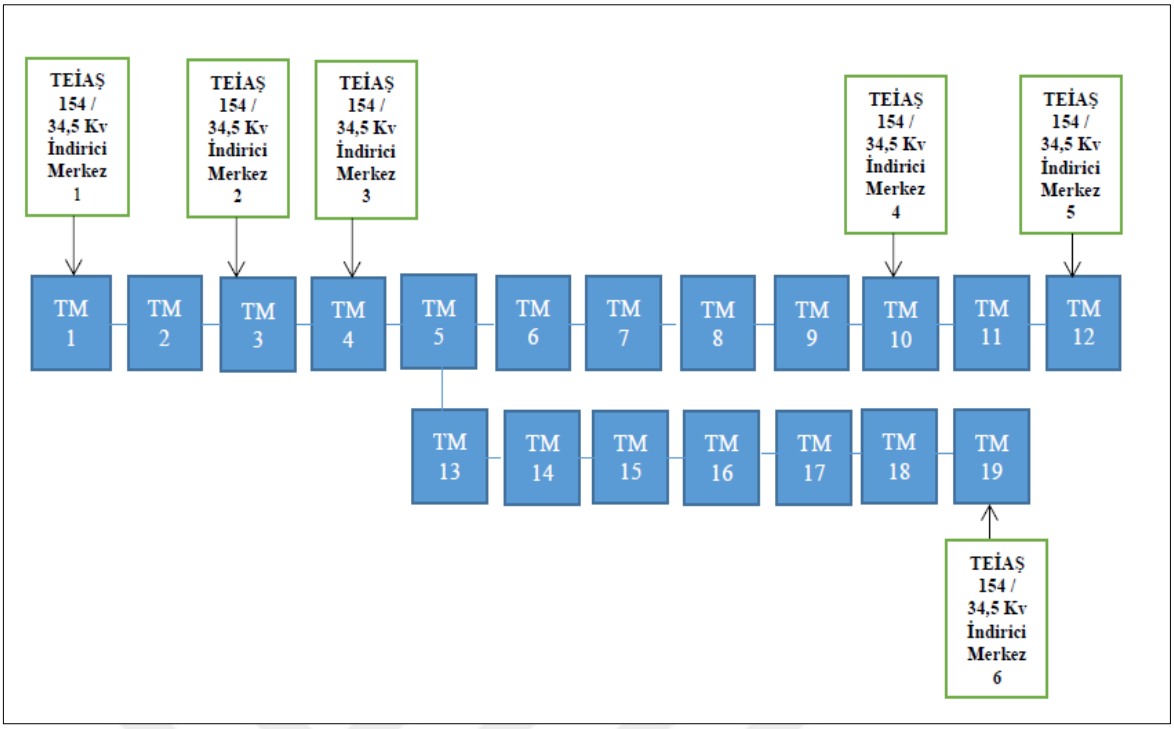
4.1.3 Elektrifikasyon Sistemi

Hafif metro hattının OG elektrifikasyon sistemini, $M1_A$ - $M1_B$ hattı üzerinde bulunan 19 adet transformatör merkezi, 6 adet indirici merkez ve transformatör merkezleri arasında bulunan orta gerilim kabloları oluşturmaktadır. Ayrıca, elektrifikasyon sistemini oluşturan transformatör merkezlerinin basitleştirilmiş şeması Şekil 4. 2 de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 Raylı sistem elektrifikasyon örneği [44]

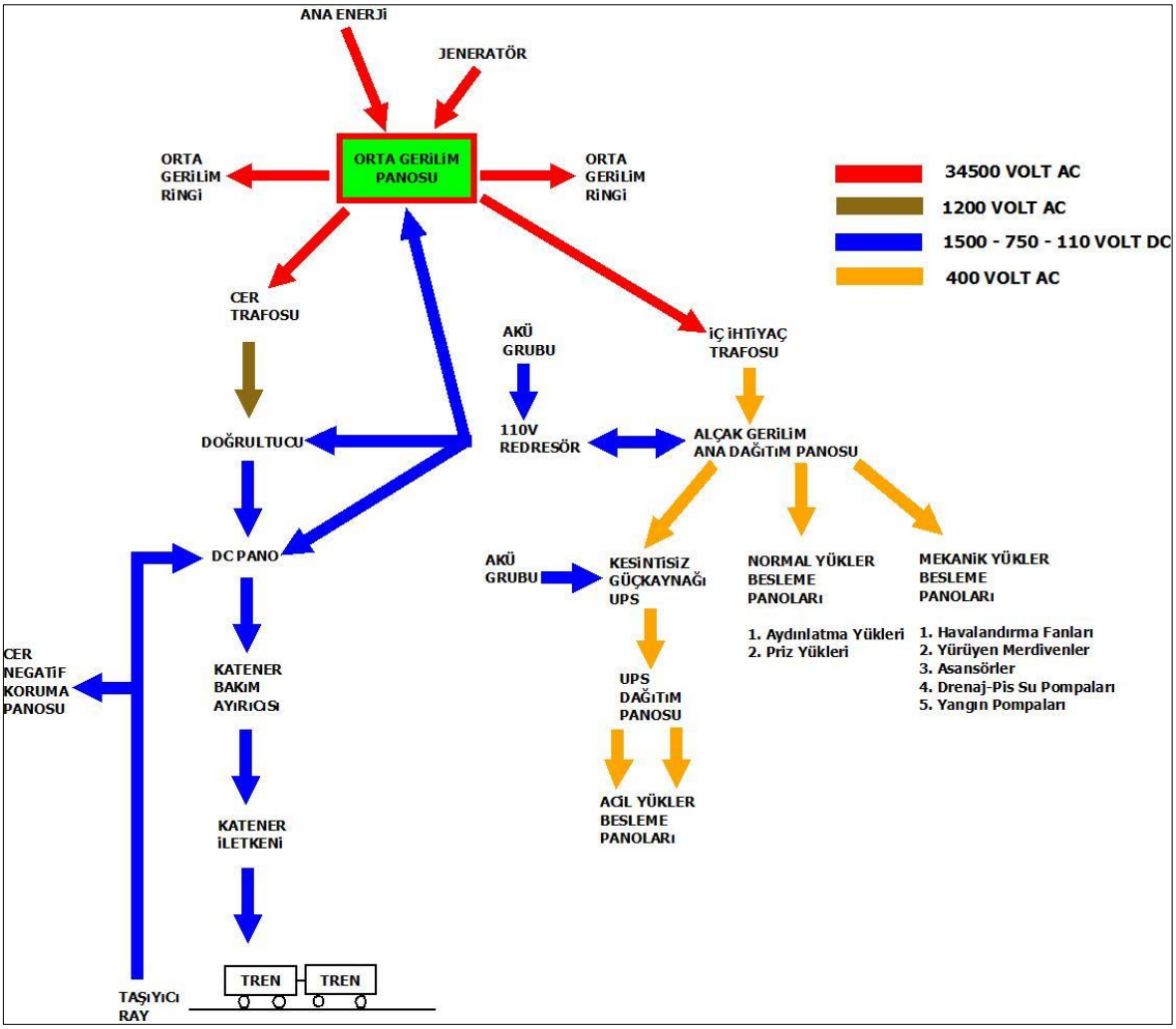
Transformatör merkezleri ve TEİAŞ indirici merkezlerine basitçe gösterim için kodlar verilmiştir. Sistemin numaralandırılmış tek hat şeması aşağıda verilmiştir;



Şekil 4. 4 $M1_A$ - $M1_B$ hattı orta gerilim sisteminin basitleştirilmiş diyagramı [44]

4.1.4 Transformatör Merkezleri

M1A Yenikapı - Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı - Kirazlı hafif raylı sistem hattında bulunan toplam 23 adet istasyon ve 26,1 km uzunluğundaki katener hattının enerji beslenmesi hat üzerinde çeşitli lokasyonlarda kurulu olan toplam 19 adet transformatör merkezi ile sağlanmaktadır. Transformatör merkezlerinde 34,5 kV AC orta gerilim baralar bulunmakta olup transformatör merkezleri birbirlerine orta gerilim enerji kabloları üzerinden bağlanarak ring şebeke oluşturmaktadır. Oluşturulan ring şebeke sayesinde herhangi bir TEİAŞ 154 / 34,5 kV giriş beslemesinde meydana gelen bir enerji kesintisinde ring kesici hücreleri ile manevra yapılarak bir başka indirici merkezden enerji beslemesi sağlanmaktadır.



Şekil 4. 5 Enerji besleme diyagramı

Şekil 4. 5'te transformatör merkezi ve indirici merkezlerin orta gerilim diyagramı verilmiştir. Çizelge 4. 1'de ise transformatör merkezlerinin kurulu güç bilgisi paylaşılmıştır.

Çizelge 4. 1 Transformatör merkezi kurulu güç bilgisi [44]

Transformatör Merkezi Kodu	Transformatör Merkezi İsmi	Kurulu Güç
TM 1	Yenikapı	6,5 MVA
TM 2	Aksaray	5,8 MVA
TM 3	Ulubatlı	5,8 MVA
TM 4	Sağmalcılar	5,8 MVA
TM 5	Otogar	7,6 MVA

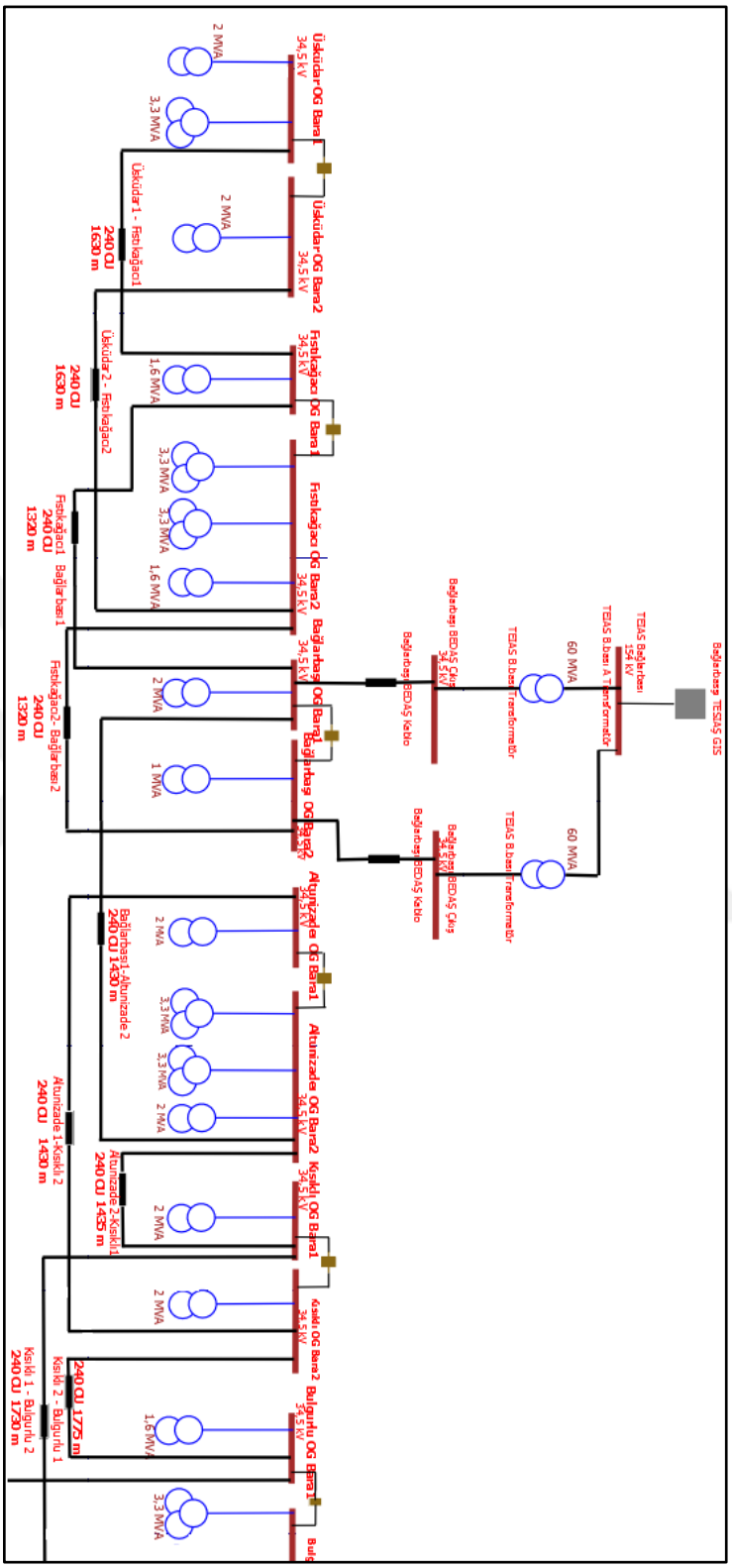
TM 6	Mimarsinan	5,8 MVA
TM 7	Belpa	5,8 MVA
TM 8	Bakırköy	0,63 MVA
TM 9	Bahçelievler	6,4 MVA
TM 10	Yenibosna	5,8 MVA
TM 11	DTM	3,03 MVA
TM 12	Havalimanı	1 MVA
TM 13	Ferhatpaşa	2,5 MVA
TM 14	Garaj Sahası	2,4 MVA
TM 15	Esenler	0,63 MVA
TM 16	Menderes	8,8 MVA
TM 17	Üçyüzlü	4 MVA
TM 18	Bağcılar	8,8 MVA
TM 19	Kirazlı	6,4 MVA
	Toplam Kurulu Güç	93,49 MVA

4.2 M5 Hattı Tanıtımı

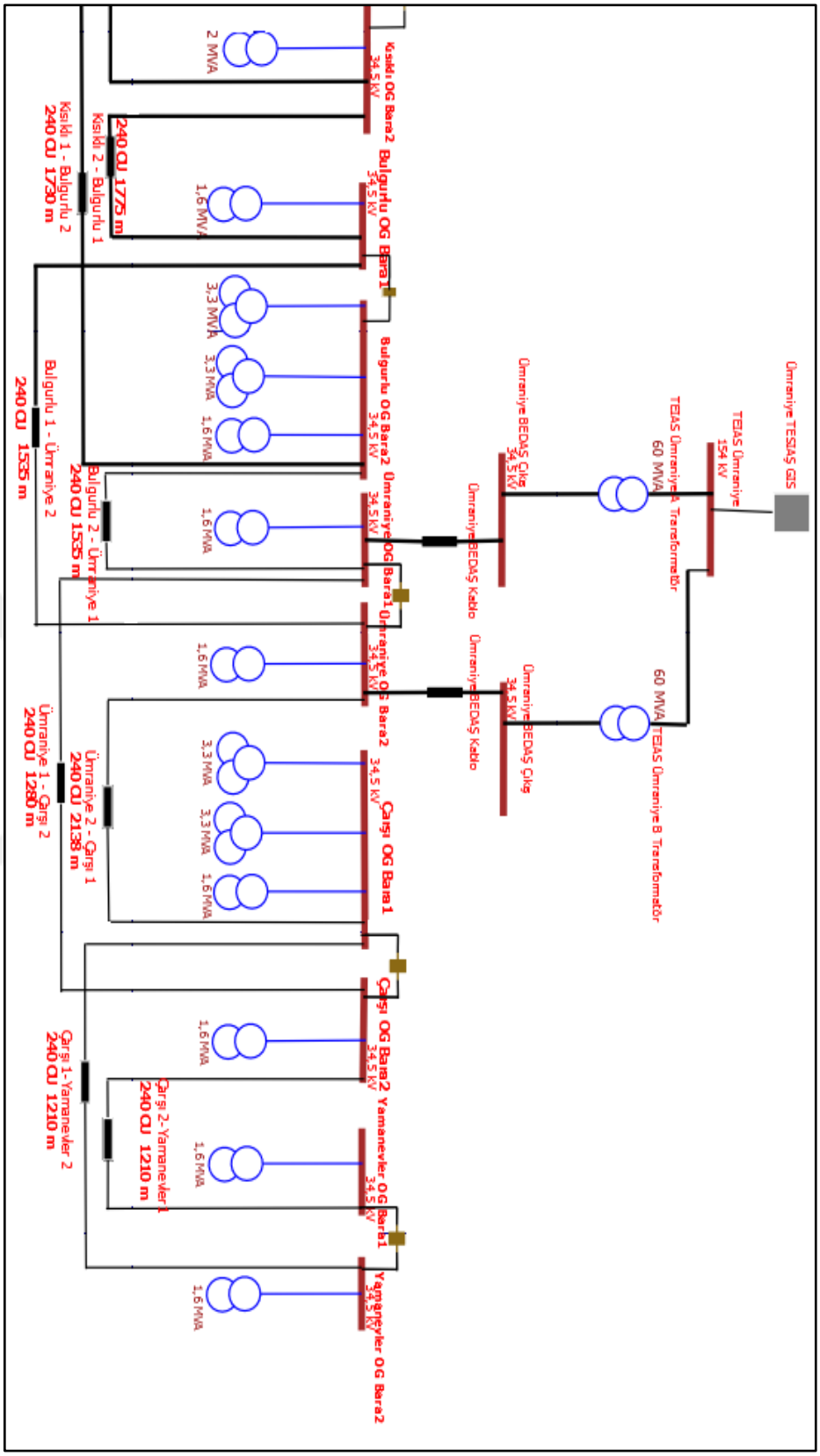
Üsküdar - Ümraniye - Çekmeköy Metro Projesi kapsamında inşa edilen M5 hattının 1. etabı, 15 Aralık 2017 tarihinde hizmete açılmıştır. M5 Hattı, Anadolu Yakası'nın ikinci metro hattı olup, Türkiye'nin ilk sürücüsüz metro hattıdır. Hat, Üsküdar Meydanı'ndan başlayarak, Kısıklı üzerinden Ümraniye ilçe merkezine bağlanmaktadır.

İnşa edildiği güzergâh üzerinde yüksek yolcu potansiyeline sahip olan hattın 2. etabı tamamlandığında, 7 istasyon daha açılacak ve hat Çekmeköy bölgesine kadar ulaşacaktır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi raylı sistemler gelecek vizyonu çerçevesinde sürdürülen çalışmalarla, M5 Hattı'nın Sultanbeyli ve Sabiha Gökçen Havalimanı'na kadar uzatılması planlanmaktadır.

M5 hattı basitleştirilmiş tek hat şeması Şekil 4. 6'te verilmiştir.

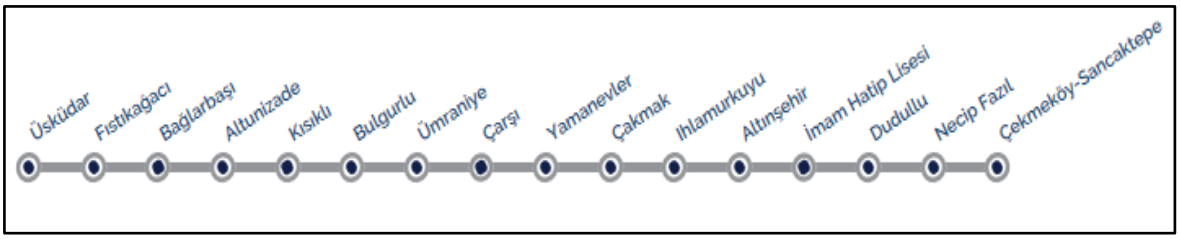


Şekil 4. 6 M5 Hattı basitleştirilmiş tek hat şeması



Şekil 4. 6 M5 hattı basitleştirilmiş tek hat şeması (devamı)

Şekil 4. 7'da M5 hattı istasyon şeması verilmiştir.



Şekil 4. 7 M5 hattı istasyon şeması

4.2.1 M5 Hattı İstasyonları

Üsküdar, Fıstıkağacı, Bağlarbaşı, Altunizade, Kısıklı, Bulgurlu, Ümraniye, Çarşı, Yamanevler, Çakmak, Ihlamurkuyu, Altınşehir, İmam Hatip Lisesi, Dudullu, Necip Fazıl ve Çekmeköy – Sancaktepe olmak üzere toplam 16 adet istasyondan oluşmaktadır.

4.2.2 M5 Hattı Hizmete Açılış Tarihleri

15 Aralık 2017 tarihinde 1. etabı olan Üsküdar – Yamanevler arası hizmete açılmıştır. Hattın 2. etabı tamamlandığında, 7 istasyon daha açılacak ve hat Çekmeköy bölgesine kadar ulaşacaktır.

4.2.3 M5 Hattı İşletme Bilgileri

- Hat Uzunluğu: 17 km
- İstasyon Sayısı: 16
- Vagon Sayısı: 126
- Sefer Süresi: 27 dk
- İşetme Saatleri: 06:00 – 24:00
- Günlük Yolcu Sayısı: 100.000 (ortalama - ilk etap için)
- Günlük Sefer Sayısı: 288 (ilk etap için)
- Sefer Sıklığı: 8 dk (ilk etap için)

4.2.4 M5 Hattı İstasyon Yapıları

Hattın tünelleri TBM ve NATM yöntemi ile kazılmıştır. İstasyonların tamamı yer altında inşa edilmiştir. İstasyon boyu 140 metredir (Üsküdar İstasyonunda 150 metre) ve 6'lı tren işletmesine uygun yapıdadır. İstasyonların tamamında engelli erişimini sağlayacak özel giriş turnikeleri ve asansörler ile diğer yolcular için yürüyen merdivenler bulunmaktadır. Kısıklı istasyonunda giriş bölgesinden konkors katına (turnike katı) erişim sadece asansörler ile sağlanmakta, konkors katından (turnike katından) peron katına hem asansör hem de yürüyen merdivenler ile erişim sağlanmaktadır. Sistem UTO tam otomatik sürücüsüz şekilde işletildiği için tüm peronlarda PAKS (Peron Ayırıcı Kapı Sistemi) bulunmaktadır.

BÖLÜM 5

MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMASI

Modelleme ve analiz çalışmalarında İstanbul raylı ulaşım sisteminde bulunan M1 ve M5 hatları kullanılmıştır. M1 hattında işletmenin DC kısmı için ve M5 hattında ise AC kısmı için çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

M1 hattının Yenikapı-Havalimanı güzergahı üzerinde RAILSIM programı ile DC yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. $M1_A$ ve $M1_B$ hatları, ray, eğim, viraj ve elektrifikasyon bilgileri açısından gerçek verileri ile modellenmiştir.

RAILSIM yazılımı raylı sistemlerin operasyonlarını ve performansını modellemek ve simüle etmek için demiryolu ve hızlı taşıma endüstrisinde kullanılan bir programdır. Raylı sistemlerin tüm yönleri ile simüle edilnesi için tasarlanmıştır. RAILSIM programı herhangi bir raylı sistemi (metro, hafif raylı sistem veya yüksek hızlı raylı sistem) gerçeğe en yakın şekilde simüle edebilmektedir.

Rail-Sim programında 2 farklı simülasyon kısmı mevcuttur:

- Tren performans hesaplayıcısı (TPC, train performance calculator)

Programın bu kısmı, belirli bir yön üzerinde çalışan tek bir trenin ayrıntılı ve oldukça hassas olarak simüle ederek performans özelliklerini üretir. Bu performans verileri, bir çok çıktı türü arasında zaman, mesafe, hız ve ivme içerir.

- Yük Akış Analizörü (LFA, load flow analyzer)

Raylı sistemlere enerji sağlayan güç sistemlerinde, öngörülen çalışma koşulları altında, yükleri, potansiyelleri ve rejeneratif frenleme alıcısını analiz eder. Modellenen hat

üzerinde, belirli trenler arası sefer süresi altında, gerçek zamanlı olarak çalışan bir raylı sistem ağının yük akış analizini hesaplar.

M5 metro hattı, Üsküdar-Çekmeköy güzergahı, Üsküdar-Yamanevler istasyonları arasında yapılan OG simülasyonunda, elektrifikasyon sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) programının 12.5 numaralı sürümünden faydalanılmıştır. ETAP programında, M5 hattının açılışı tamamlanan 9 istasyonu (Üsküdar-Yamaneverler arası) için cer ve iç ihtiyaç transformatörleri, baralar ve kablo bilgileri gerçek verileri ile girilerek model oluşturulmuştur. OG yük akışı analizleri yapılarak transformatör ve kablo yüklenmeleri ile kayıplar incelenmiştir.

ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software), elektrik güç sistemleri için modelleme, analiz ve farklı durumların simülasyonu imkanını veren bir yazılımdır. ETAP elektrik mühendislerinin çeşitli analiz ve tasarımları yapmalarına olanak sağlamaktadır. M5 hattı için farklı senaryolar uygulanarak analizler yapılmış ve ilgili senaryolarda işletme kayıplarına dair detaylı simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Daha sonra her bir senaryo için maliyet analiz çalışmaları yapılarak hem kurulum hem de transformatör ve kablo kayıpları açısından ayrıntılı sonuçlar paylaşılmıştır.

5.1 M1 Hattı Modelleme ve Analiz Çalışmaları

M1 Metro hattına ait gerçek veriler girilerek Yenikapı-Havalimanı istasyonları arasında, Havalimanı doğrultusunda tek bir tren harektine ait veriler DC Simülasyon programı RAILSIM vasıtası ile irdelenmiştir. Hat uzunluğu 19675 metredir. Simülasyon çalışmasında 4 vagonlu İstanbul Ulaşım 1988 ABB Hafif Metro aracı olarak tek bir tren, bu güzergah ve doğrultu boyunca çalıştırılarak yük akışı analizi ve tren performans bilgileri farklı çalışma koşullarında elde edilmiş, enerji verimliliğine olan etklileri gösterilmiştir.

İncelenen senaryolar aşağıda sıralanmıştır:

5.1.1 Senaryo 1: Katener Hatlarının Paralellenmesi (Jumper-Atlama Kabloları)

DC gerilim ile beslenen çift hatlı sistemde her iki hatta ait katener sistemleri yalıtılmış kablolar ile paralellenebilmektedir. Görselliğinin yanı sıra paralelleme aynı zamanda enerji tasarrufu ve gerilim dengelemesi de sağlamaktadır. Hatların paralellemesi, akım

bölüşümünü artırarak sistemin yüklenmesini hafifletmesi ve enerji kayıplarını azaltması gibi avantajlara sahiptir.

Bu çalışmada Çizelge 5.1'de özellikleri verilen boş bir tren, 19675 metrelik Yenikapı-Havalimanı istasyonları arasında, katener hatları arasında herhangi bir paralelleme yapılmaması, hattın mevcut durumu, her 2000 metrede, 1000 metrede ve 250 metrede bir jumper (atlama kabloları) ile katener hatlarının birbirine bağlanması durumlarında modelleme ve analizler yapılarak sistemden çekilen güç ve akım değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5. 1 Tren bileşimi verileri

Tren Bileşimi Verileri							
Uzunluk	**Maks, Ani İvmelenme**	**Maks, Ani Yavaşlama**	**Vagonlar**	**Akslar**	**Maks, İvmelenme**	**Maks, Yavaşlama**	**Train Ağırlığı**
Metre	**m/S^3**	**m/S^3**	**Adet**	**Adet**	**m/S^2**	**m/S^2**	**Kilogram**
92,8	1,1	1,1	4	24	0,7	1,8	119747,76

5.1.1.1 Güç Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

M1 hattı Yenikapı-Havalimanı istasyonları arasında, Havalimanı yönünde çizelge 5. 1'de teknik özellikleri verilen tren, gidiş-dönüş katener hatları arasında jumper (atlama kabloları) olmaması ve farklı sıklıklarda bir olması durumları için ayrı ayrı modelleme ve analizler yapılarak her bir TM için elde edilen sonuçlar ilgili tablolarda sunulmuştur.

RAILSIM yazılımda gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu Aksaray TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 2 Aksaray TM güç çıkış sonuçları

AKSARAY TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	**Ort.**	**Min.**	**Maks.**	**RMS**
	Jumper Yok	42,14	0	762,25	121,13
	Mevcut Durum	40,61	0	701,99	116,3
	2000 m	42,38	0,03	735,63	120,87
	1000 m	40,17	0	672,49	114,31
	250 m	39,21	0	640,15	108,09

Çizelge 5. 2'de görüldüğü gibi katener hatları arasında jumperlama sıklığı arttıkça tren tarafından çekilen maksimum güç ve tren hareketi boyunca her 2 sn'de bir alınan değerler ile hesaplanan RMS (Root Mean Square) değerinin azaldığı görülmüştür. Buna göre hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda, doğrultucu (rectifier) çıkışından çekilen maksimum güç 762,25 kW iken her 250 m de bir olması durumunda bu değer 640,15 kW ile %16,018 oranında azalmaktadır. Hatlar arasında herhangi bir jumperlama yapılmadığı durumda çekilen efektif güç değeri 121,13 kW iken her 250 m de bir jumperlama olduğu durumda bu değer 108,09 kW'a düşerek %10,76 oranında azalmıştır.

Bağcılar TM için elde edilen sonuçlar Çizelge 5. 3'te verilmiştir.

Çizelge 5. 3 Bağcılar TM güç çıkış sonuçları

	Güç Değerleri (kW)				
BAĞCILAR TM	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	

Çizelge 5. 4 Bahçelievler TM güç çıkış sonuçları

BAHÇELİEVLER TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	32,71	0	384,96	78,07
	Mevcut Durum	33,01	0	385,09	78,18
	2000 m	31,85	0	374,89	75,94
	1000 m	31,73	0	373,58	74,7
	250 m	32,13	0	373,21	74,65

Çizelge 5. 4'te Bahçelievler TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 384,96 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %3,05'lik bir azalma ile 373,21 kW'a düşmüştür. Efektif güç (RMS) değeri ise 78,07 kW'tan %4,38 lik bir azalma ile 74,65 kW değerine inmiştir.

Simülasyon sonucu Belpa TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. 5 Belpa TM güç çıkış sonuçları

BELPA TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	33,45	0	377,22	76,19
	Mevcut Durum	33,74	0	377,45	76,29
	2000 m	32,36	0	371,14	73,24
	1000 m	32,95	0	367,66	73,81
	250 m	32,72	0	333,46	72,25

Çizelge 5. 5'te Belpa TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 377,22 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %11,6'lık bir azalma sağlanabilmektedir. Efektif güç (RMS) değeri ise 76,19 kW'tan %5,17'lik bir azalma ile 72,25 kW değerine inmiştir.

Dünya Ticaret Merkezi TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 6'da verilmiştir.

Çizelge 5. 6 DTM TM güç çıkış sonuçları

DTM TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	17,45	0	497,65	55,31
	Mevcut Durum	17,57	0	497,82	55,35
	2000 m	17,34	0	490,21	54,69

	1000 m	16,6	0	451,58	50,73
	250 m	16,36	0	450,96	48,74

Çizelge 5. 6'da DTM TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 497,65 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %9,38 lik bir azalma ile 450,96 kW a düşmüştür. Efektif güç (RMS) değeri ise 55,31 kW'tan %11,87 lik bir azalma ile 48,74 kW değerine inmiştir.

Kirazlı TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 7'de verilmiştir.

Çizelge 5. 7 Kirazlı TM güç çıkış sonuçları

KİRAZLI TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	**Ort.**	**Min.**	**Maks.**	**RMS**
	Jumper Yok	0,21	0	2,43	0,48
	Mevcut Durum	0,23	0	2,47	0,5
	2000 m	0,23	0	2,56	0,5
	1000 m	0,23	0	2,56	0,5
	250 m	0,28	0,02	2,41	0,55

Çizelge 5. 7'de Kirazlı transformatör merkezi doğrultucu çıkışından çekilen RMS güç değeri yok denecek kadar azdır. Hattın bu noktasına konumlandırılan TM, trenin hareket ettiği güzergahta ($M1_A$ güzergahı) olmadığı ve hareket noktalarına çok uzak olduğu için tren tarafından güç talebi yok denecek kadar azdır. Bu yüzden Jumperlama sıklığı artsa da çekilen güç değerlerinde bir azalma olmamıştır. Jumperlama amacıyla çekilen kablolardaki kayıplar, kazançlardan daha büyük olduğu için negatif sayılabilecek bir sonuç çıktığı görülmüştür.

Menderes TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 8'de verilmiştir.

Çizelge 5. 8 Menderes TM güç çıkış sonuçları

MENDERES TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	**Ort.**	**Min.**	**Maks.**	**RMS**
	Jumper Yok	4,85	0	52,35	10,56
	Mevcut Durum	4,89	0	52,36	10,57
	2000 m	4,85	0	54,03	10,55
	1000 m	4,87	0	48,13	10,52
	250 m	5,38	0,02	50,69	11,41

Çizelge 5. 8'de Menderes TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Bu trafo merkezi konum itibarı ile Kirazlı ($M1_B$) tarafındadır. Ancak, trenin hareketini sürdürdüğü $M1_A$ hattına diğer TM (Kirazlı TM ve Bağcılar TM) ler kadar uzakta değildir. Tablodan da görülebileceği üzere $M1_A$ hattında konumlu olan transformatör merkezleri kadar güç çekilmese de kayde değer bir güç çekilmiştir. Ancak, bu TM de de katener hatları arasında paralelleme yapılmasının çekilen güç üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlemlenmemiştir. Hattın bu noktasına konumlandırılan TM, Kirazlı TM de de doluğu gibi trenin hareket ettiği güzergahta ($M1_A$ güzergahı) olmadığı ve hareket noktalarına çok uzak olduğu için tren tarafından güç talebi az olmuştur.

Mimarsinan TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 9'da verilmiştir.

Çizelge 5. 9 Mimarsinan TM güç çıkış sonuçları

MİM TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	32,75	0	340,14	71,97
	Mevcut Durum	32,98	0	340,03	72,02
	2000 m	31,79	0	313,05	69,29
	1000 m	32,35	0	302,39	70
	250 m	31,97	0	301,78	68,58

Çizelge 5.9'da Mimarsinan TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 340,14 kW iken her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %11,27'lik bir azalma ile 301,78 kW'a düşürülmüştür. Efektif güç (RMS) değeri ise 71,97 kW'tan %4,71 lik bir azalma ile 68,58 kW değerine inmiştir.

Otogar TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 10'da verilmiştir.

Çizelge 5. 10 Otogar TM güç çıkış sonuçları

OTOGAR TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	43,16	0	462,12	93,56
	Mevcut Durum	43,39	0	461,71	93,48
	2000 m	42,84	0	476,17	93,12
	1000 m	43,15	0	424,43	93,06
	250 m	42,59	0,04	401,16	90,49

Çizelge 5.10'da Otogar TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 462,12 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %13,19'luk bir azalma ile 401,16 kW a düşmüştür. Efektif güç (RMS) değeri ise 93,56 kW'tan %3,28'lik bir azalma ile 90,49 kW değerine inmiştir.

Sağmalcılar TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 11'de verilmiştir.

Çizelge 5. 11 Sağmalcılar TM güç çıkış sonuçları

SAĞMALCILAR TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	35,53	0	413,14	83,6
	Mevcut Durum	35,28	0	416,37	82,41
	2000 m	34,77	0,03	410,99	81,05
	1000 m	34,07	0	396,4	78,85
	250 m	34,33	0,06	378,79	79,1

Çizelge 5. 11'de Sağmalcılar TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 413,14 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %8,31'lik bir azalma ile 378,79 kW'a düşmüştür. Efektif güç (RMS) değeri ise 83,6 kW'tan %5,38 lik bir azalma ile 79,1 kW değerine inmiştir.

Ulubatlı TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 12'de verilmiştir.

Çizelge 5. 12 Ulubatlı TM güç çıkış sonuçları

ULUBATLI TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	41,09	0	568,24	109,73
	Mevcut Durum	39,05	0	540,45	102,68
	2000 m	40,47	0,03	532,12	107,66
	1000 m	38,04	0	499,69	99,59
	250 m	37,18	0,02	447,43	93,99

Çizelge 5. 12'de Ulubatlı TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 568,24 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %21,26'lık bir azalma ile 447,43 kW'a düşmüştür.

Efektif güç (RMS) değeri ise 109,73 kW'tan %14,34 lük bir azalma ile 93,99 kW değerine inmiştir.

Yenikapı TM için elde edilen güç değerleri Çizelge 5. 13'te verilmiştir.

Çizelge 5. 13 Yenikapı TM güç çıkış sonuçları

YENİKAPI TM	Güç Değerleri (kW)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	32,81	0	525,83	86,6
	Mevcut Durum	33,11	0	525,93	86,71
	2000 m	32,89	0	538,5	87,17
	1000 m	32,65	0	518,12	86,25
	250 m	32,68	0	466,95	84,29

Çizelge 5. 13'te Yenikapı TM doğrultucu çıkışından çekilen güçler görülmektedir. Çekilen maksimum güç değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 525,83 kW'tan her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %11,19'luk bir azalma ile 466,95 kW'a düşmüştür. Efektif güç (RMS) değeri ise 86,6 kW'tan %2,66'lık bir azalma ile 84,29 kW değerine inmiştir.

Tüm trafo merkezlerindeki RMS güç değeleri toplamı Çizelge 5. 14'te sunulmuştur.

Çizelge 5. 14 Tüm TM'lerin RMS güç değerleri toplamı sonuçları

Tüm Trafo Merkezleri RMS Güç Değeri Toplamı (kW)	Jumper Yok	Mevcut Durum	2000 m	1000 m	250 m
	789,28	**776,6**	**776,19**	**754,39**	**734,46**

Yukarıdaki çizelgelerde doğrultucu çıkış değerleri verilen M1 hattındaki mevcut trafo merkezlerinin her bir çalışma durumuna ait toplam çektiği RMS güç değerleri çizelge 5. 14'te sunulmuştur. Çizelgeden de görüldüğü gibi Yenikapı-Havalimanı katener hatları arasında paralelleme olmadığı durumda çekilen güç değeri 789,28 kW iken her 250 metrede bir paralelleme olduğu durumda ise bu değer yaklaşık %6,95'lik bir azalma ile 734,46 kW'a düşmüştür.

5.1.1.2 Çekilen Akım Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

RAILSIM yazılımda gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu Aksaray TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. 15 Aksaray TM akım çıkışı sonuçları

AKSARAY TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	51,68	0	941,35	148,87
	Mevcut Durum	49,79	0	866,06	142,9
	2000 m	51,98	0,03	908,07	148,52
	1000 m	49,26	0	829,25	140,42
	250 m	48,05	0	788,94	132,7

Çizelge 5. 15'te Aksaray TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 941,35 A iken her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %16,19'luk bir azalma ile 788,94 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 148,87 A den %10,86'lık bir azalma ile 132,7 A değerine inmiştir.

Simülasyonlar sonucu Bağcılar TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 5. 16 Bağcılar TM akım çıkışı sonuçları

BAĞCILAR TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	1,15	0	12,67	2,53
	Mevcut Durum	1,2	0	12,75	2,57
	2000 m	1,2	0	13,18	2,58
	1000 m	1,19	0	11,68	2,56
	250 m	1,33	0,02	12,37	2,79

Çizelge 5.16'da görüldüğü gibi Bağcılar transformatör merkezi doğrultucusundan çekilen maksimum akım ve RMS değerleri Aksaray TM ye göre çok daha azdır. Ayrıca, jumperlama sıklığı arttıkça da bu akım değerlerinde beklenildiği gibi azalma görülmemiştir. Bunun sebebi, katener hatlarının paralellenmesinin güç tüketimi üzerindeki etkisi bölümünde de açıklanıldığı gibi, Bağcılar TM'nin, M1 hattının Yenikapı-Kirazlı güzergâhı kısmında kalmasından dolayı, Yenikapı-Havalimanı yönünde hareket eden trene konum olarak uzak

olması sebebiyle etkisinin çok az olmasındandır. Bu durum için jumperlama amacıyla çekilen kablolardaki kayıplar nedeniyle ihtiyaç duyulan aynı gücü sağlamak için daha fazla akım çekilerek negatif sayılabilecek bir sonuç çıktığı görülmüştür.

Bahçelievler TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5. 17'de verilmiştir.

Çizelge 5. 17 Bahçelievler TM akım çıkışı sonuçları

BAHÇELİEVLER TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	40,02	0	472,42	95,58
	Mevcut Durum	40,38	0	472,59	95,72
	2000 m	38,95	0	459,99	92,97
	1000 m	38,8	0	458,37	91,44
	250 m	39,29	0	457,92	91,38

Çizelge 5. 17'de Bahçelievler TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 472,42 A olarak belirlenmiştir. Her 250 metrede bir paralelleme yapıldığında %3,06'lık bir azalma ile 457,92 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 95,58 A den %4,39'luk bir azalma ile 91,38 A değerine inmiştir.

Belpa TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5. 18'de verilmiştir.

Çizelge 5. 18 Belpa TM akım çıkışı sonuçları

BELPA TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	40,91	0	462,87	93,27
	Mevcut Durum	41,26	0	463,16	93,39
	2000 m	39,57	0	455,36	89,63
	1000 m	40,3	0	451,07	90,32
	250 m	40,01	0	408,88	88,41

Çizelge 5. 18'de Belpa TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 462,87 A'den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %11,66 lık bir azalma ile 408,88 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 93,27 A den %5,21 lik bir azalma ile 88,41 A değerine inmiştir.

Dünya Ticaret Merkezi TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5. 19'da verilmiştir.

Çizelge 5. 19 DTM TM akım çıkışı sonuçları

DTM TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	21,4	0	617,06	68,09
	Mevcut Durum	21,55	0	617,27	68,14
	2000 m	21,26	0	607,68	67,32
	1000 m	20,35	0	559,06	62,39
	250 m	20,05	0	558,28	59,92

Çizelge 5. 19'da DTM TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 617,06 A' den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %9,52 lik bir azalma ile 558,28 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 68,09 A den %11,99 luk bir azalma ile 59,92 A değerine inmiştir.

Kirazlı TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 20'de verilmiştir.

Çizelge 5. 20 Kirazlı TM akım çıkışı sonuçları

KİRAZLIR TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	0,26	0	2,96	0,58
	Mevcut Durum	0,28	0	3,02	0,61
	2000 m	0,28	0	3,12	0,61
	1000 m	0,28	0	2,76	0,61
	250 m	0,34	0,02	2,94	0,67

Çizelge 5. 20'de Kirazlı trafo merkezi doğrultucu çıkışından çekilen RMS akım değeri yok denecek kadar azdır. Hattın bu noktasına konumlandırılan TM, trenin hareket ettiği güzergahta (M1A güzergahı) olmadığı ve hareket noktalarına çok uzak olduğu için tren tarafından bu TM den çelilen güç talebi yok denecek kadar azdır. Bu yüzden Jumperlama sıklığı arttıkça da beklenildiği gibi çekilen akım değerlerinde azalma olduğu görülmemiştir. Jumperlama amacıyla çekilen kablolardaki kayıplar nedeniyle ihtiyaç duyulan aynı gücü sağlamak için daha fazla akım çekilerek negatif sayılabilecek bir sonuç çıktığı görülmüştür.

Menderes TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 21'de verilmiştir.

Çizelge 5. 21 Menderes TM akım çıkışı sonuçları

MENDERES TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	5,92	0	63,9	12,88
	Mevcut Durum	5,96	0	63,91	12,90
	2000 m	5,92	0	65,95	12,87
	1000 m	5,94	0	58,74	12,83
	250 m	6,57	0,03	61,87	13,92

Çizelge 5. 21'de Menderes TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Bu trafo merkezi konum itibarı ile Kirazlı (M1B) tarafındadır. Ancak trenin hareketini sürdürdüğü M1A hattına diğer TM (Kirazlı TM ve Bağcılar TM) ler kadar uzakta değildir. Tablodan da görülebileceği üzere M1A hattında konumlu olan trafo merkezleri kadar akım çekilmese de kayde değer bir akım çekilmiştir. Ancak bu TM de de katener hatları arasında paralelleme yapılması çekilen akım üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlemlenmemiştir.

Mimarsinan TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5. 22'de verilmiştir.

Çizelge 5. 22 Mimarsinan TM akım çıkışı sonuçları

MİMARSİNAN TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	40,04	0	417,12	88,06
	Mevcut Durum	40,33	0	416,99	88,12
	2000 m	38,86	0	383,73	84,76
	1000 m	39,54	0	370,6	85,63
	250 m	39,08	0	369,85	83,89

Çizelge 5. 22'de Mimarsinan TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 417,12 A den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %11,33'lük bir azalma ile 369,85 A e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 88,06 A den %4,73'lük bir azalma ile 83,89 A değerine inmiştir.

Otogar TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5. 23'de verilmiştir.

Çizelge 5. 23 Otogar TM akım çıkışı sonuçları

OTOGAR TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	52,76	0	566,7	114,44
	Mevcut Durum	53,05	0	566,19	114,35
	2000 m	52,36	0	584,02	113,91
	1000 m	52,75	0	520,24	113,82
	250 m	52,06	0,05	491,57	110,67

Çizelge 5. 23'de Otogar TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 566,7 A'den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %13,25 lik bir azalma ile 491,57 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 114,44 A den %3,29 luk bir azalma ile 110,67 A değerine inmiştir.

Sağmalcılar TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 24'te verilmiştir.

Çizelge 5. 24 Sağmalcılar TM akım çıkışı sonuçları

SAĞMALCILARTM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	43,47	0	507,25	102,39
	Mevcut Durum	43,16	0	511,25	100,91
	2000 m	42,53	0,04	504,59	99,24
	1000 m	41,68	0	486,56	96,53
	250 m	41,99	0,07	464,81	96,83

Çizelge 5. 24'de Sağmalcılar TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 507,25 A den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %8,36'lik bir azalma ile 464,81 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 102,39 A den %5,43'lük bir azalma ile 96,83 A değerine inmiştir.

Ulubatlı TM için elde edilen simülasyon sonuçları Çizelge 5. 25'te verilmiştir.

Çizelge 5. 25 Ulubatlı TM akım çıkışı sonuçları

ULUBATLI TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	Ort.	Min.	Maks.	RMS
	Jumper Yok	50,35	0	699,48	134,66
	Mevcut Durum	47,83	0	664,96	125,95

	2000 m	49,58	0,04	654,62	132,09
	1000 m	46,59	0	614,4	122,13
	250 m	45,52	0,03	549,66	115,21

Çizelge 5. 25'te Ulubatlı TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 699,48 A den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %21,41 lik bir azalma ile 549,66 A e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 134,66 A den %14,44 lük bir azalma ile 115,21 A değerine inmiştir.

Yenikapı TM için elde edilen akım değerleri Çizelge 5. 26'da verilmiştir.

Çizelge 5. 26 Yenikapı TM akım çıkışı sonuçları

YENİKAPI TM	Akım Değerleri (A)				
	Jumper Durumu	**Ort.**	**Min.**	**Maks.**	**RMS**
	Jumper Yok	40,17	0	646,82	106,18
	Mevcut Durum	40,53	0	646,94	106,31
	2000 m	40,26	0	662,54	106,89
	1000 m	39,96	0	637,25	105,76
	250 m	40	0	573,82	103,32

Çizelge 5. 26'da Yenikapı TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 646,82 A'den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %11,28'lik bir azalma ile 573,82 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 106,18 A'den %2,69'luk bir azalma ile 103,32 A değerine inmiştir.

5.1.1.3 Paralellemenin Hat Gerilimi (Trenin Pantografının Ucundan Okunan Gerilim) Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Çizelge 5. 27'de ise hat boyunca trenin pantografının katener hattı ile temas ettiği noktadan okunan en düşük gerilim seviyeleri görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre hatların paralellenmesi gerilim düşümünü azaltmaktadır. 250 metrede bir paralleme yapılması durumunda gerilim düşümü hatların hiç paralellenmemesi durumuna kıyasla %10,06 oranında azalmıştır.

Çizelge 5. 27 Tren pantografının ucundan okunan minmum gerilim değerleri

HATTAKİ MİNUMUM GERİLİM (V)				
Jumper Yok	Mevcut Durum	2000 m	1000 m	250 m
696,41	709,96	701,62	759,26	774,34

5.1.2 Senaryo 2: Trenin Toplam Kütle Artışının Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

Hafif olan araçlar ağır olanlara göre, ilerlemeye karşı daha düşük mekanik direnç gösterir ve aynı performans seviyesine ulaşmak için daha az kinetik enerji gerektirir. Bu nedenle, raylı taşıtın toplam kütlesinin en aza indirilmesi, cer enerji tüketimini azaltacaktır. Ayrıca, aracın kütlesinin azaltılması yola daha az zarar verir, tekerleklerin ve frenin aşınmasını azaltarak sistemin işletme ve bakım masraflarını düşürür.

Araç ağırlığının enerji tüketimine etkisini göstermek amacıyla aynı tren aracı Yenikapı-Havalimanı istasyonları arasında,

- Boş,
- 300 yolculu,
- 600 yolculu,
- 900 yolculu,
- 1200 yolculu,

olması durumları için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5. 28'de verilmiştir. Simülasyonlarda yolcunun ağırlığı 75 kg olarak alınmıştır. İstasyonda beklemeli (20 s) ve beklemesiz olmak üzere iki farklı çalışmaya göre sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5. 28 Tren kütle artışının enerji tüketimine etkisi

	Boş		300 Kişi		600 Kişi		900 Kişi		1200 Kişi	
Çalışma Durumu	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz
Tren Ağırlığı (Kg)	119747,76		142247,82		164747,88		187247,76		209748	
Toplam Süre	00:28:46	00:23:26	00:29:12	00:23:52	00:29:46	00:24:26	00:30:13	00:24:53	00:30:40	00:25:20
Ortalama Hız (km/sa)	41,04	50,38	40,43	49,47	39,66	48,32	39,07	47,45	38,49	46,6
Maks. Hız (km/sa)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Tepe Güç (Kw)	2004,59	2004,59	2160,66	2160,66	2295,06	2295,06	2402,35	2402,35	2427,8	2427,8
Harcanan Enerji (Kwh)	318,25974	303,9664	347,79778	333,50444	375,00335	360,71002	400,2495	385,95613	422,4841	408,19075
Ortalama Güç (Kw)	663,80942	778,29245	714,16381	837,95085	755,88582	885,78181	794,759	930,63769	826,5995	966,77265

Çizelge 5. 28'den de görüldüğü üzere tren toplam kütle artışının birçok durumu etkilediği gözlemlenmiştir. Aracın boş ağırlığı simülasyon programından 119.747,76 Kg olarak alınmıştır. Boşta çalışma ve tren içindeki farklı yolcu sayılarında çalışmalara göre; toplam ağırlık artışı, sefer süresi, ortalama hız, maksimum hız, çekilen tepe (peak) güç, ortalama güç ve harcanan enerji değerleri tabloda görülmektedir. Tren toplam kütlesi arttıkça sefer süresi, çekilen tepe güç, ortalama güç ve tüketilen enerji miktarı artarken ortalama hızın azaldığı görülmektedir.

Boşta çalışma ve 1200 kişilik tam dolu yolcu ile çalışma kıyaslandığında, tren toplam kütlesi yaklaşık %75 artarken; enerji tüketimindeki artış beklemeli (with dwell) çalışma durumda %32,74 iken beklemesiz çalışma durumda ise %34,28 olmuştur.

Tren yüksüz çalıştığı durum ile tam yüklü olduğu durum arasında çekilen tepe güç değerleri karşılaştırılacak olursa; yüksüz çalıştığı durumda çekilen tepe güç değeri 2004,59 kW iken 1200 adet yolcu ile hareket ettiği durumda 2427,8 kW olarak elde edilmiştir. Buradan, tren kütlesindeki %75'lik artış çekilen tepe gücün %21,11 oranında azaldığı sonucu çıkarılabilir.

Çekilen ortalama güçler kıyaslandığında, tren yüksüz durumda beklemeli olarak hareket ettiğinde 663,8 kW, beklemesiz olarak hareket ettiğinde ise 778,2 kW ortalama güç çekmektedir. 1200 adet yolculu durumda beklemeli olarak hareketi sırasında ortalama 826,5 kW, beklemesiz hareketi için ise 966,7 kW güç çekmektedir. Bu durumda tren toplam kütlesi yaklaşık %75 artarken; ortalama güç çekişindeki artış beklemeli çalışmada %24,51, beklemesiz çalışma durumunda ise %24,22 arttığı görülmektedir.

Tren boşta çalıştığı durum ile tam yüklü olduğu durum arasında sefer süresi bakımından kıyaslama yapılacak olunursa, tren yüksüz ve beklemeli çalıştığı sırada seferini 1726 sn'de, beklemesiz durumda ise 1406 sn'de tamamlamaktadır. 1200 kişilik yolcu durumunda beklemeli olarak çalıştığında 1840 sn, beklemesiz çalıştığında ise 1520 sn de tamamlamaktadır. Bu sonuçlar neticesinde tren toplam kütlesi %75 artarken, beklemeli çalıştığında sefer süresi 114 sn'lik artış ile %6,6, beklemesiz çalıştığında ise yine 114 sn ile %6,6 oranında arttığı görülmüştür.

Enerji tüketimlerini daha iyi yorumlayabilmek için kWh / kişi başına düşen tüketim değerleri Çizelge 5.29'da verilmiştir.

Çizelge 5. 29 kWh / kişi başına enerji tüketim değerleri

	Enerji Tüketimleri (kWh/Kişi)	
Çalışma Durumu	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz
300 Yolculu	1,159	1,111
600 Yolculu	0,625	0,601
900 Yolculu	0,444	0,428
1200 Yolculu	0,352	0,34

Wh / kişi*km olarak enerji tüketim değerleri ise Çizelge 5.30'da verilmiştir.

Çizelge 5. 30 Wh / kişi*km başına enerji tüketim değerleri

	Enerji Tüketimleri (Wh/Kişi*km)	
Çalışma Durumu	Beklemeli 20 sn	Beklemesiz
300 Yolculu	58,92	56,5
600 Yolculu	31,76	30,55
900 Yolculu	22,6	21,79
1200 Yolculu	17,89	17,28

5.1.3 Maliyet Analizi

Katener hatları arasında atlama kabloları ile paralelleme yapılması durumunun maliyet açısından analizi gerçekleştirilmiştir.

M1 hattı mevcut durumunda, hattın bazı noktalarında paralelleme kabloları vardır. Bu kablolar 1 kV gerilim seviyesinde çift izoleli 1x120 mm^2 kesitli bakır kablolardır. Çizelge 5.31'de 11 Kasım 2017 HES kablo kataloğundan alınan kablo birim fiyat değeri verilmiştir.

Çizelge 5. 31 1x120 mm^2 bakır kablo fiyatı

Kablo Kesiti	Birim Fyatı (TL/m)
1x120 mm^2 Çift izoleli Bakır KABLO	74,000

Bir paralelleme kablosunun uzunluğu ortalama 8 m'dir ve kullanılan adet bilgileri Çizelge 5.32'de verilmiştir.

Çizelge 5. 32 Paralelleme kablosu adetleri

Kullanılan Jumper Adetleri	
Jumper Yok	0 adet
Mevcut Durum	13 adet
2000 m	17 adet
1000 m	35 adet
250 m	129 adet

Paralelleme kablolarının kurulum maliyeti, bir adetinin ortalama uzunluğu 8 metre kabul edilerek Çizelge 5.31'de verilen birim fiyat üzerinden hesaplanmış ve Çizelge 5.33'te sunulmuştur.

Çizelge 5. 33 Paralelleme kablosu kurulum maliyeti

Paralelleme Kablosu Kurulum Maliyetleri (TL)	
Jumper Yok	**0 TL**
Mevcut Durum	**7.696,00 TL**
2000 m	**10.064,00 TL**
1000 m	**20.720,00 TL**
250 m	**76.368,00 TL**

Maliyet analizi gerçekleştirirken aşağıdaki verilerden faydalanılacaktır.

- Metro İstanbul A.Ş araçları günde 18 saat çalışmaktadır.
- Metro İstanbul A.Ş enerji maliyeti yaklaşık 0,4 TL/kWh üzerinden hesaplanmaktadır.
- Bir yıl 365 gün olarak alınmıştır.

Çizelge 5.14'te, farklı sıklıklarda paralelleme yapılması sonucu tüm TM'lerden çekilen toplam RMS güç değerleri verilmiştir.

Paralelleme yapılmadığı durum ile 2000 m'de bir yapıldığı durum analizi: Çizelge 5.14'te parallelleme yapılmadığı durumda çekilen toplam güç 789,28 kW, 2000 m'de bir yapıldığı durumda ise 776,19 kW olarak verilmiştir. 2000 m'de de bir paralelleme kablosu çekildiği durumda, hiç olmaması durumuna göre 13,09 kW'lık bir kazanç olması söz konusudur. Bu durumda günlük enerji kazancı ise 13,09*18 = 235,62 kWh olmaktadır. Maddi açıdan sağlanan günlük kazanç değeri ise 235,62*0,4 = 94,248 TL olarak hesaplanmıştır. Buna göre kablo maliyetinin karşılanma süresi ise yaklaşık 107 gündür. Bir yıl sonunda sağlanan toplam kazanç ise 34.400,52 TL olarak hesaplanmıştır. Kurulum maliyeti çıkarıldığında 24.336,52 TL net kar kalmaktadır.

Paralelleme yapılmadığı durum ile 1000 m'de bir yapıldığı durum analizi: Çizelge 5.14'te parallelleme yapılmadığı durumda çekilen toplam güç 789,28 kW, 1000 m'de bir yapıldığı durumda ise 754,39 kW olarak verilmiştir. Katener hatları arasına 1000 m'de bir

paralelleme kablosu çekildiği durumda 34,89 kW'lık bir kazanç elde edilmektedir. Bu durumda günlük enerji kazancı ise 34,89*18 = 628,02 kWh olmaktadır. Maddi açıdan sağlanan günlük kazanç değeri ise 628,02*0,4 = 251,208 TL olarak hesaplanmıştır. Buna göre kablo maliyetinin karşılanma süresi yaklaşık 83 gündür. Katener hatları arasında 1000 m'de bir paralelleme yapılması durumunda, yıl sonunda sağlanan toplam kazanç 91.690,92 TL olarak hesaplanmıştır. Bu kazançtan kurulum maliyeti çıkarıldığında bir yıl sonunda 70.970,92 TL net kar elde edilmiştir.

Paralelleme yapılmadığı durum ile 250 m'de bir yapıldığı durum analizi: Çizelge 5.14'te parallelleme yapılmadığı durumda çekilen toplam güç 789,28 kW, 250 m'de bir yapıldığı durumda ise 734,46 kW olarak verilmiştir. Katener hatları 250 m'de bir atlama kabloları ile birbirine bağlandığında 54,82 kW'lık bir kazanç sağlanmıştır. Bu durumda günlük enerji kazancı ise 54,82*18 = 986,76 kWh olmaktadır. Maddi olarak sağlanan günlük kazanç ise 986,76*0,4 = 394,704 TL olarak hesaplanmıştır. Buna göre kablo maliyetinin karşılanma süresi yaklaşık 193 gündür. Katener hatları arasında 250 m'de bir paralelleme yapılması durumunda, yıl sonunda sağlanan toplam kazanç 144.066,96 TL olarak hesaplanmıştır. Bu kazançtan kurulum maliyeti çıkarıldığında bir yıl sonunda 67.698,96 TL net kazanç elde edilmiştir.

Hangi sıklıkta paralelleme kablosunun daha avantajlı olduğununun iyi anlaşılabilmesi açısından ilk 3 yıllık kazanç Çizelge 5.34'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. 34 Paralelleme kablosu kurulum maliyeti

Paralelleme Kazanç Tablosu									
	2000 m			1000 m			250 m		
	1. yıl	2. yıl	3. yıl	1. yıl	2. yıl	3. yıl	1. yıl	2. yıl	3. yıl
Kurulum Maliyeti (TL)	10.064,00	0	0	20.720,00	0	0	76.368,00	0	0
Kazanç (TL)	34.400,52	68.801,04	103.201,56	91.690,92	183.381,84	275.072,76	144.066,96	288.133,92	432.200,88
Net Kazanç (TL)	24.336,52	68.801,04	103.201,56	70.970,92	183.381,84	275.072,76	67.698,96	288.133,92	432.200,88
Toplam Kazanç (TL)	**196.339,12**			**529.425,52**			**788.033,76**		

5.2 M5 Hattı Modelleme ve Analiz Çalışmaları

M5 Metro hattını besleyen TEİAŞ 154/34,5 kV indirici transformatörleri, cer ve iç ihtiyaç transformatörleri ile kablo bilgilerine ait gerçek veriler ETAP programına girilerek modellenmiştir. Model Üsküdar - Yamanevler istasyonları arasındaki hat bölümünden oluşmaktadır. Model üzerinde çeşitli simülasyonlar yapılarak AC yük akış analizleri incelenmiştir. Simülasyon çalışmasında cer transformatörlerinden çekilen yük değerleri, analizör yardımıyla ölçümler yapılarak elde edilmiştir. Sabah en yoğun saat aralığı olan 09:00 – 09:30 arasında, Çarşı, Bulgurlu ve Fıstıkağacı istasyonlarında eş zamanlı olarak 5 er dakika aralıklarla ölçümle yapılmıştır. Tren cer transformatörüne en yakın noktadan geçerken tepe güç değeri, tren uzaklaştıktan sonra ise çekilen en düşük güç değerleri alınarak transformatör yükleri maksimum ve minimum yüklenme olarak belirlenmiştir. Ölçüm yapılmayan Üsküdar ve Altunizade cer transformatör maksimum ve minimum yükleri ise bu değelerin ilgili ortalamalarından elde edilerek belirlenmiştir. İç ihtiyaç transformatör yükleri de aynı zaman diliminde ölçüm yapılarak belirlenmiştir.

Model önce maksimum yüklenmeye göre, sonra da maksimum ve minimum yüklerin ortalaması alınarak elde edilen ortalama yüklenmeye göre çalıştırılmıştır. Son olarak ise her bir cer transformatörünün analizöründen okunan başlandığından beri ölçülen yüklenme oranına göre çalıştırılarak yük akış analizleri gerçekleştirilerek kablo ve transformatör kayıpları irdelenmiştir. Farklı senaryolara göre çalışma koşullarının enerji verimliliğine olan etklileri gösterilmiştir.

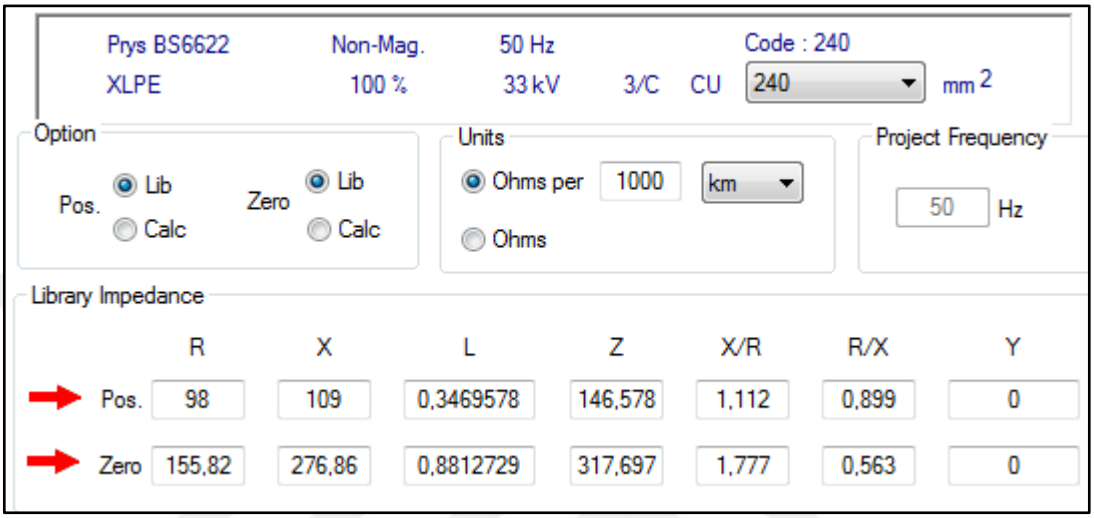
5.2.1 ETAP Yazılımında Model Oluşturulması

Simülasyon programında 9 adet 3,3 MVA cer transformatörü, 7 adet 2 MVA, 10 adet 1,6 MVA ve 1 adet 1 MVA iç ihtiyaç transformatörü ile 2 adet 60 MVA TEİAŞ 154 / 34,5 kV indirici transformatörü ve bu transformatör merkezleri arasındaki orta gerilim kablo bağlantılarının modellenmesi yapılarak yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Transformatör merkezleri arasında bulunan bakır orta gerilim kabloları için ETAP programının kütüphanesinde bulunan kablolar seçilmiştir.

5.2.1.1 Orta Gerilim Kabloların Modellenmesi

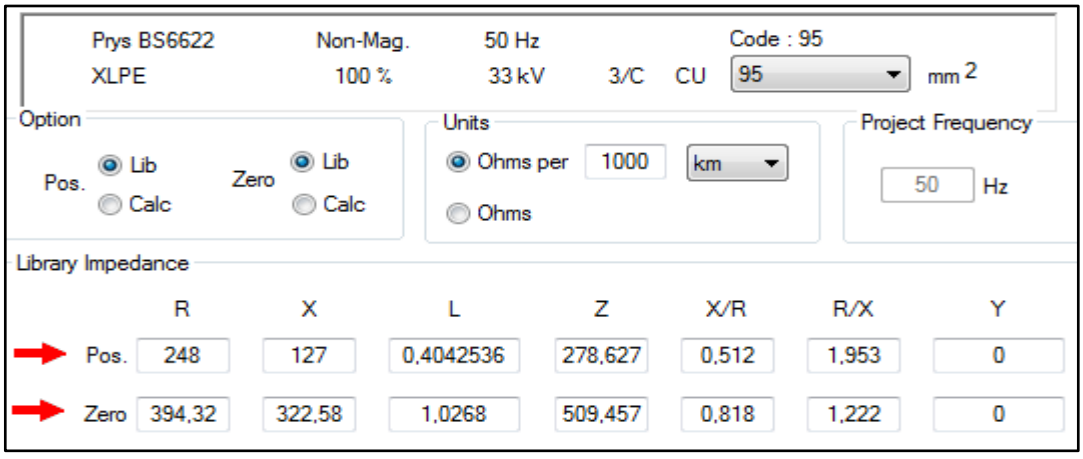
M5 hattı elektrifikasyon sisteminde OG şebekede tek tip kablo kullanılmaktadır. Bu kablo tipi 3x(1x240) mm^2 kesitli XLPE OG kablolarıdır. Bu kabloların karakteristik bilgileri için analiz progamının orijinal kütüphanesi kullanılmıştır.

Şekil 5. 1'de ETAP programının kütüphanesinden seçilen OG kablo bilgileri görülmektedir.



Şekil 5. 1 240 mm^2 kablo ETAP modeli

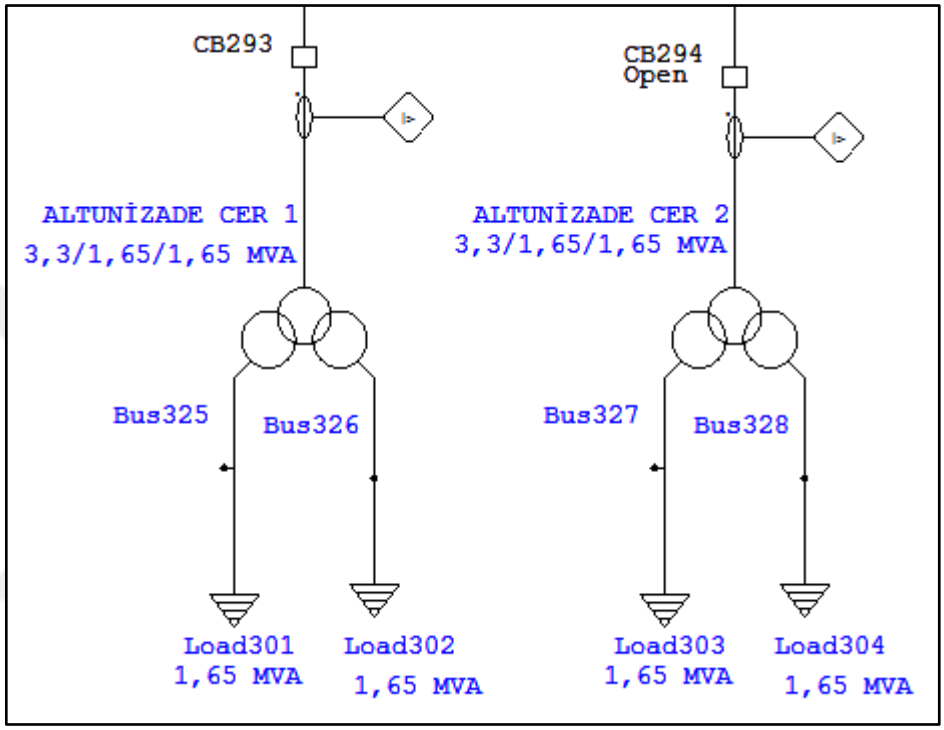
İncelenecek senaryo ve simülasyonlar gereği analiz programında kullanılacak olan 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kablo etiket bilgileri de Şekil 5. 2'de verilmiştir.



Şekil 5. 2 95 mm^2 kablo ETAP modeli

5.2.1.2 Cer Transformatörlerinin Modellenmesi

M5 Hattında SIEMENS marka cer transformatörleri bulunmaktadır. ETAP programının kütüphanesinde özel olarak cer transformatörlarının markasının seçilebileceği bir seçenek bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı cer transformatörünün parametreleri girilerek spesifik cer transformatörleri manuel olarak oluşturulmuştur. Bu hatta kullanılan cer transformatörü tek tip olup 3,3 MVA gücündedir.

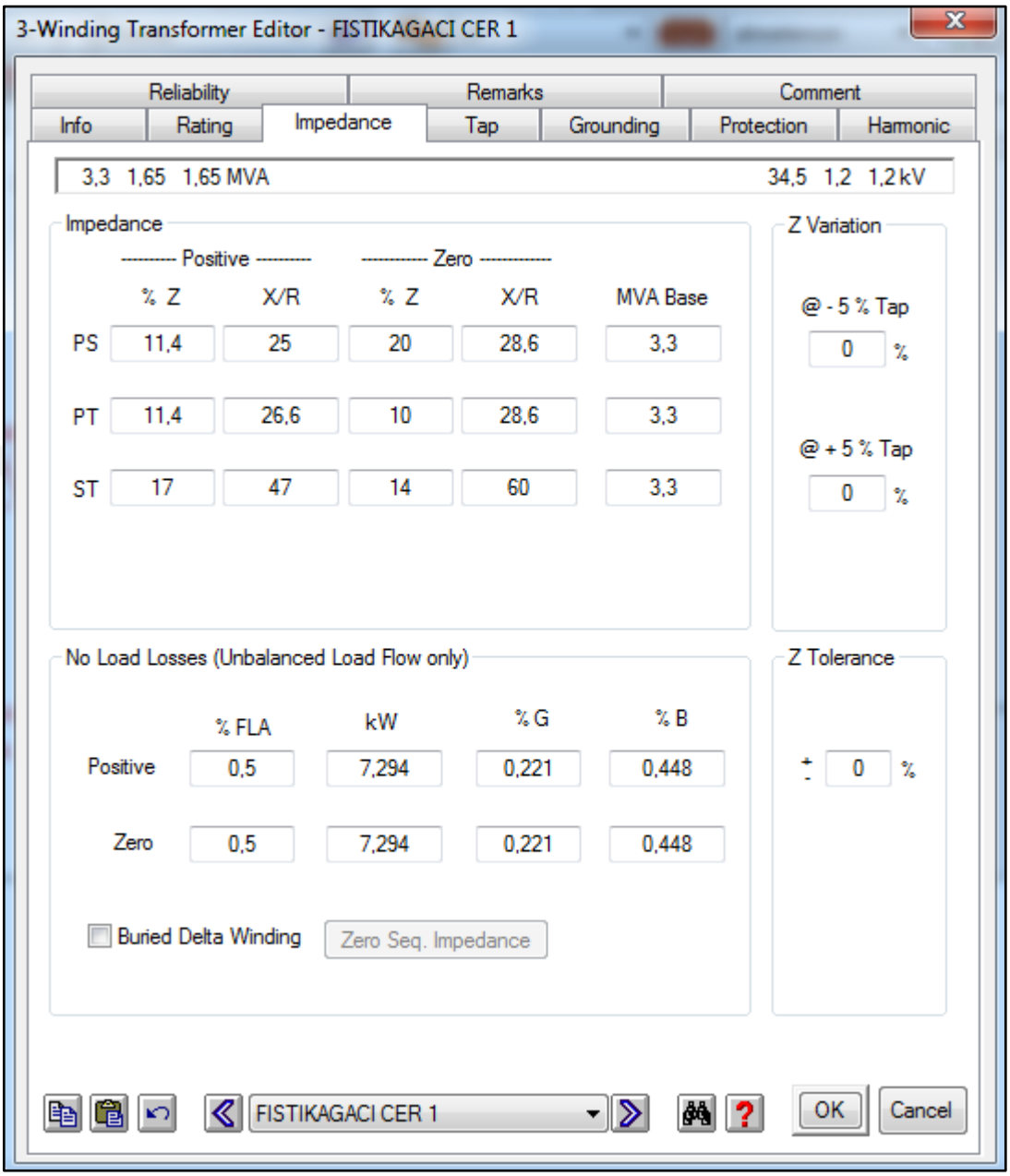


Şekil 5. 3 3,3 MVA Cer transformatör ETAP modeli

Çizelge 5. 35 Siemens 3300 KVA cer transformatör etiket bilgisi

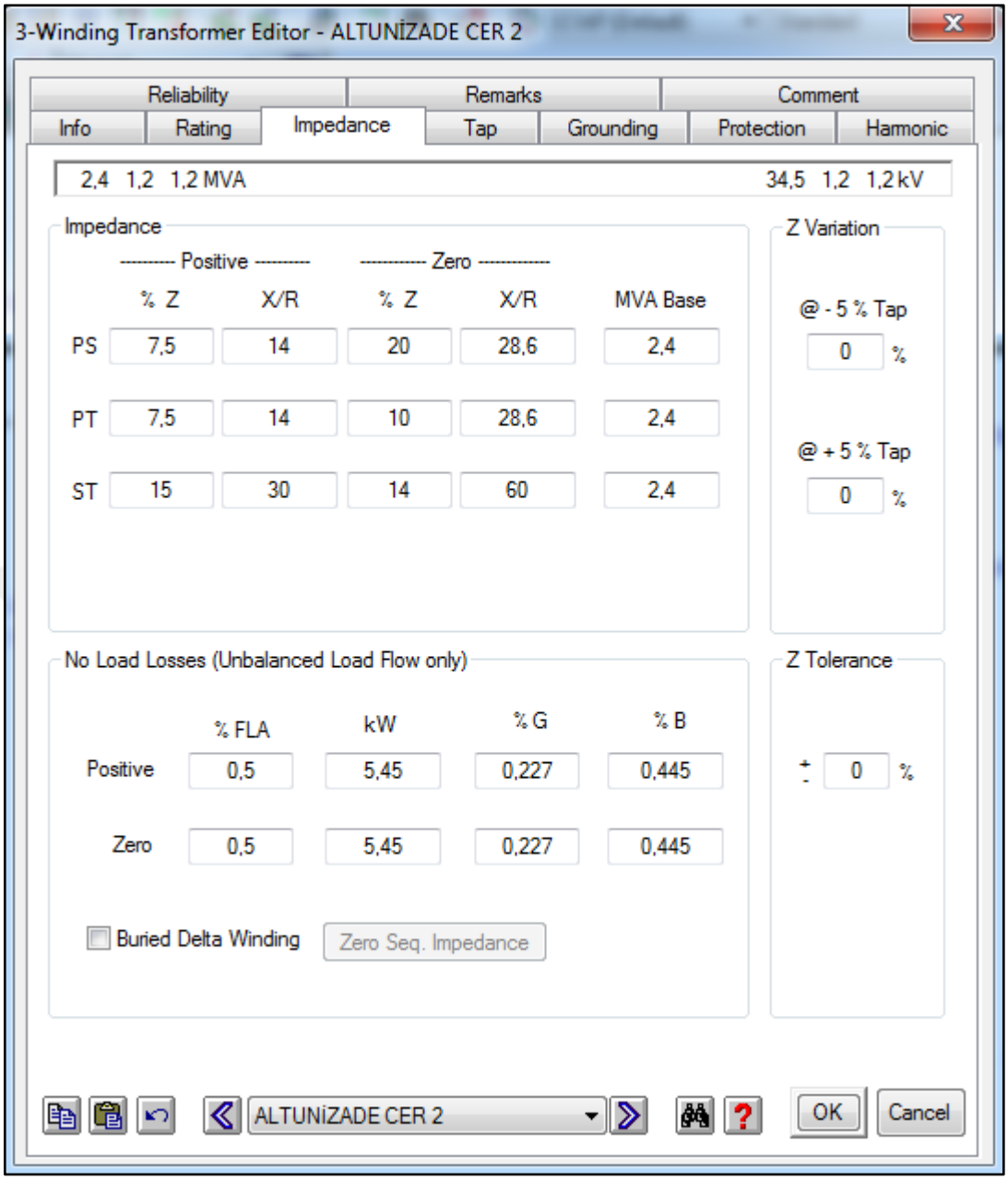
Siemens Cer Transformatör Bilgileri		
Parametre	**Birim**	**Değer**
Nominal Güç (Primer)	MVA	3,3
(Sekonder 1)	MVA	1,65
(Sekonder 2)	MVA	1,65
Gerilim (Primer)	kV	34,5
(Sekonder 1)	kV	1,2
(Sekonder 2)	kV	1,2
Bağlantı Şekli	-	D0d0y11
Yükte kayıplar	kW	13,82
Boşta Kayıplar	kW	7,294

Şekil 5.4'te ETAP programında kullanılan 3300 kVA gücündeki Siemens marka cer transformatörü için oluşturulan modele ait empedans bilgileri gösterilmiştir.

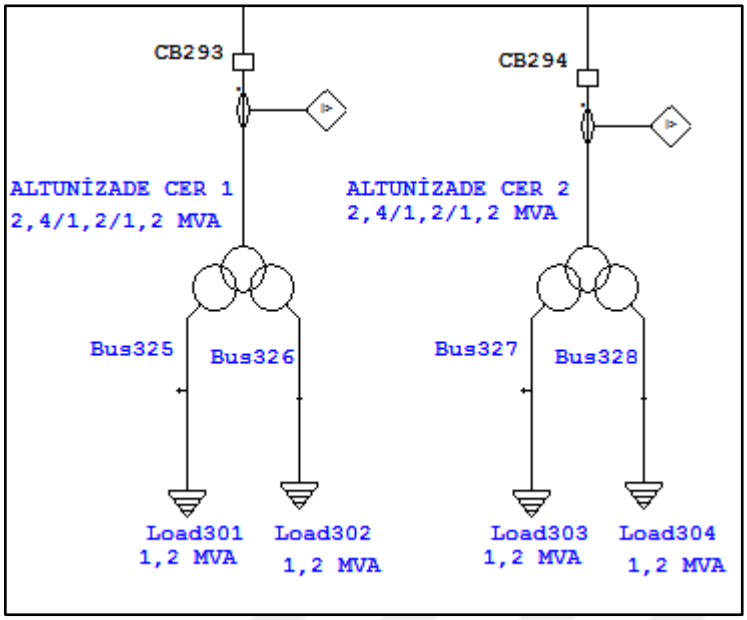


Şekil 5. 4 3300 kVA cer transformatör ETAP programı empedans bilgisi

2,4 MVA cer transformatörleri M5 hattında mevcut durumunda kullanılmamaktadır. Ancak, uygulanacak işletme senaryoları gereği simülasyon çalışmasında kullanılarak M5 hattı yeniden modellenecektir. Bu modele dayalı transformatör ve kablo kayıpları paylaşılacaktır. Bu bağlamda Şekil 5.5 ve 5.6, 2,4 MVA cer transformatörünün ETAP programında oluşturulan modelinin parametreleri paylaşılmıştır.



Şekil 5. 5 2400 kVA cer transformatör ETAP programı empedans bilgisi



Şekil 5. 6 2,4 MVA Cer transformatörü ETAP modeli

Çizelge 5.36'de 2,4 MVA cer transformatörü etiket bilgileri verilmiştir.

Çizelge 5. 36 2400 kVA cer transformatör etiket bilgisi

2,4 MVA Cer Transformatör Bilgileri		
Parametre	**Birim**	**Değer**
Nominal Güç (Primer)	MVA	2,4
(Sekonder 1)	MVA	1,2
(Sekonder 2)	MVA	1,2
Gerilim (Primer)	kV	34,5
(Sekonder 1)	kV	1,2
(Sekonder 2)	kV	1,2
Bağlantı Şekli	-	D0d0y11
Yükte kayıplar	kW	9,55
Boşta Kayıplar	kW	5,45

5.2.1.3 İç İhtiyaç Transformatörlerinin Modellenmesi

Metro İstanbul A.Ş. M5 hattının iç ihtiyaç enerji temini OG hücrelerine bağlı 34,5/0,4 kV transformatörler aracılığıyla temin edilmektedir. İlgili iç ihtiyaç transformatörları alçak gerilim tarafında havalandırma fanları, harmonik filtreli AG kompanzasyon sistemleri, istasyon ve aydınlatmalar gibi çeşitli sistemleri beslemektedir.

ETAP programında oluşturulan transformatör modellerine ait özellikler aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Model içerisindeki oluşturulan transformatörler için cer transformatörlerinde olduğu gibi gerçek etiket değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 5. 37 2000 kVA cer transformatör etiket bilgisi

İç İhtiyaç Transformatör Bilgileri		
Parametre	**Birim**	**Değer**
Nominal Güç	MVA	2
Gerilim	kV	34,5/0,4
Bağlantı Şekli	-	Dyn11
Uk	%	8,22
X/R	-	11,39
Yükte kayıplar	kW	14,376
Boşta Kayıplar	kW	4,345

Çizelge 5. 38 1600 kVA cer transformatör etiket bilgisi

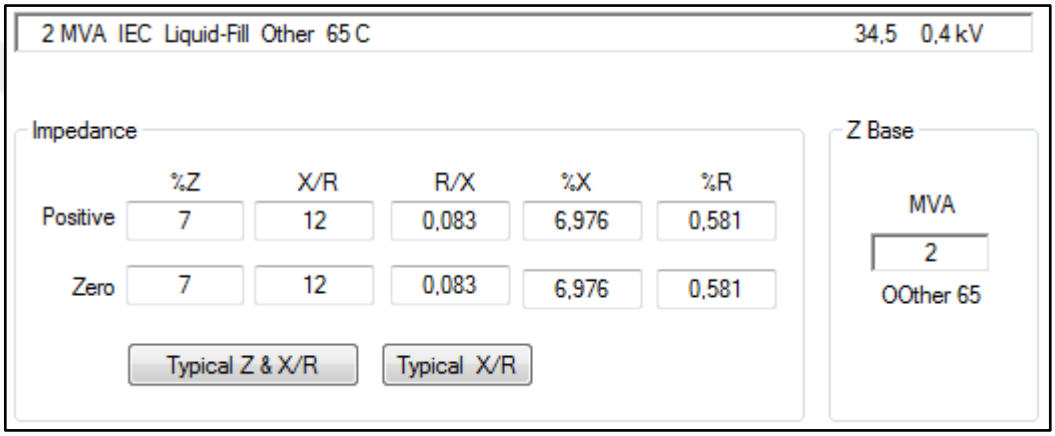
İç İhtiyaç Transformatör Bilgileri		
Parametre	**Birim**	**Değer**
Nominal Güç	MVA	1,6
Gerilim	kV	34,5/0,4
Bağlantı Şekli	-	Dyn11
Uk	%	7,96
X/R	-	9,13
Yükte kayıplar	kW	13,866
Boşta Kayıplar	kW	3,751

Çizelge 5. 39 1000 kVA cer transformatör etiket bilgisi

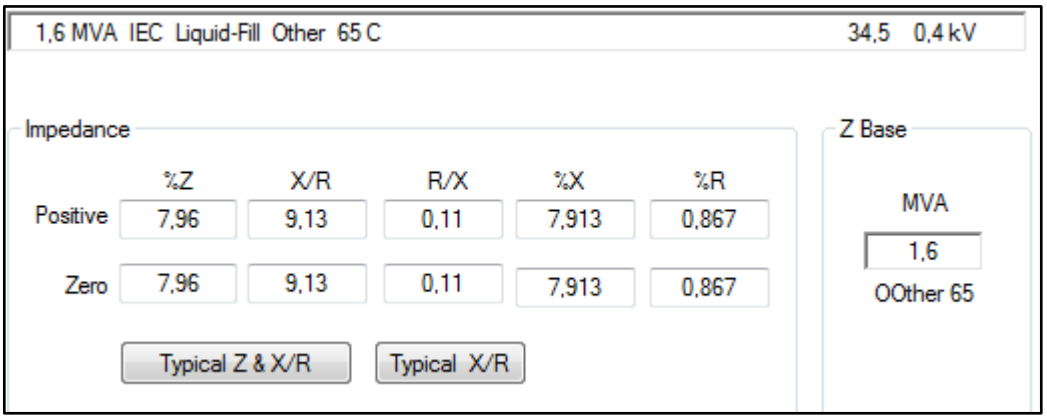
İç İhtiyaç Transformatör Bilgileri		
Parametre	**Birim**	**Değer**
Nominal Güç	MVA	1
Gerilim	kV	34,5/0,4
Bağlantı Şekli	-	Dyn11
Uk	%	7
X/R	-	7,5
Yükte kayıplar	kW	10,5
Boşta Kayıplar	kW	2

Çizelge 5. 40 630 kVA cer transformatör etiket bilgisi

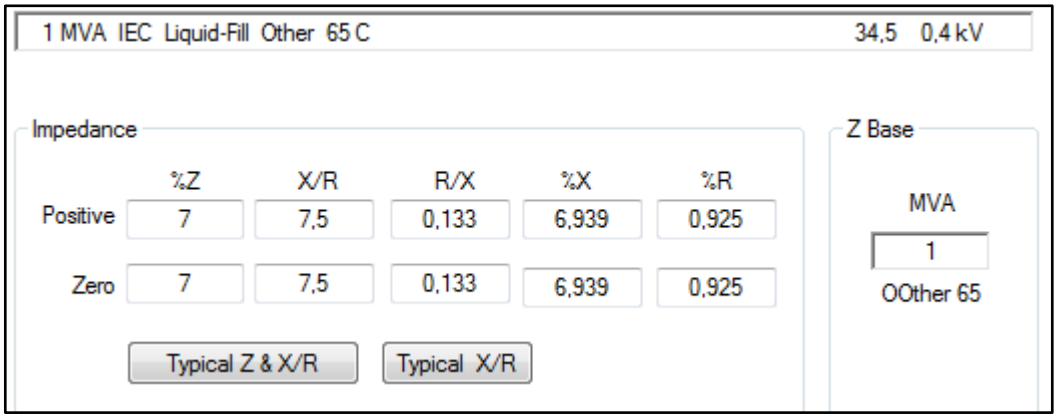
İç İhtiyaç Transformatör Bilgileri		
Parametre	**Birim**	**Değer**
Nominal Güç	MVA	0,63
Gerilim	kV	34,5/0,4
Bağlantı Şekli	-	Dyn11
Uk	%	4,5
X/R	-	4,15
Yükte kayıplar	kW	6,65
Boşta Kayıplar	kW	1,45



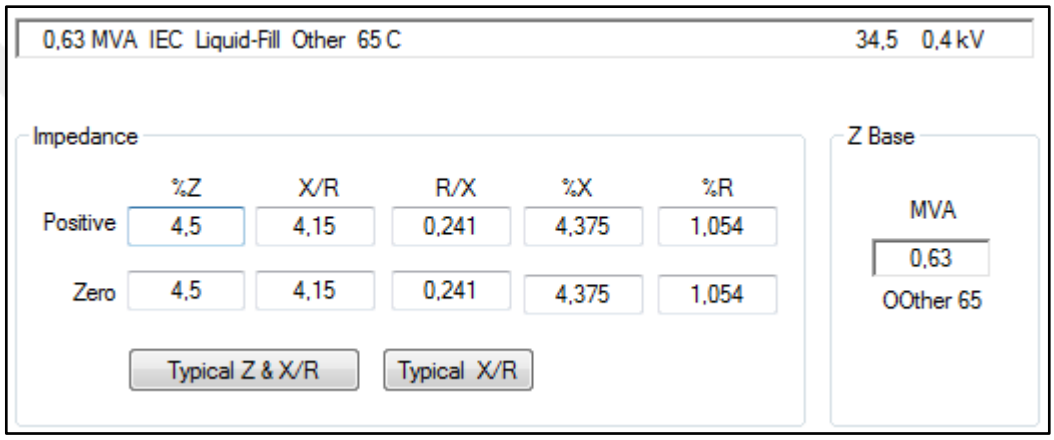
Şekil 5. 7 2 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri



Şekil 5. 8 1,6 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri



Şekil 5. 9 1 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri



Şekil 5. 10 0,63 MVA iç ihtiyaç transformatör ETAP modeli parametreleri

Çeşitli işletme senaryolarında modeller oluşturularak simülasyon programı çalıştırılmıştır.

5.2.2 Analiz Çalışmaları

ETAP yazılımında modellenen M5 Hattı üzerinde, aşağıda belirtilen durumlar için çeşitli işletme senaryoları oluşturularak analiz çalışmaları yapılmıştır. Analiz çalışmalarında yüklerin belirlenmesi için transformatörler üzerinden canlı ölçümler yapılmıştır. Ölçümler en yoğun işletme saat aralığı olarak kabul edilen 09:00 – 09:30 arasında her 5 dakikada bir, aynı anda olmak üzere Çarşı, Bulgurlu ve Fıstıkağacı istasyonlarından yapılmıştır.

Durum-1: Maksimum Yüklenme: Trenler tarafından çekilen anlık tepe güçler cer transformatölerinin analizörlerinden okunarak elde edilmiştir. Yapılan bu ölçümler

incelendiğinde, toplamda en fazla gücün saat 09:30'da çekildiği belirlenmiştir. Bu andaki maksimum çekilen güçler analiz programına maksimum yük olarak girilmiştir.

Ölçüm yapılamayan transformatörlerin yükleri ise, ölçümü alınan transformatörlerin 09:30'daki maksimum yükleri toplanarak ortalamasının alınması ile elde edilmiştir.

Durum-2: Ortalama Yüklenme: Saat 09:00 – 09:30 arasında 5'er dakika ara ile yapılan 7 ölçümün her birinin maksimum ve minimum değeleri toplanarak ortalaması alınmıştır. Bu ortalama değerler kendi aralarında toplanmış ve sonuç 7'ye bölünerek ortalama yük elde edilmiştir.

Ölçüm yapılamayan transformatörlerin yükleri, ölçümü alınan transformatörlerin ortalama yükleri toplanarak tekrar ortalamasının alınması ile elde edilmiştir.

Durum-3: Gerçek Ortalama Yüklenme: Gerçek ortalama yük, 05.04.2018 tarihinden itibaren işletmeye alınan cer transformatörlerinin analizörlerinden okunmuştur. Bu analizörler, transformatörler çalıştığı andan itibaren ortalama yüklenmeyi % olarak kayıt altına almaktadır.

5.2.2.1 Durum-1: Maksimum Yüklenme

5.2.2.1.1 Senaryo-1: Mevcut Durum

Mevcut durum, M5 Hattı'nın şekil 4. 6'daki tek hat şemasında görülen güncel işletme altındaki durumudur. Transformatör ve kablolarda hiçbir değişiklik yapılmamıştır. Hattaki hiçbir kesici açık durumda değildir ve hat tüm transformatörlerden beslenmektedir.

Bu koşulda simülasyon programı çalıştırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları Çizelge 5. 41'de verilmiştir.

Çizelge 5. 41 Maksimum yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1-P	3,134	7,394
ALTUNİZADE CER 2-P	3,074	7,394
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,051	4,345
ALTUNİZADE SERVİS 2	0,051	4,345
BAGLARBASI SERVİS 1	0,051	4,345

BAGLARBASI SERVİS 2	0,092	2,679
BULGURLU CER 1-P	3,769	7,394
BULGURLU CER 2-P	3,818	7,394
BULGURLU SERVİS 1	0,05	3,751
BULGURLU SERVİS 2	0,05	3,751
FISTIKAGACI CER 1-P	4,081	7,394
FISTIKAGACI CER 2-P	4,081	7,394
FISTIKAGACI SERVİS 2	0,034	3,751
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,05	3,751
KISIKLI SERVİS 1	0,036	4,345
KISIKLI SERVİS 2	0,07	4,345
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	1,732	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	1,732	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,942	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,942	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,088	3,751
YAMANEVLER SERVİS 2	0,05	3,751
ÇARŞI CER 1-P	3,896	7,934
ÇARŞI CER 2-P	3,828	7,934
ÇARŞI SERVİS 1	0,067	3,751
ÇARŞI SERVİS 2	0,088	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 1	0,067	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 2	0,088	3,751
ÜSKÜDAR CER 1-P	3,072	7,394
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,051	4,345
ÜSKÜDAR SERVİS 2	0,051	4,345
Toplam	39,186	258,23
Genel Toplam Kayıp	297,416	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.42'de verilmiştir.

Çizelge 5. 42 Maksimum yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 cu kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,002
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,002
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,274
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,274
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,325
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,325
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,606
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,606
F.AGACI1-BAGLARBASI1	0,941
F.AGACI2-BGLARBSI2	0,941

KISIKLI1-BULGURLU2	0,009
KISIKLI2-BULGURLU1	0,009
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,325
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,325
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,71
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,425
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	0,12
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	0,12
TOPMLAM	6,341

5.2.2.1.2 Senaryo-2: Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum

Bu işletme senaryosunda, çift olarak bulunan cer ve iç ihtiyaç transformatörlerinden birer tanesinin devre dışı bırakıldığı durum analiz edilmiştir. Devre dışı bırakılan cer transformatörlerinin yükleri işletmede kalan cer transformatörleri arasında, iç ihtiyaç transformatörlerinin yükleri ise aynı şekilde kalan iç ihtiyaç transformatörleri arasında paylaştırılmıştır.

Bu koşulda simülasyon programı çalıştırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları çizelge 5. 43'te verilmiştir.

Çizelge 5. 43 Maksimum yüklenme altında transformatör sayısının düşürüldüğü durum için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1	11,18	7,294
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,205	4,345
BAGLARBASI SERVİS 1	0,205	4,345
BULGURLU CER 1	10,492	7,294
BULGURLU SERVİS 1	0,198	3,751
FISTIKAGACI CER 1	11,174	7,294
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,166	3,751
KISIKLI SERVİS 1	0,205	4,345
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	1,665	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	1,665	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,858	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,858	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,269	3,751
ÇARŞI CER 1	10,493	7,294
ÇARŞI SERVİS 1	0,308	3,751

ÜMRANİYE SERVİS 1	0,308	3,751
ÜSKÜDAR CER 1	11,168	7,294
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,205	4,345
Toplam	**61,622**	**192,605**
Genel Toplam Kayıp	**254,227**	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.44'te verilmiştir.

Çizelge 5. 44 Maksimum yüklenme altında transformatör sayısının düşürüldüğü durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,041
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,041
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,26
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,26
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,145
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,145
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,687
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,687
F.AGACI1-BGLRBASI1 240 CU	1,23
F.AGACI2-BGLARBSI2 240 CU	1,23
KISIKLI1-BULGURLU2	0,073
KISIKLI2-BULGURLU1	0,071
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,291
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,291
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,509
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,305
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1 240 CU	0,387
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2 240 CU	0,387
TOPLAM	7,042

5.2.2.1.3 Senaryo-3: Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum

Çizelge 5.45'in sol kısmında M5 Hattı mevcut durumunda bulunan transformatörler gösterilmiştir. Çizelgenin sağ tarafında ise bu transformatörlerden bir kademe düşük güçte seçilen yeni transformatörler verilmiştir.

Çizelge 5. 45 Mevcut ve güçleri düşürülmüş yeni transformatörler

Mevcut Durumda Bulunan	Yerine Gelen
9 adet 3,3 MVA cer transformatörü	**9 adet 2,4 MVA cer transformatörü**
7 adet 2 MVA iç ihtiyaç transformatörü	**7 adet 1,6 MVA iç ihtiyaç transformatörü**
10 adet 1,6 MVA iç ihtiyaç transformatörü	**10 adet 1MVA iç ihtiyaç transformatörü**
1 adet 1 MVA iç ihtiyaç transforamtörü	**1 adet 0,63 MVA iç ihtiyaç transforamtörü**

Mevcut transformatörlerden birer kademe düşük güçte seçilen yeni transformatörler ile M5 Hattı modellenerek analiz çalışmaları tekrar yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları Çizelge 5. 46'da verilmiştir.

Çizelge 5. 46 Maksimum yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1	4,862	5,45
ALTUNİZADE CER 2	4,862	5,45
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,067	3,751
ALTUNİZADE SERVİS 2	0,067	3,751
BAGLARBASI SERVİS 2	0,168	3,751
BAĞLARBASI SERVİS 1	0,067	1,45
BULGURLU CER 1	6,472	5,45
BULGURLU CER 2	6,163	5,45
BULGURLU SERVİS 1	0,092	2,679
BULGURLU SERVİS 2	0,111	2,679
FISTIKAGACI CER 1	6,627	5,45
FISTIKAGACI CER 2	6,627	5,45
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,111	2,679
FISTIKAĞACI SERVİS 2	0,132	2,679
KISIKLI SERVİS 1	0,067	3,751
KISIKLI SERVİS 2	0,067	3,751
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	1,753	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	1,753	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,955	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,955	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,132	2,679
YAMANEVLER SERVİS 2	0,155	2,679
ÇARŞI CER 1	6,472	5,45
ÇARŞI CER 2	6,163	5,45
ÇARŞI SERVİS 1	0,111	2,679

ÇARŞI SERVİS 2	0,155	2,679
ÜMRANİYE SERVİS 1	0,111	2,679
ÜMRANİYE SERVİS 2	0,111	2,679
ÜSKÜDAR CER 1	4,86	5,45
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,067	3,751
ÜSKÜDAR SERVİS 2	0,067	3,751
Toplam	**60,382**	**223,547**
Genel Toplam Kayıp	**283,929**	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.47'de verilmiştir.

Çizelge 5. 47 Maksimum yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI 2	0,002
ALTUNİZADE2-KISIKLI 1	0,002
BAGLARBASI BEDAS KABLO 1	0,137
BAGLARBASI BEDAS KABLO 1	0,137
BAGLARBASI BEDAS KABLO 2	0,137
BAGLARBASI BEDAS KABLO 2	0,137
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE 2	0,315
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE 1	0,315
BULGURL2-ÜMRANİYE 1	0,619
BULGURLU1-ÜMRANİYE 2	0,619
F.AGACI1-BGLRBASI 1	0,958
F.AGACI2-BGLARBSI 2	0,958
KISIKLI1-BULGURLU 2	0,008
KISIKLI2-BULGURLU 1	0,008
ÇARŞI1-YAMANEVLER 2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER 1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO 1	0,324
ÜMRANİYE BEDAS KABLO 2	0,324
ÜMRANİYE1-ÇARŞI 2	0,739
ÜMRANİYE2-ÇARŞI 1	0,443
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI 1	0,117
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI 2	0,117
TOPLAM	**6,418**

5.2.2.1.4 Senaryo-4: 3x(1x240) mm^2 Kablo Yerine 3x(1x95) mm^2 Kablo Kullanılması Durumu

Bu işletme senaryosunda, 240 mm^2 kesitli OG kablosu kullanımı yerine 95 mm^2 kesitli OG kablo kullanımı dışında mevcut durum koşulları aynen geçerlidir. Tüm kesiciler kapalı konumda ve hat tüm transformatörlerden beslenmektedir.

M5 hattı elektrifikasyon sisteminde OG şebekede 3x(1x240) mm^2 kesitli XLPE OG kablolar kullanılmaktadır. Bu kablolar yerine 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kablolar ile M5 hattı yeniden modellenerek analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda 3x(1x95) mm^2 kesitli kabloların da sistemi rahatça yüklenebildiği görülmüştür.

Çizelge 5.48'de 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kabloların kullanılması durumunda kablo kayıpları verilmiştir.

Çizelge 5. 48 Maksimum yüklenme altında mevcut durum için 95 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,006
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,006
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,136
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,136
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,136
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,136
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,809
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,809
BULGURL2-ÜMRANİYE1	1,531
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	1,531
F.AGACI1-BGLRBASI1	2,379
F.AGACI2-BGLARBSI2	2,379
KISIKLI1-BULGURLU2	0,024
KISIKLI2-BULGURLU1	0,024
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,003
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,003
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,317
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,317
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	1,81
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	1,084
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	0,303
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	0,303
TOPLAM	14,182

5.2.2.1.5 Karşılaştırma

Maksimum yüklenme durumu için, incelenen senaryolarda meydana gelen kayıpların karşılaştırılması Çizelge 5.49'da verilmiştir.

Çizelge 5. 49 Maksimum yüklenme altında uygulanan senaryolarda toplam kayıplar

Senaryo	Kayıplar (kW) (Transformatör+Kablo)
Mevcut Durum	**303,757**
Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum	**261,269**
Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum	**290,347**
Mevcut Durum Kablo Kesiti Düşürülmesi (95 mm^2)	**311,598**

Mevcut duruma göre transformatör sayısının düşürüldüğü durum ile işletmeye devam edilirse, kayıplar toplamı 42,488 kW azalmıştır. Bu da kayıplarda yaklaşık %13,99 oranında düşme anlamına gelmektedir.

Mevcut duruma kıyasla transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum ile işletmeye devam edildiği takdirde toplam kaybın 13,41 kW azaldığı sonucu elde Çizelge 5.49'dan elde edilebilir. Bu da kayıplarda yaklaşık %4,42 oranında düşme anlamına gelmektedir.

Mevcut durumda 3x(1x240) mm^2 kesitli XLPE OG kablolar yerine 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kabloların kullanılması durumunda toplam kayıpta 7,841 kW artış oldupu görülmüştür. Bu da yaklaşık % 2,58'lik artış ifade etmektedir.

Çizelge 5. 50 Maksimum yüklenme altında 240 mm^2 kesitli kablo ile 95 mm^2 kesitli kabloların toplam kayıpları

Kablo Kesitleri	Toplam Kablo Kaybı (kW)
3x(1x240) MM XLPE BAKIR KABLO	**6,341**
3x(1x95) MM2 XLPE BAKIR KABLO	**14,182**

Sadece kablo kayıpları açısından karşılaştırma ise Çizelge 5.50'de verilmiştir. Sistemde kablo kesitinin düşürülmesi yaklaşık %123,66'lık kayıp artışına sebep olmaktadır.

5.2.2.2 Durum-2: Ortalama Yüklenme

5.2.2.2.1 Senaryo-1: Mevcut Durum

M5 hattının Mevcut durumunda bulunan transformatör ve kablolar ortalama yük ile yüklenmiştir. Bu durumda simülasyon programı çalıştırılarak analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları Çizelge 5. 51'de verilmiştir.

Çizelge 5. 51 Ortalama yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları Boşta
ALTUNİZADE CER 1	1,248	7,294
ALTUNİZADE CER 2	1,248	7,294
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,051	4,345
ALTUNİZADE SERVİS 2	0,051	4,345
BAGLARBASI SERVİS 1	0,052	4,345
BAGLARBASI SERVİS 2	0,092	2,679
BULGURLU CER 1	1,17	7,294
BULGURLU CER 2	1,324	7,294
BULGURLU SERVİS 1	0,05	3,751
BULGURLU SERVİS 2	0,05	3,751
FISTIKAGACI CER 1	1,174	7,294
FISTIKAGACI CER 2	1,102	7,294
FISTIKAGACI SERVİS 2	0,034	3,751
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,05	3,751
KISIKLI SERVİS 1	0,036	4,345
KISIKLI SERVİS 2	0,07	4,345
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	0,693	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	0,693	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,38	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,38	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,088	3,751
YAMANEVLER SERVİS 2	0,05	3,751
ÇARŞI CER 1	1,241	7,294
ÇARŞI CER 2	1,315	7,294
ÇARŞI SERVİS 1	0,068	3,751
ÇARŞI SERVİS 2	0,088	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 1	0,309	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 2	0,088	3,751
ÜSKÜDAR CER 1	1,247	7,294
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,051	4,345
ÜSKÜDAR SERVİS 2	0,051	4,345

Toplam	14,544	256,25
Genel Toplam Kayıp	270,794	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.52'de verilmiştir.

Çizelge 5. 52 Ortalama yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Losses
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,001
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,001
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,054
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,054
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,054
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,054
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,146
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,146
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,222
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,222
F.AGACI1-BGLRBASI1	0,329
F.AGACI2-BGLARBSI2	0,329
KISIKLI1-BULGURLU2	0,005
KISIKLI2-BULGURLU1	0,004
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,129
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,129
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,276
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,165
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	0,056
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	0,056
TOPLAM KAYIP	2,434

5.2.2.2.2 Senaryo-2: Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum

Bu çalışma durumunda M5 hattında çift olarak bulunan iç ihtiyaç ve cer transformatörlerinden birinin devre dışı bırakıldığı durum incelenmiştir. Devre dışı bırakılan transformatörlerin ortalama yükleri diğer transformatörler arasında paylaştırılmıştır.

Çizelge 5.53'te bu çalışma durumundaki transformatör kayıpları verilmiştir.

Çizelge 5. 53 Ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1	5,623	7,294
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,205	4,345
BAGLARBASI SERVİS 1	0,205	4,345
BULGURLU CER 1	4,979	7,294
BULGURLU SERVİS 1	0,198	3,751
FISTIKAGACI CER 1	4,291	7,294
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,166	3,751
KISIKLI SERVİS 1	0,07	4,345
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	0,811	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	0,811	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,424	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,424	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,269	3,751
ÇARŞI CER 1	5,202	7,294
ÇARŞI SERVİS 1	0,068	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 1	0,309	3,751
ÜSKÜDAR CER 1	4,428	7,294
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,205	4,345
Toplam	28,688	192,605
Genel Toplam Kayıp	221,293	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.54'te verilmiştir.

Çizelge 5. 54 Ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,013
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,013
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,126
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,126
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,097
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,097
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,322
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,322
F.AGACI1-BGLRBASI1	0,516
F.AGACI2-BGLARBSI2	0,516
KISIKLI1-BULGURLU2	0,029

KISIKLI2-BULGURLU1	0,029
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,144
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,144
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,254
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,152
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	0,166
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	0,166
TOPLAM KAYIP	3,234

5.2.2.2.3 Senaryo-3: Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum

Çizelge 5.45'te M5 hattı mevcut durumunda bulunan transformatörlerden bir kademe düşük güçte seçilen yeni transformatörler verilmiştir. Yeni belirlenen bu transformatörler ile M5 hattı yeniden modellenerek analiz çalışmaları yapılmıştır. Transformatör ve kablo kayıpları sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları Çizelge 5. 55'te verilmiştir.

Çizelge 5. 55 Ortalama yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum için transformatör kayıpları

TRANSFORMATÖR ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1	1,967	5,45
ALTUNİZADE CER 2	1,967	5,45
ALTUNİZADE SERVİS_1	0,068	3,751
ALTUNİZADE SERVİS-2	0,068	3,751
BAGLARBASI SERVİS 2	0,169	3,751
BAĞLARBASI SERVİS_1	0,068	1,45
BULGURLU CER 1	2,055	5,45
BULGURLU CER 2	1,967	5,45
BULGURLU SERVİS_1	0,111	2,679
BULGURLU SERVİS-2	0,111	2,679
FISTIKAGACI CER 1	1,797	5,45
FISTIKAGACI CER 2	1,797	5,45
FISTIKAĞACI SERVİS_1	0,111	2,679
FISTIKAĞACI SERVİS-2	0,132	2,679
KISIKLI SERVİS_1	0,068	3,751
KISIKLI SERVİS-2	0,068	3,751
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	0,687	30

TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	0,687	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,377	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,377	30
YAMANEVLER SERVİS_1	0,132	2,679
YAMANEVLER SERVİS-2	0,132	2,679
ÇARŞI CER 1	2,191	5,45
ÇARŞI CER 2	2,237	5,45
ÇARŞI SERVİS_1	0,111	2,679
ÇARŞI SERVİS-2	0,132	2,679
ÜMRANİYE SERVİS_1	0,111	2,679
ÜMRANİYE SERVİS-2	0,111	2,679
ÜSKÜDAR CER 1	1,967	5,45
ÜSKÜDAR SERVİS_1	0,068	3,751
ÜSKÜDAR SERVİS-2	0,068	3,751
Topam	21,912	223,547
Genel Toplam Kayıp	245,459	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.56'da verilmiştir.

Çizelge 5. 56 Ortalama yüklenme altında transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum İçin 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,001
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,001
BAGLARBASI BEDAS KABLO	0,108
BAGLARBASI BEDAS KABLO 2	0,108
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,142
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,142
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,226
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,226
F.AGACI1-BGLRBASI1	0,332
F.AGACI2-BGLARBSI2	0,332
KISIKLI1-BULGURLU2	0,004
KISIKLI2-BULGURLU1	0,004
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,128
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,128
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,297
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,178
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	0,054
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	0,054
TOPLAM	2,467

5.2.2.2.4 Senaryo-4: 3x(1x240) MM^2 Kablo Yerine 3x(1x95) MM^2 Kablo Kullanılması Durumu

Bu işletme senaryosunda, 240 mm^2 kesitli XLPE OG kabloları yerine 95 mm^2 kesitli XLPE OG kabloları kullanılmıştır. Bu değişimin dışında mevcut durum koşulları aynen geçerlidir. Tüm kesiciler kapalı konumda ve hat tüm transformatörlerden beslenmektedir.

Çizelge 5.57'de 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kabloların kullanılması durumunda kablo kayıpları verilmiştir.

Çizelge 5. 57 Ortalama yüklenme altında mevcut durum için 95 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Losses
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,002
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,002
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,108
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,108
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,362
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,362
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,572
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,572
F.AGACI1-BGLRBASI1 95 CU	0,832
F.AGACI2-BGLARBSI2 95 CU	0,832
KISIKLI1-BULGURLU2	0,013
KISIKLI2-BULGURLU1	0,013
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,003
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,003
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,126
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,126
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,716
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,429
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1 95 CU	0,141
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2 95 CU	0,141
TOPLAM KAYIP	5,463

5.2.2.2.5 Karşılaştırma

Ortalama yüklenme durumunda, mevcut durum senaryosu ile çiftli olanlardan 1 cer ve 1 iç ihtiyaç transformatörlerinin devre dışı bırakıldığı durum ve transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum arasında kayıpları açısından bir kıyaslama yapılmıştır. İlgili kıyaslama Çizelge 5.58'de verilmiştir.

Çizelge 5. 58 Ortalama yüklenme altında uygulanan senaryolarda toplam kayıplar

Ortalama Yüklenme Durumu	
Senaryo	**Kayıplar (kW) (Transformatör+Kablo)**
Mevcut Durum	**273,228**
Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum	**224,527**
Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum	**247,926**
Mevcut Durum Kablo Kesiti Düşürülmesi (95 mm^2)	**276,257**

Mevcut duruma göre transformatör sayısının düşürüldüğü durum ile işletmeye devam edilirse, kayıplar toplamı 48,701 kW azalmıştır. Bu da kayıplarda yaklaşık %17,83 oranında düşme anlamına gelmektedir.

Mevcut duruma kıyasla transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum ile işletmeye devam edildiği takdirde ise toplam kaybın 25,302 kW azaldığı sonucu elde edilmektedir. Bu da kayıplarda yaklaşık %9,26 oranında düşme anlamına gelmektedir.

Çizelge 5.52 ile Çizelge 5.57'deki sonuçlar karşılaştırıdığında, 95 mm^2 kesitli kablo kullanılması durumunda 240 mm^2 kesitli kabloya göre kayıpların arttığı görülmüştür. Bu durumda toplam kayıpta 3,029 kW'lık artış olduğu görülmüştür. Bu da yaklaşık % 1,11' lik artış ifae etmektedir.

Çizelge 5. 59 Ortalama yüklenme altında 240 mm^2 kesitli kablo ile 95 mm^2 kesitli kabloların toplam kayıpları

Kablo Kesitleri	Toplam Kablo Kaybı (kW)
3x(1x240) MM XLPE BAKIR KABLO	**2,434**
3x(1x95) MM2 XLPE BAKIR KABLO	**5,463**

Sadece kablo kayıpları açısından karşılaştırıldığında ise Çizelge 5.59'da verilmiştir. Mevcut sistemde kablo kesitinin düşürülmesi yaklaşık %124,45'lik kayıp artışına sebep olmaktadır.

5.2.2.3 Durum-3: Gerçek Ortalama Yüklenme

5.2.2.3.1 Senaryo-1: Mevcut Durum

M5 hattının mevcut durumunda bulunan transformatör ve kablolar, belirlenen gerçek ortalama yük ile yüklenmiştir. Hattaki tüm kesiciler kapalı durumda ve hat tüm transformatörler üzerinden beslenmektedir. Bu durumda simülasyon programı çalıştırılarak analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları çizelge 5. 60'da verilmiştir.

Çizelge 5. 60 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1-P	0,195	7,294
ALTUNİZADE CER 2-P	0,226	7,294
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,279	4,345
ALTUNİZADE SERVİS 2	0,279	4,345
BAGLARBASI SERVİS 1	0,28	4,345
BAGLARBASI SERVİS 2	0,18	2,679
BULGURLU CER 1-P	0,195	7,294
BULGURLU CER 2-P	0,226	7,294
BULGURLU SERVİS 1	0,27	3,751
BULGURLU SERVİS 2	0,27	3,751
FISTIKAGACI CER 1-P	0,14	7,294
FISTIKAGACI CER 2-P	0,166	7,294
FISTIKAGACI SERVİS 2	0,232	3,751
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,232	3,751
KISIKLI SERVİS 1	0,279	4,345
KISIKLI SERVİS 2	0,28	4,345
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	0,334	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	0,334	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,186	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,186	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,269	3,751
YAMANEVLER SERVİS 2	0,269	3,751
ÇARŞI CER 1-P	0,259	7,294
ÇARŞI CER 2-P	0,259	7,294
ÇARŞI SERVİS 1	0,269	3,751
ÇARŞI SERVİS 2	0,233	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 1	0,269	3,751

ÜMRANİYE SERVİS 2	0,27	3,751
ÜSKÜDAR CER 1-P	0,195	7,294
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,28	4,345
ÜSKÜDAR SERVİS 2	0,28	4,345
Toplam	**7,621**	**256,25**
Genel Toplam Kayıp	**263,871**	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da çizelge 5.61'de verilmiştir.

Çizelge 5. 61 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Losses
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,001
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,001
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,052
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,052
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,075
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,075
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,087
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,087
F.AGACI1-BGLRBASI1 240 CU	0,12
F.AGACI2-BGLARBSI2 240 CU	0,12
KISIKLI1-BULGURLU2	0,005
KISIKLI2-BULGURLU1	0,005
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,005
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,005
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,063
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,063
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,136
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,082
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1 240 CU	0,031
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2 240 CU	0,031
TOPLAM KAYIP	**1,096**

5.2.2.3.2 Senaryo-2: Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum

Bu çalışma durumunda M5 hattında çift olarak bulunan iç ihtiyaç ve cer transformatörlerinden birinin devre dışı bırakıldığı durum incelenmiştir. Devre dışı bırakılan transformatörlerin gerçek ortalama yükleri diğer transformatörler arasında paylaştırılmıştır.

Çizelge 5.62'de bu çalışma durumundaki transformatör kayıpları verilmiştir.

Çizelge 5. 62 Gerçek ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için transformatör kayıpları

TRAFO ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1-P	0,608	7,294
ALTUNİZADE SERVİS 1	1,11	4,345
BAGLARBASI SERVİS 1	0,628	4,345
BULGURLU CER 1-P	0,838	7,294
BULGURLU SERVİS 1	1,073	3,751
FISTIKAGACI CER 1-P	0,608	7,294
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,923	3,751
KISIKLI SERVİS 1	1,11	4,345
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	0,334	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	0,334	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,184	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,184	30
YAMANEVLER SERVİS 1	1,07	3,751
ÇARŞI CER 1-P	1,033	7,294
ÇARŞI SERVİS 1	0,995	3,751
ÜMRANİYE SERVİS 1	1,07	3,751
ÜSKÜDAR CER 1-T	0,333	7,294
ÜSKÜDAR SERVİS 1	1,112	4,345
Toplam	13,547	192,605
Genel Toplam Kayıp	206,152	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da Çizelge 5.63'te verilmiştir.

Çizelge 5. 63 Gerçek ortalama yüklenme altında transformatör sayısının azaltılması durumu için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	0,001
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	0,001
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,026
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	0,026
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,026
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	0,026
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	0,064
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	0,064
BULGURL2-ÜMRANİYE1	0,086

BULGURLU1-ÜMRANİYE2	0,086
F.AGACI1-BGLRBASI1	0,135
F.AGACI2-BGLARBSI2	0,135
KISIKLI1-BULGURLU2	0,005
KISIKLI2-BULGURLU1	0,004
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	0,005
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	0,005
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	0,063
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	0,063
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	0,136
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	0,081
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	0,04
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	0,04
TOPLAM KAYIP	1,118

5.2.2.3.3 Senaryo-3: Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum

Çizelge 5.45'te M5 hattı mevcut durumunda bulunan transformatörlerden bir kademe düşük güçte seçilen yeni transformatörler verilmiştir. Yeni belirlenen bu transformatörler ile M5 hattı yeniden modellenerek analiz çalışmaları yapılmıştır. Analiz sonucunda transformatör ve kablo kayıpları sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar ile transformatör kayıpları Çizelge 5. 64'te verilmiştir.

Çizelge 5. 64 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için transformatör kayıpları

TRANSFORMATÖR ADLARI	kW Kayıpları (Yükte)	kW Kayıpları (Boşta)
ALTUNİZADE CER 1	0,165	5,45
ALTUNİZADE CER 2	0,192	5,45
ALTUNİZADE SERVİS 1	0,068	3,751
ALTUNİZADE SERVİS 2	0,068	3,751
BAGLARBASI SERVİS 2	0,169	3,751
BAĞLARBASI SERVİS 1	0,068	1,45
BULGURLU CER 1	0,165	5,45
BULGURLU CER 2	0,192	5,45
BULGURLU SERVİS 1	0,111	2,679
BULGURLU SERVİS 2	0,111	2,679
FISTIKAGACI CER 1	0,141	5,45
FISTIKAGACI CER 2	0,165	5,45
FISTIKAĞACI SERVİS 1	0,111	2,679
FISTIKAĞACI SERVİS 2	0,132	2,679
KISIKLI SERVİS 1	0,068	3,751

KISIKLI SERVİS 2	0,068	3,751
TEIAS BAGLARBASI A TRAFO	0,121	30
TEIAS BAGLARBASI B TRAFO	0,121	30
TEİAŞ ÜMRANİYE A TRAFO	0,067	30
TEİAŞ ÜMRANİYE B TRAFO	0,067	30
YAMANEVLER SERVİS 1	0,132	2,679
YAMANEVLER SERVİS 2	0,132	2,679
ÇARŞI CER 1	0,22	5,45
ÇARŞI CER 2	0,22	5,45
ÇARŞI SERVİS 1	0,111	2,679
ÇARŞI SERVİS 2	0,132	2,679
ÜMRANİYE SERVİS 1	0,111	2,679
ÜMRANİYE SERVİS 2	0,111	2,679
ÜSKÜDAR CER 1 P	0,165	5,45
ÜSKÜDAR SERVİS 1	0,068	3,751
ÜSKÜDAR SERVİS 2	0,068	3,751
Toplam	3,84	223,547
Genel Toplam Kayıp	227,387	

Aynı koşullar altında kablo kayıpları da çizelge 5.65'te verilmiştir.

Çizelge 5. 65 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için 240 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Losses
ALTUNİZADE1-KISIKLI 2	0,001
ALTUNİZADE2-KISIKLI 1	0,001
BAGLARBASI BEDAS KABLO 1	0,009
BAGLARBASI BEDAS KABLO 1	0,009
BAGLARBASI BEDAS KABLO 2	0,009
BAGLARBASI BEDAS KABLO 2	0,009
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE 2	0,026
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE 1	0,026
BULGURL2-ÜMRANİYE 1	0,03
BULGURLU1-ÜMRANİYE 2	0,03
F.AGACI1-BGLRBASI 1	0,048
F.AGACI2-BGLARBSI 2	0,048
KISIKLI1-BULGURLU 2	0,001
KISIKLI2-BULGURLU 1	0,001
ÇARŞI1-YAMANEVLER 2	0,001
ÇARŞI2-YAMANEVLER 1	0,001
ÜMRANİYE BEDAS KABLO 1	0,023
ÜMRANİYE BEDAS KABLO 2	0,023

ÜMRANİYE1-ÇARŞI 2	0,055
ÜMRANİYE2-ÇARŞI 1	0,033
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI 1	0,009
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI 2	0,009
Toplam Kayıplar	**0,402**

5.2.2.3.4 Senaryo-4: 3x(1x240) mm^2 Kablo Yerine 3x(1x95) mm^2 Kablo Kullanılması Durumu

Bu işletme senaryosunda, 240 mm^2 kesitli XLPE OG kabloları yerine 95 mm^2 kesitli XLPE OG kabloları kullanılmıştır. Bu değişimin dışında mevcut durum koşulları aynen geçerlidir. Tüm kesiciler kapalı konumda ve hat tüm transformatörlerden beslenmektedir.

Çizelge 5.66'da 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kabloların kullanılması durumunda kablo kayıpları verilmiştir.

Çizelge 5. 66 Gerçek ortalama yüklenme altında mevcut durum için 95 mm^2 CU kablo kayıpları

KABLO ADLARI	kW Kayıpları
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	**0,003**
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	**0,003**
BAGLARBASI BEDAS KABLO-1	**0,052**
BAGLARBASI BEDAS KABLO-2	**0,052**
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	**0,191**
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	**0,191**
BULGURL2-ÜMRANİYE1	**0,219**
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	**0,219**
F.AGACI1-BGLRBASI1	**0,305**
F.AGACI2-BGLARBSI2	**0,305**
KISIKLI1-BULGURLU2	**0,012**
KISIKLI2-BULGURLU1	**0,011**
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	**0,012**
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	**0,012**
ÜMRANİYE BEDAS KABLO1	**0,063**
ÜMRANİYE BEDAS KABLO2	**0,063**
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	**0,345**
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	**0,207**
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	**0,079**
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	**0,079**
TOPLAM KAYIP	**2,423**

5.2.2.3.5 Karşılaştırma

Gerçek ortalama yüklenme durumunda, mevcut durum senaryosu ile çiftli olanlardan 1 cer ve 1 iç ihtiyaç transformatörlerinin devre dışı bırakıldığı durum ve transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum arasında kayıplar açısından kıyaslama yapılmıştır. İlgili kıyaslama Çizelge 5.67'de verilmiştir.

Çizelge 5. 67 Gerçek ortalama yüklenme altında uygulanan senaryolarda toplam kayıplar

Gerçek Ortalama Yüklenme Durumu	
Senaryo	**Kayıplar (kW) (Transformatör+Kablo)**
Mevcut Durum	**264,967**
Transformatör Sayısının Düşürüldüğü Durum	**207,270**
Transformatör Güçlerinin Düşürüldüğü Durum	**227,789**
Mevcut Durum Kablo Kesiti Düşürülmesi (95 mm^2)	**266,294**

Mevcut duruma göre transformatör sayısının düşürüldüğü durum ile işletmeye devam edilirse, kayıplar toplamı 57,697 kW azalmıştır. Bu da kayıplarda yaklaşık %21,78 oranında düşme anlamına gelmektedir.

Mevcut duruma kıyasla transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum ile işletmeye devam edildiği takdirde ise toplam kaybın 37,178 kW azaldığı sonucu elde edilmektedir. Bu da kayıplarda yaklaşık %14,04 oranında düşme anlamına gelmektedir.

Çizelge 5.61 ile Çizelge 5.66'daki sonuçlar karşılaştırıdığında, 95 mm^2 kesitli kablo kullanılması durumunda 240 mm^2 kesitli kabloya göre kayıpların arttığı görülmüştür. 3x(1x95) mm^2 kesitli XLPE OG kablolar kullanıldığı durumda toplam kayıpta 1,327 kW'lık artış olduğu görülmüştür. Bu da yaklaşık % 0,50'lik artmayı ifade etmektedir.

Çizelge 5. 68 Gerçek ortalama yüklenme altında 240 mm^2 kesitli kablo ile 95 mm^2 kesitli kabloların toplam kayıpları

Kablo Kesitleri	Toplam Kablo Kaybı (kW)
3x(1x240) MM XLPE BAKIR KABLO	**1,096**
3x(1x95) MM2 XLPE BAKIR KABLO	**2,423**

Sadece kablo kayıpları açısından karşılaştırma ise Çizelge 5.68'de verilmiştir. Sistemde kablo kesitinin düşürülmesi yaklaşık %121,077'lik artışa sebep olmaktadır.

5.2.3 Maliyet Analizi

Bu bölümde, simülasyon sonuçlarından elde edilen değerler kullanılarak maliyet analizi çalışması yapılmıştır. Maksimum yüklenme altında, mevcut durum ile transformatör sayısının düşürüldüğü durum, mevcut durum ile transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum arasında maliyet açısından analiz yapılacaktır. Bunun yanı sıra 240 mm^2 kesitli OG kablosu kullanımı yerine 95 mm^2 kesitli OG kablosu kullanılması durumunun da maliyet açısından analizi gerçekleştirilmiştir.

5.2.3.1 Maksimum Yüklenme Durumunda Maliyet Analizi

1-Mevcut durum ile transformatör sayısının düşürüldüğü durum analizi:

M5 hattı mevcut kurulu transformatörler üzerinden maksimum yük ile beslenirken Çizelge 5. 491'dan elde edilen toplam kayıp değeri 303,757 kW'tır. Aynı yük altında çift olanlardan 1 cer ve 1 iç ihtiyaç transformatörü devre dışı bırakıldığı durumda oluşan kayıp değeri ise 261,269 kW olmuştur. Bu durumda transformatör sayısı azaltılarak işletmeye devam edildiğinde 42,488 kW'lık bir kazanç sağlanmaktadır. Metro İstanbul şirketi ulaşım için günde 18 saat hizmet vermektedir. Bu, 43,189*18 = 764,784 kWh günlük kazanç yılda ise 777,402*365 = 279.146,16 kWh kazanç anlamına gelmektedir. Metro İstanbul şirketi enerjiyi yaklaşık 0,4 TL/kWh'ten aldığı göz önüne alındığında yıllık yaklaşık 0,4*279.146,16 = 111.658,464 TL lik bir kazanç elde edeceği anlaşılmaktadır.

2-Mevcut durum ile transformatör güçlerinin düşürüldüğü durum analizi:

2.a-Enerji açısından analiz: Mevcutta bulunan transformatörler ile birer kademe düşürülerek modellenen transformatörler maliyet açısından kıyaslanmıştır. Mevcut

haldeki işletmede Çizelge 5. 492'dan elde edilen kayıp değeri 303,757 kW iken Çizelge 5. 45'te görülen birer kademe düşük transformatörler ile yeniden modellenen işletmedeki kayıp, çizelge 5.49'da 290,347 kW olarak verilmiştir. Güçleri düşürülmüş transformatörler kullanıldığında, mevcut duruma göre 13,41 kW kayıptan kazanç sağlanacağı belirlenmiştir. Maliyet açısından günde 18 saatlik çalışma ile 241,38 kWh, yılda ise 88.103,7 kWh'lik enerji tasarrufu sağlanacaktır. Bu da gün kaybını azaltarak bir yılda yaklaşık 35.241,48 TL kazanç sağlanacağını göstermektedir.

2.b-Kurulum maliyeti açısından analiz: Mevcut durumdaki transformatör fiyatlarına nazaran güçleri birer kademe düşürülerek yeni belirlenen transformatörler daha ucuzdur. Bu da yatırım maliyetini düşürecektir. Çizelge 5.69'da BEST trafo şirketinden yaklaşık olarak alınan transformatör fiyat bilgileri verilmiştir.

Çizelge 5. 69 Transformatör maliyetleri

Transformatörler	Fiyatlar (€/adet)
3,3 MVA Cer Transformatörü	24.000,00
2,4 MVA Cer Transformatörü	21.000,00
2 MVA İç İhtiyaç Transformatörü	18.000,00
1,6 MVA İç İhtiyaç Transformatörü	16.000,00
1 MVA İç İhtiyaç Transformatörü	14.000,00
0,63 MVA İç İhtiyaç Transformatörü	12.000,00

Çizelge 5.69'da BEST Trafo şirketinden yaklaşık olarak alınan transformatör maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 5.42'de verilen adetlerde transformatörler birer kademe düşük güçte seçildiğinde, Çizelge 5.69'da verilen maliyetler doğrultusunda her bir transformatör kurulumu üzerinden kazanç olacaktır. Örneğin Çizelge 5.69 incelendiğinde, 3,3 MVA cer transformatörü ile 2,4 MVA gücündeki cer transformatörü arasında 3000 Euro'luk bir fark olduğu görülmektedir.

Mevcut durum ile revizyon durum arasındaki transformatör adet ve güçlerine göre maliyet farkları Çizelge 5.70'te vermiştir.

Çizelge 5. 70 Transformatör maliyet karşılaştırmaları

Mevcut Durum Transformatör Maliyetleri		Revize Durum Transformatör Maliyetleri		Fark (€)
Transformatör Sayısı	Maliyeti (€)	Transformatör Sayısı	Maliyeti (€)	
9 adet 3,3 MVA cer transformatörü	9*24.000 = 216.000,00	9 adet 2,4 MVA cer transformatörü	9*21.000 = 189.000,00	27.000,00
7 adet 2 MVA iç ihtiyaç transformatörü	7*18.000 = 126.000,00	7 adet 1,6 MVA iç ihtiyaç transformatörü	7*16.000 = 112.000,00	14.000,00
10 adet 1,6 MVA iç ihtiyaç transformatörü	10*16.000 = 160.000,00	10 adet 1 MVA iç ihtiyaç transformatörü	10*14.000 = 140.000,00	20.000,00
1 adet 1 MVA iç ihtiyaç transforamtörü	1*14.000 = 14.000,00	1 adet 0,63 MVA iç ihtiyaç transforamtörü	1*12.000 = 12.000,00	2.000,00

Bu durum kurulum maliyetini 3000 euro/adet olacak şekilde düşürecektir. Toplam kurulum maliyetinden sağlanan tasarruf ise; (9*3000) + (7*2000) + (10*2000) + (1*2000) = 63.000,00 euro olarak hesaplanmıştır. Güncel kur dönüşümü ile Euro/TL polaritesi yaklaşık 5 TL alınabilir. Bu durumda kurulum maliyeti yaklaşık 63.000*5 = 315.000,00 TL azalacağı sonucuna varılabilmektedir.

3-240 mm^2 XLPE OG kablo yerine 95 mm^2 XLPE OG kablo kullanalması analizi:

3.a-Enerji açısından analiz: 240 mm^2 XLPE OG kablo kullanımı yerine 95 mm^2 XLPE OG kablosu kullanmanın kayıp ve yatırım maliyeti açısından analizi yapılmıştır. Makimum yük altında 240 mm^2 XLPE OG kablo kayıpları Çizelge 5.42'de görüldüğü üzere 6,341 kW'tır. Aynı yük altında 95 mm^2 XLPE OG kablosu kullanıldığı durumda ise Çizelge 5.48'den 14,182 kW'lık bir güç kaybı olduğu görülmektedir. Bu durumda 7,841 kW'lık bir kayıptan zarar olduğu incelenmiştir. 18 saatlik işletme altında 141,138 kWh, bir yıl içinde ise yaklaşık 51515,37 kWh'lik kayıp enerji artışı olduğu görülmektedir. Mali açıdan bu zarar değeri yaklaşık 20.606,148 TL/yıl olarak hesaplanmıştır.

3.b-Kurulum maliyeti açısından analiz: Diğer taraftan kurulum maliyetinden kar durumu söz konusudur. Çizelge 5.70'te görüldüğü üzere M5 hattının simülasyonu yapılan istasyonları arasında toplam 24038 m 240 mm^2 XLPE OG kablosu kullanılmıştır.

Çizelge 5. 71 M5 hattı baralar arası 240 mm^2 OG kablo uzunlukları

KABLO ADLARI	Uzunluğu (m)
ALTUNİZADE1-KISIKLI2	1430
ALTUNİZADE2-KISIKLI1	1435
BAGLARBASI1-ALTUNİZADE2	1430
BAGLARBASI2-ALTUNİZADE1	1430
BULGURL2-ÜMRANİYE1	1535
BULGURLU1-ÜMRANİYE2	1535
F.AGACI1-BGLRBASI1	1320
F.AGACI2-BGLARBSI2	1320
KISIKLI1-BULGURLU2	1730
KISIKLI2-BULGURLU1	1775
ÇARŞI1-YAMANEVLER2	1210
ÇARŞI2-YAMANEVLER1	1210
ÜMRANİYE1-ÇARŞI2	1280
ÜMRANİYE2-ÇARŞI1	2138
ÜSKÜDAR1-FSTKAGCI1	1630
ÜSKÜDAR2-FSTKAGCI2	1630

Çizelge 5. 72 240 mm^2 CU kablo maliyetleri

KABLO KESİTLERİ	FİYATLAR (TL/KM)
3x(1x240) MM2 XLPE BAKIR KABLO	570.000,00
3x(1x95) MM2 XLPE BAKIR KABLO	264.000,00

Çizelge 5.71'de HES Kablo'nun 2017 tarihli katalog fiyat bilgisi verilmiştir.

240 mm^2 kesitli OG kabloları kullanıldığında yatırım maliyeti 13.701.660,00 TL, 95 mm^2 kesitli OG kabloları kullanıldığında ise 6.346.032,00 TL değerinde bir yatırım maliyeti olacağı hesaplanmıştır. 240 mm^2 kesitli OG kabloları yerine 95 mm^2 XLPE OG kablosu kullanıldığında elde edilen yatırım tasarrufu yaklaşık olarak 7.355.628,00 TL olarak elde edilmiştir. 95 mm^2 kesitli kablo kullanımında, yatırımdan elde edilen tasarruf ile kayıptaki zarar oranı kıyaslanırsa yaklaşık 356 yıl sonra 240 mm^2 kesitli kabloların kendini amorti ettiği sonucuna ulaşılmaktadır. Ancak kabloların ömrü bu kadar uzun değildir. XLPE OG kabloların ömrü ortalama 40 yıl olarak alınırsa, 40 yılda oluşan kablo kayıp zararı yaklaşık 824.245,92 TL olacaktır. 40 yılın sonunda ortalama toplam kazanç; kurulum maliyetinden elde edilen tasarruf ile kablo kaybından oluşan zararın farkı alınarak, 6.351.382,08 TL olacağı öngörülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İstanbul raylı sistem hat uzunluğu 2004 öncesinde 45,1 km iken 2004 – 2018 yılları arasında gerçekleştirilen projeler ile yaklaşık 160 km uzunluğa ulaşmıştır. Devam eden projeler ve yeni hatlar ile birlikte 2018 -2019 yılları arasında 355,45 km ve 2019 sonrası 1100 km'lik raylı sistem hat uzunluğu planlanmaktadır. 2016 yılında Türkiye geneli enerji tüketimi 2011 yılına göre %20 artış gösterirken, Metro İstanbul işletmesinin enerji tüketimi %121 artış göstermiştir. 2016 yılında İstanbul içi raylı sistemlerin enerji tüketimi, Türkiye geneli enerji tüketiminin yaklaşık 1/1000 oranı olan 293 milyon kWh değerine ulaşmıştır. İstanbul haricinde diğer kent merkezlerinde de raylı sistem yatırımları hızla yapılmaktadır. İstatistiklerden anlaşılacağı gibi önümüzdeki yıllarda raylı sistemlerin enerji tüketimi hızlı bir şekilde artış gösterek ulusal enerji tüketimimizde önemli bir yer tutacaktır. Bu durum, raylı sistemlerde enerji verimliliği çalışmalarının önemi giderek arttırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, İstanbul şehiriçi raylı sisteminde yer alan M1 ve M5 hatları dikkate alınarak DC ve AC işletme kısımları için enerji verimliliğini arttırabilecek çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

M1 hattı üzerinde Yenikapı – Havalimanı istasyonları arasında RAILSIM programı ile bir DC simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonda ilk olarak katener hatları arasında paralelleme yapılmasının enerji tüketimi üzerinde etkisi incelenmiştir. Paralelleme yapılarak maksimum güç tüketimi ve çekilen maksimum akım değerlerinde düşüş olduğu her bir TM için ilgili çizelgelerden görülmektedir. Örneğin, en yüksek azalma

Aksaray TM doğrultucu (rectifier) çıkışından elde edilmiştir. Çekilen maksimum güç 762,25 kW iken her 250 m de bir paralelleme olması durumunda bu değer 640,15 kW ile %16,018 oranında azalmaktadır. Hatlar arasında herhangi bir paralelleme yapılmadığı durumda çekilen efektif güç değeri 121,13 kW iken her 250 m de bir jumperlama olduğu durumda bu değer 108,09 kW'a düşerek %10,76 oranında azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çekilen akımda en yüksek düşmeye örnek ise Ulubatlı istasyonu verilebilir. Çizelge 5. 25'te Ulubatlı TM doğrultucu çıkışından çekilen akımlar görülmektedir. Çekilen maksimum akım değeri hatlar arasında paralelleme olmadığı durumda 699,48 A den her 250 metrede bir paralelleme yapılarak %21,41'lik bir azalma ile 549,66 A'e düşmüştür. Efektif akım (RMS) değeri ise 134,66 A den %14,44 lük bir azalma ile 115,21 A değerine inmiştir.

Yapılan simülasyonun genel bir sonucu olarak, Yenikapı-Havalimanı katener hatları arasında paralelleme olmadığı durumda çekilen güç değeri 789,28 kW iken her 250 metrede bir paralelleme olduğu durumda ise bu değer %6,94 lük bir azalma ile 734,46 kW değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.27'de ise hat boyunca trenin pantografının katener hattı ile temas ettiği noktadan okunan en düşük gerilim seviyeleri görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre hatların paralellenmesi gerilim düşümünü azaltmaktadır. 250 metrede bir paralleme yapılması durumunda gerilim düşümü hatların hiç paralellenmemesi durumuna kıyasla %10,06 oranında azalmıştır.

Katener hatlarınının paralellenmesi maliyet açısından değerlendirilecek olunursa, örnek olarak ilk 3 yıllık toplam kazançlar Çizelge 5. 34'te verilmiştir. Buna göre 2000 m'de bir paralelleme yapılması sonucu 3. Yılın sonunda 196.339,12 TL, 1000 m'de bir yapılması sonucu 529.425,52 TL ve her 250 m'de bir yapılması sonucu ise 788.033,76 TL tasarruf sağlanacağı ön görülmektedir.

Ağırlık artışının enerji tüketimi üzerine etkisini incelemek için yolcusuz çalışma ile 1200 kişilik yolculu çalışma durumu kıyaslanmıştır. 1200 kişilik yolculu durumda trenin toplam kütlesi yaklaşık %75 artarken; enerji tüketimindeki artış beklemeli (with dwell) çalışma durumda %32,74 iken, beklemesiz çalışma durumda ise %34,28 olmuştur. Aynı zamanda, tren toplam kütlesi yaklaşık %75 artarken; ortalama güç çekişindeki artış beklemeli

çalışmada %24,51, beklemesiz çalışma durumunda ise %24,22 arttığı sonucu elde edilmiştir.

Yolcu sayısı arttıkça kişi başına düşen enerji tüketimi azalmaktadır. Enerji tüketimi 300 yolculu durumda 1,111 kWh / kişi iken 1200 yolculu durumda 0,34 kWh / kişi olduğu görülmüştür. Kişi*km başına düşen enerji tüketimi ise 300 yolculu durumda 56,5 Wh iken 1200 yolculu durumda 17,28 Wh olmuştur.

M5 hattı üzerinde Üsküdar – Yamanevler istasyonları arasında ETAP yazılımı ile AC simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hattın mevcut kurulu transformatörler üzerinden maksimum yük altında işletildiği durum ile aynı yük altında çiftli olanlardan birer tanesinin devre dışı bırakılarak işletmeye devam edilmesi durumu transformatör ve kablo kayıpları açısından kıyaslanmıştır. Çiftli olanlardan birinin devre dışı bırakılması durumunda 279.146,16 kWh/yıl kazanç sağlanacağı öngörülmüştür. Bu da yıllık yaklaşık 111.658,464 TL lik bir tasarruf anlamına gelmektedir.

Mevcutta bulunan transformatörler ile birer kademe düşürülerek modellenen transformatörler maliyet açısından kıyaslanmıştır. Yeni belirlenen transformatörler ile işletmeye devam edildiğinde yılda 88.103,7 kWh/yıl enerji tasarrufu ve yılda yaklaşık 35.241,48 TL maliyet tasarrufu sağlanacağını göstermektedir. Aynı durum için kurulum maliyetinden de tasarruf söz konusudur. Yeni belirlenen transformatörlerin kullanımı durumunda kurulum maliyetinin yaklaşık yaklaşık olarak 215.000,00 TL azalacağı sonucuna ulaşılmıştır.

240 mm^2 kesitli OG kablo yerine aynı uzunlukta 95 MM^2 XLPE OG kablosu kullanıldığında elde edilen yatırım tasarrufu yaklaşık olarak 7.355.628,00 TL olarak hesaplanmıştır. Ancak 95 mm^2 XLPE OG kablosu kullanıldığında kablo kayıpları bir miktar daha artmaktadır. XLPE OG kabloların ömrü ortalama 40 yıl olarak alınırsa, 40 yılda oluşan kablo kayıp zararı yaklaşık 824.245,92 TL olacağı hesaplanmıştır. 95 mm^2 kesitli XLPE OG kabloları kullanılırsa 40 yılın sonunda ortalama toplam tasarrufun ise 6.351.382,08 TL olacağı öngörülmektedir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, gerek tasarım gerekse işletim esnasında yapılacak değişimler ile raylı sistemlerde enerji verimliliğinin arttırılabileceği ve önemli maddi kazanımlar sağlanabileceği ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

[1] 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.

[2] Açıkbaş, S., (2008). Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] Genta G., (1985). “Theory and Practise of Advanced Flywheel Systems”, Kinetic Energy Storage, 20 th February 1985, Butterworth-Heinemann.

[4] Daoud Mohammad I., Abdul-Khalık AS., Massoud A., Ahmed S. ve Abbasy Nabbil H., (2012). “On the development of flywheel storage systems for power system applications”, Electrical Machines (ICEM) XXth International Conference, 2-5 Sept. 2012, Marseille.

[5] Lee, H., Seungmin, J., Yoonsung, C., Donghee, Y. ve Gilsoo, J. “Peak Power Reduction and Energy Efficiency Improvement With The Superconducting Flywheel Energy Storage In Eelctric Railway System”, Physica C Superconductivity and its Applications, 494: 246-249.

[6] Andrade Jr, R., Ferreira, A.C., Sotelo, G.G., Suemitsua, W.I., Rolima, L.G.B., Silva Netoa, J.L., Nevesa, M.A., Dos Santos, V.A., Da Costa, G.C., Rosario, M., Stephan, R. ve Nicolskya, R., (2004). “A superconducting high-speed flywheel energy storage system”, Physica C Superconductivity, 408–410: 930–931.

[7] Lino Y., Hayashiya H., Hino M., Abe S., Nakao K. ve Kudo K., (2016). “Evaluation of installation effect of the energy storage system in D.C. traction power supply system”, Power Electronics and Motion Control Conference, 25-28 Sept. 2016, Varna 280-285.

[8] Hayashiya, H., Suzuki, T., Kawahara, K. ve Yamanoi, T., (2014). "Comparative Study of Investment and Efficiency to Reduce Energy Consumption In Traction Power Supply", 16th International Conference on Power Electronics and Motion Control (PEMC2014), 21-24 Sept. 2014, Antalya.

[9] Masami, H. ve Daisuke, H., (2015). “Application of An Energy Storage System Using Lithium-ion Batteries for More Effective Regenerative Energy Utilization”, East Japan Railway Culture Foundation, 31: 23-26.

[10] Lamedica, R., Ruvio, A., Galdi, V., Graber, G., Sforza, P., GuidiBuffarini, G. ve Spalvieri C., (2015). “Application of battery auxiliary substations in 3kV railway systems”, AEIT International Annual Conference, 14-16 Oct. 2015, Naples, 1-6.

[11] Rufer, A., (2003). ‘’Power-Electronic Interface for a Super-Capacitor Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks’’, European Conference on Power Electrionics and Applications, 2-4 September 2003, Toulouse.

[12] 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.

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

[14] Chang, C.S. and Sim, S.S., (1997). "Optimising train movement through coast control using genetic algorithm", IEE Proc.-Electr. Power Applications, 144: 65-73.

[15] Howlett, P.G., (2000). “The Optimal control of a train”, Annals of Operations Research, 98: 65-87.

[16] Ke, R., Chen, M.C. ve Lin, C.L., (2009). "Block-Layout Design Using MAX-MIN Ant System for Saving Energy on Mass Rapid Transit Systems", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10: 226-235.

[17] Miyatake, M. ve Ko, H., (2009). "Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption", IEEJ Transacitons on Electrical and Electronic Engineering, 5: 263-269.

[18] Hathway, R., (2012). "Energy efficient train regulation on the Victoria line", IMechE Railway Division Seminar, 2012, London.

[19] Açıkbaş, S. ve Soylemez, MT., (2008). "Coasting Point Optimisation for mass rail transit lines using artifical neural networks and genetic algorithm", IET Electric Power Applications, 2: 172-82.

[20] Peng, B.C. ve Chen, N., (2014). "Energy saving strategies in mass rapid transit system", International Conference on Connected Vehicles and Expo, 3-7 November 2014, Vienna, 272-277.

[21] Alves, F.T. ve Pires, C.L., (2010). "Energy saving strategies in Sao Paulo Metro", IET Conference on railway traciton systems, 13-15 April 2010, Birmingham.

[22] Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hilmansen, S. ve Goodman, C.J., (2007). "Optimal Driving Strategies for traction energy saving on DC Suburban railways", IET Electr Power Applications, 1: 675-682.

[23] Hartland, D., (2012). "Heating the countryside or saving the kilowatt hours", IMechE Railway division seminar gaining traction in energy efficiency, 2012, London.

[24] Ohsaki, H., Lv, Z., Matsushita, N., Sekino, M., Koseki, T. ve Tomita, M., (2013). "Superconducting Power Cable Application in DC Electric Railway Systems", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23: 3600705-3600705.

[25] Tomita M., Suzuki k., Fukumoto Y., Ishiharab A., Akasakab A. Ve Kobayashib Y., (2017). "Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission", Energy, 122: 579–587.

[26] Nexans, Dünya'nın ilk süper iletken güç iletim kablosu, https://www.nexans.com.tr/eservice/Turkey-tr_TR/navigatepub_157789_-16156/Dunya_n_n_ilk_superiletken_gu_iletim_kablosu_L_PA_.html, 29 03 2018.

[27] Carruthers JJ., Calomfirescu M., Ghys P. ve Prockat J., (2009). "The application of a systematic approach to material selection for the lightweighting of metro vehicles", P I Mech Eng F-J Rai, 223:427–37.

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

[29] Açıkbaş, S. ve Söylemez, M.T., (2018). "Catenary System Paralelling and Its Effect on Power Consumption and Regenerated Energy Recuperation" İstanbul.

[30] 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.

[31] Cornic, D., (2010). "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation", 9th World congress on railway research, 19-21 October 2010, Bologna.

[32] Chang-han, Bae., Dong-uk, Jang., Yong-gi, Kim., Se-ky, Chang. ve Jai-kyun, Mok., (2008). "Calculation of regenerative energy in DC 1500 V electric railway substations", The 7th Int Conference on Power Electronic, 22-26 October 2007, Daegu.

[33] Jyh-Cherng, Jong. Ve En-Fu, Chang., (2005). "models for estımatıng energy consumptıon of electrıc traıns", Journal of Society of Transportation Studies, 6: 278-291.

[34] T.Suzuki., (1982). "DC Power Supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes", IEEE Proceedings B Electric Power Applications, 129: 18-26.

[35] Açıkbaş, M. Ve Söylemez, M.T., (2004), Energy Loss Comparison Between 750 VDC and 1500 VDC Power Supply Systems Using Rail Power Simulation, https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/74/12124, 2 Ocak 2018.

[36] Zhang, W. ve Wei, J., (2012). "The experimental research on Beijing subway air-conditioning system energy-saving", Applied Mechanics and Materials, 170: 2494–2498.

[37] Fuertes, A., Casals, M., Gangolells, M. ve Puigdollers, O., (2012). "Overcoming challenges for energy management in underground railway stations", European

conference on product and process modelling, 25-27 July 2012, Reykjavik, 123-129.

[38] Transport for London, (2017). LU Carbon footprint report 2008, London.

[39] Fong, KF., Hanby, VI. ve Chow, TT., (2006). "HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming", Energy build, 38: 220-31.

[40] Fuertes, A., Casals, M., Gangolells, M. ve Puigdollers, O., (2012). "Overcoming challanges for energy management in undergorund railway stations", European conference on product and process modelling, 6 July 2012, Reykjavik.

[41] Keskin, D., (2013). Kent İçi Raylı Sistemlerde Elektromekanik Sistemler Yatırım Maliyetleri, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.

[42] Kara, H., (2016). Enerji Tüketim Bazlı AHP Yöntemi İle Raylı Sistem Güzergah Seçimi Ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[43] Albrecht, T., (2004). "Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control", Computers in Railways IX, WIT Press, 74: 885-894.

[44] Karakuş, F., (2017). Raylı Sistemlerde Orta Gerilim Elektrifikasyon Sisteminin Modellenmesi ve Besleme Senaryolarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[45] Elektrik Port, Raylı Sistemlerde Enerji,

http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/rayl-sistemlerde-enerji/8657#ad-image-0, 21 Kasım 2017.

[46] Kara, H., (2016). Enerji Tüketimi Dikkate Alınarak AHP ile Raylı Sistem Güzergah Seçimi ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[47] International Union of Railways (UIC),

http:/www.railway-energy.org, 5 Kasım 2017.

[48] 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.

[49] Brisset, S. ve Gillon, F., (2015). "Improving Energy Efficiency in Railway Powertrains", 169-181.

[50] Vazquez, S., Lukic, SM., Galvan, E., Franquelo, LG. ve Carrasco, JM., (2010). "Energy storage systems for transport and grid applciaitons", IEEE Trans Ind Elextron, 17: 3881-3895.

[51] Kadhim, R., (2009). "Energy storage systems for rail applications", Rail Safety and standarts Board (RSSB), October 2010, London.

[52] Deutsche Bahn AG, (2003). "Evaluation of energy efficiency technologies for Rolling stock and train operation of railways", 5 March 2003, Berlin.

[53] Ke, BR., Chen, MC. ve Lin, CL., (2009). "Block-Layout design using max-min ant systems for saving energy on mass rapid transit systems",. IEEE Trans Intell Transport Syst, 10: 226-235.

[54] Sandor, J., Wiebe, E., Bergendorff, M., Recagno, V. ve Nolte, R., (2011). "Smart and efficient energy solutions for railways", 9th World congress on railway research WCRR, 7-9 July 2011, Lille.

[55] Jin, J. ve Kadhim, R., (2011). "Driver advisory information for energy management and regulation", 9th World congress on railway research WCRR, 3-5 April 2011, Lille.

[56] 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.

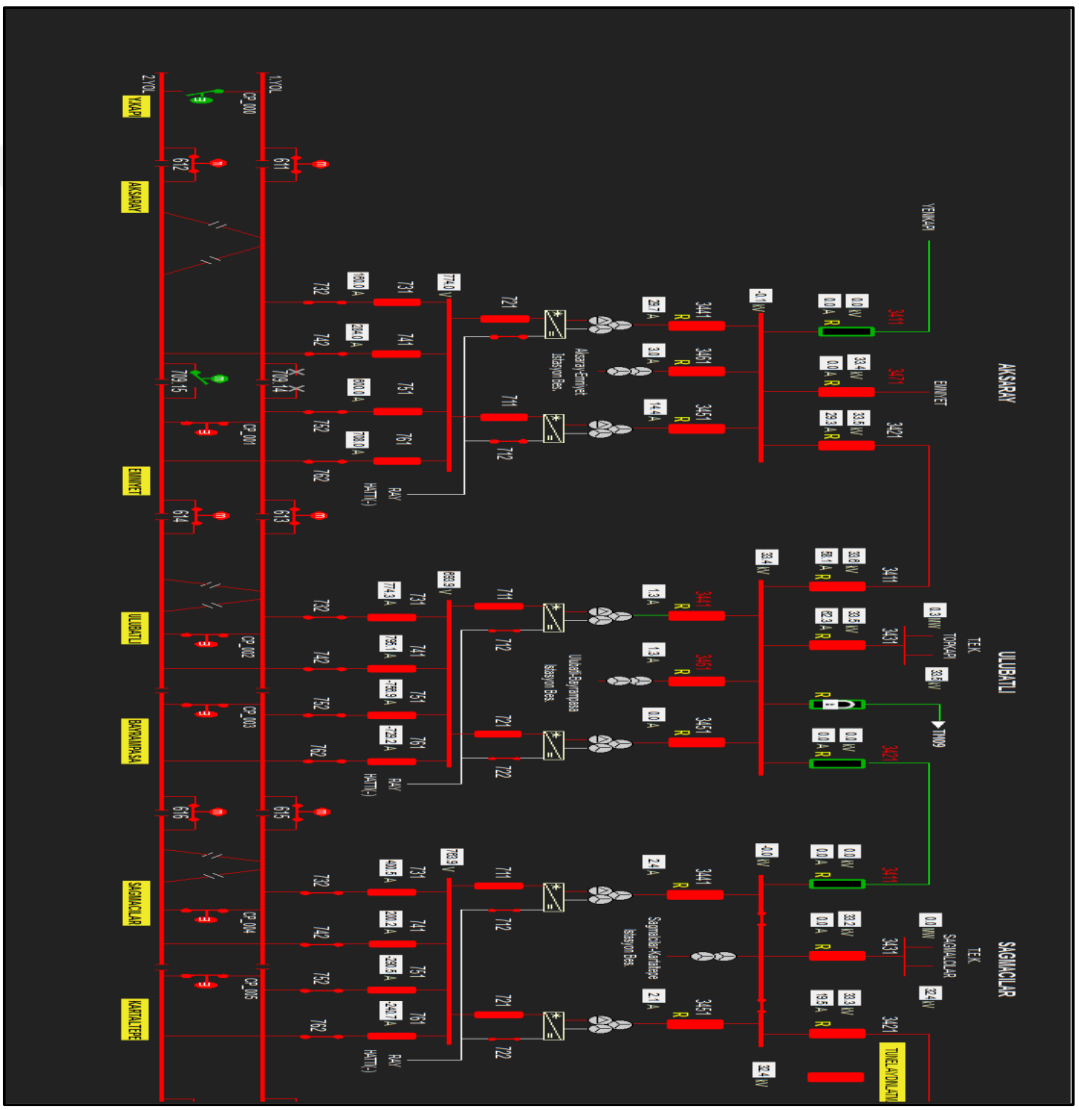
[57] Thong, m., Ho, M. ve Siow, P.S., (2006). "Energy Conversation Measures for Rapid Transit Systems in Singapure", IPEC International Power Engineering Conference, 29 November-2 December 2005, Singapore.

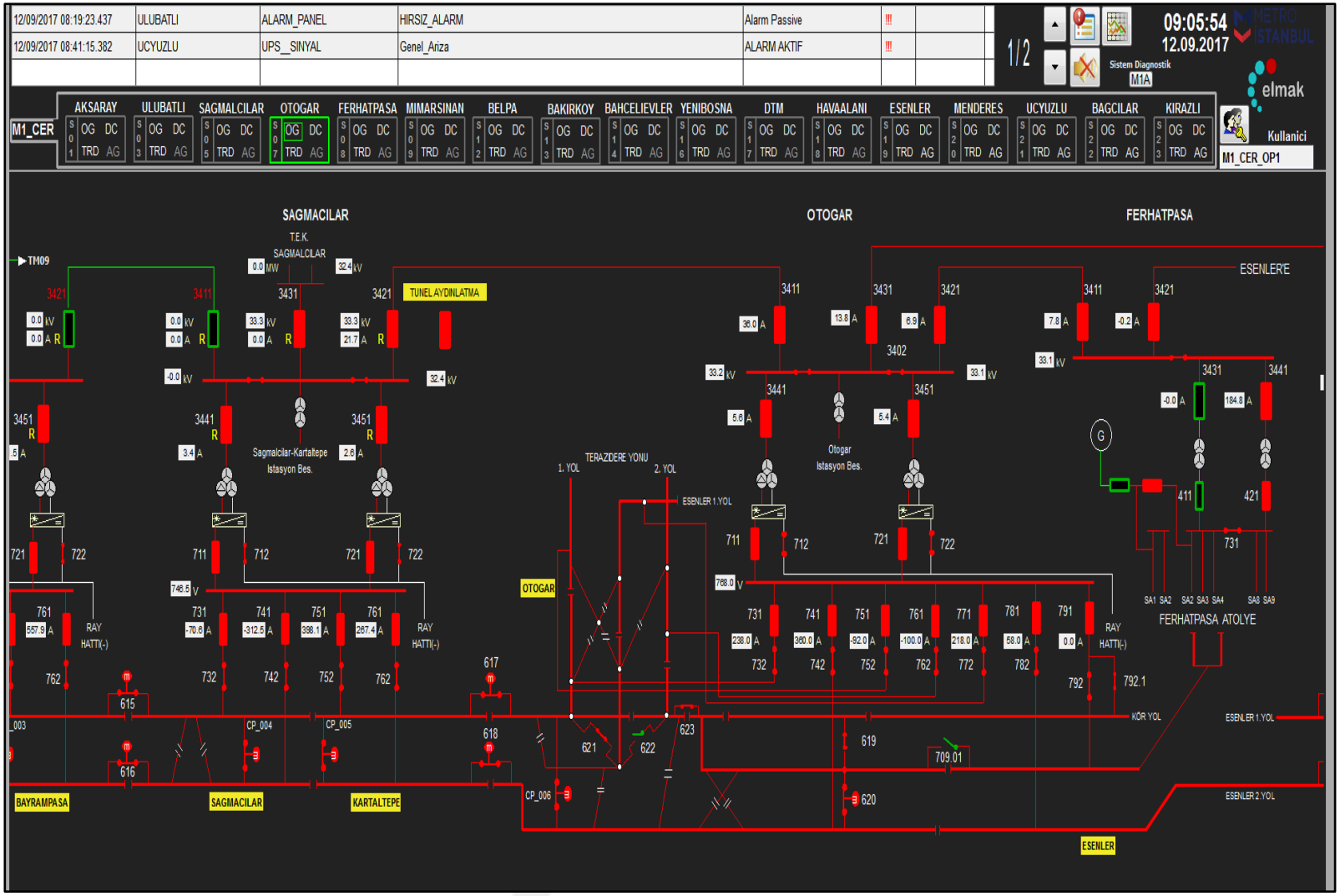
[58] Mellitt, B., Mouneimme, Z.S. ve Goodman, C.J., ("Simulation Study of DC Transit Systems with Inverting Substations", IEE Proceedings B, Electric Power Applications, 131: 38-50.

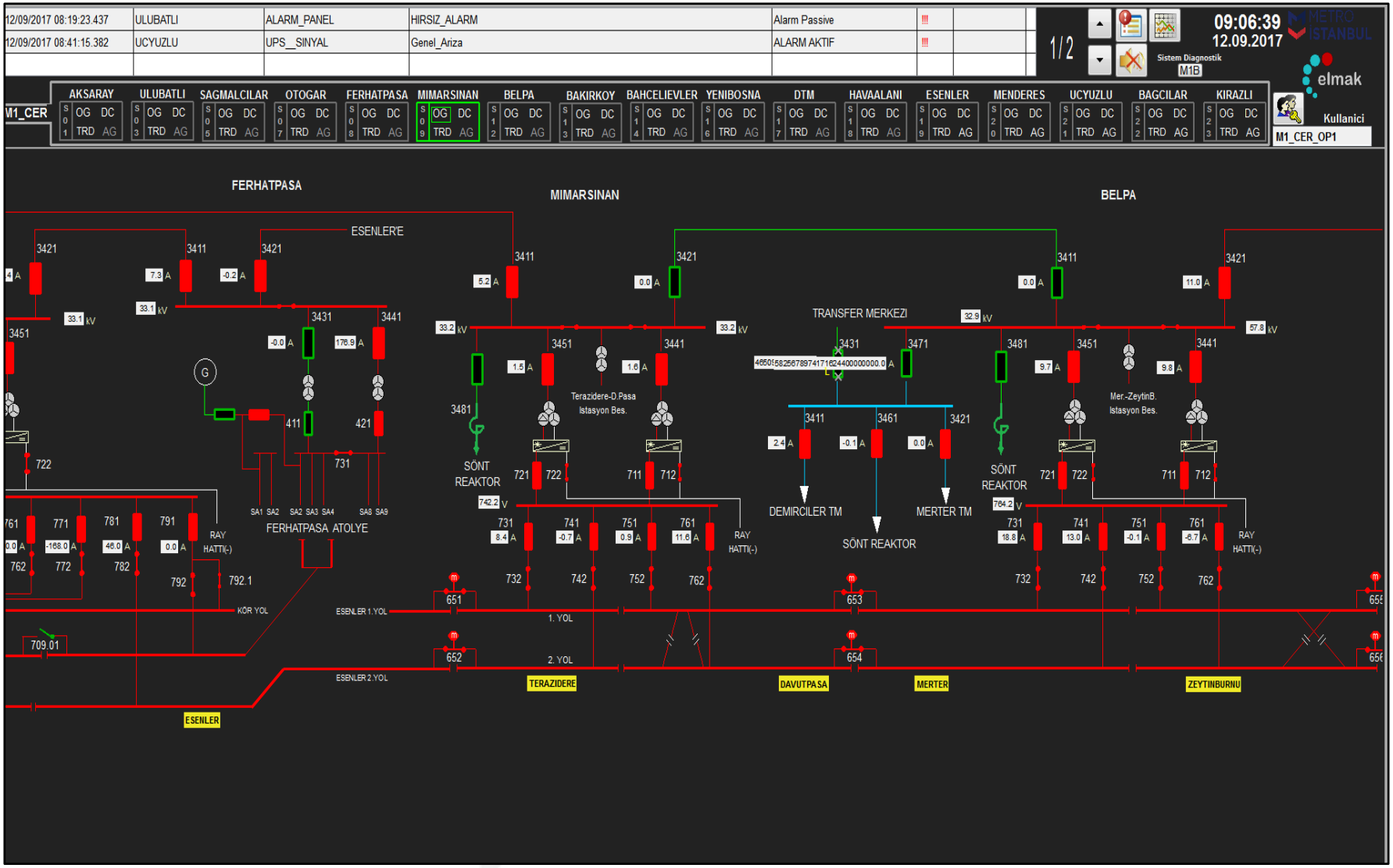
[59] Ankara Üniversitesi Süper İletken Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Enerji Sektörü ve Süper İletkenlik Uygulamaları, http://cesur.ankara.edu.tr/superiletkenlik-hakkinda/superiletkenlik-uygulamalari/enerji-sektoru-ve-superiletkenlik-uygulamalari/, 01 Ocak 2018.

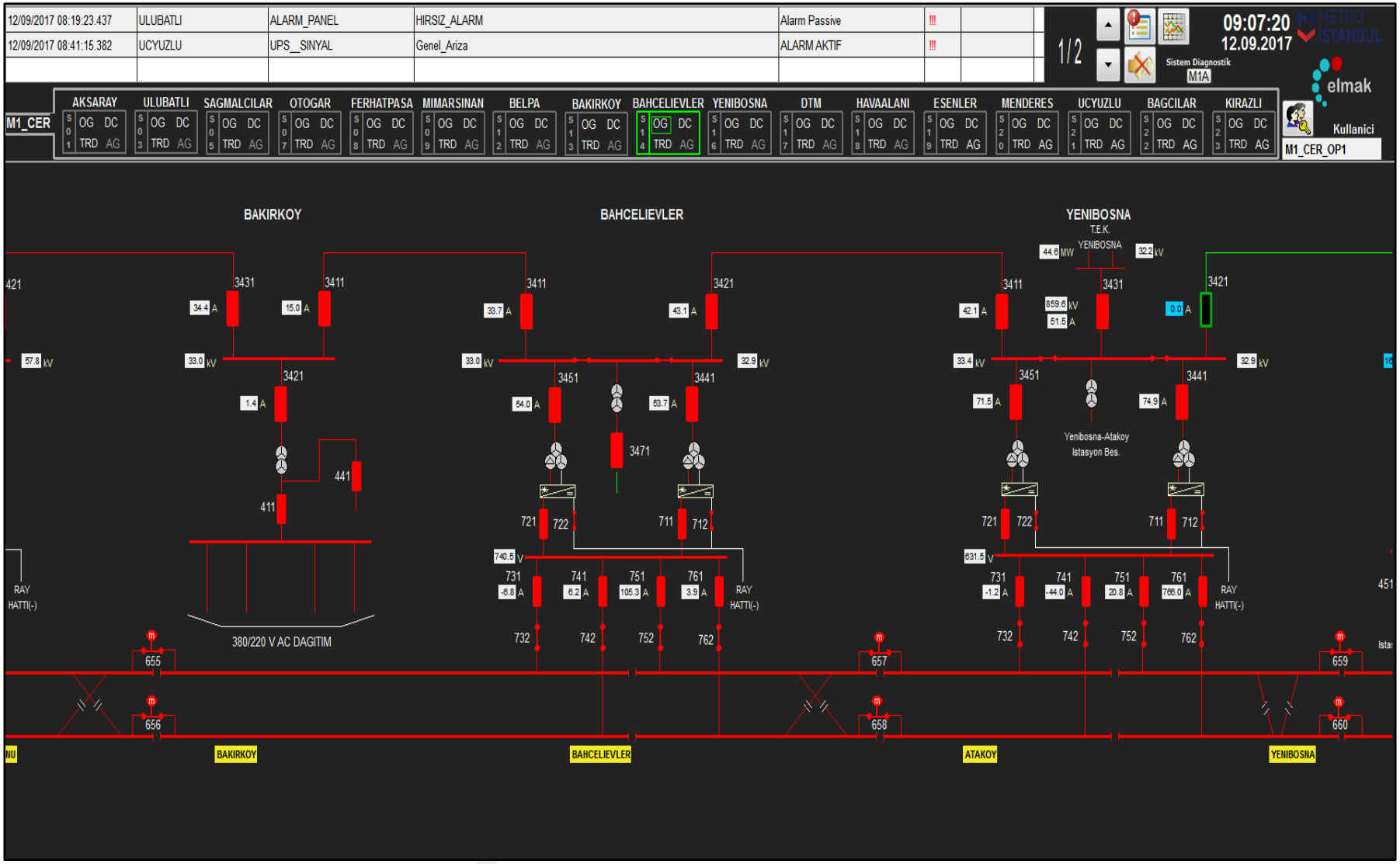
[60] Honjo, S., Mimura, T., Kitoh, Y., Noguchi, Y., Masuda, T., Yumura, H., Watanabe, M., Ikeuchi, M., Yaguchi, H. ve Hara, T., (2011). "Status of superconducting cable demonstration project in Japan", IEEE Trans. Appl. Supercond, 21: 967-971.

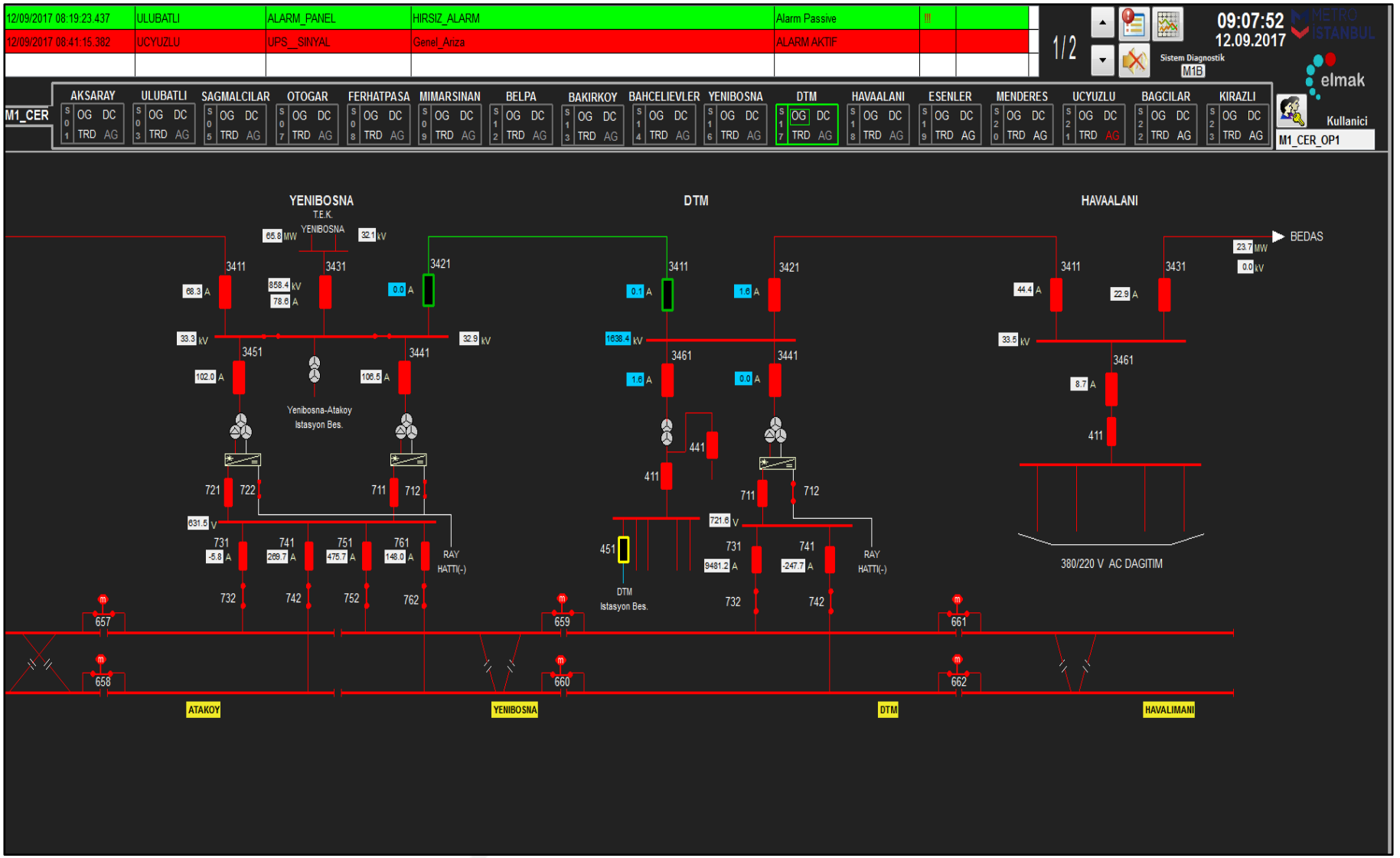
M1A-M1B HATTI ELEKTRİFİKASYON SİSTEMİ

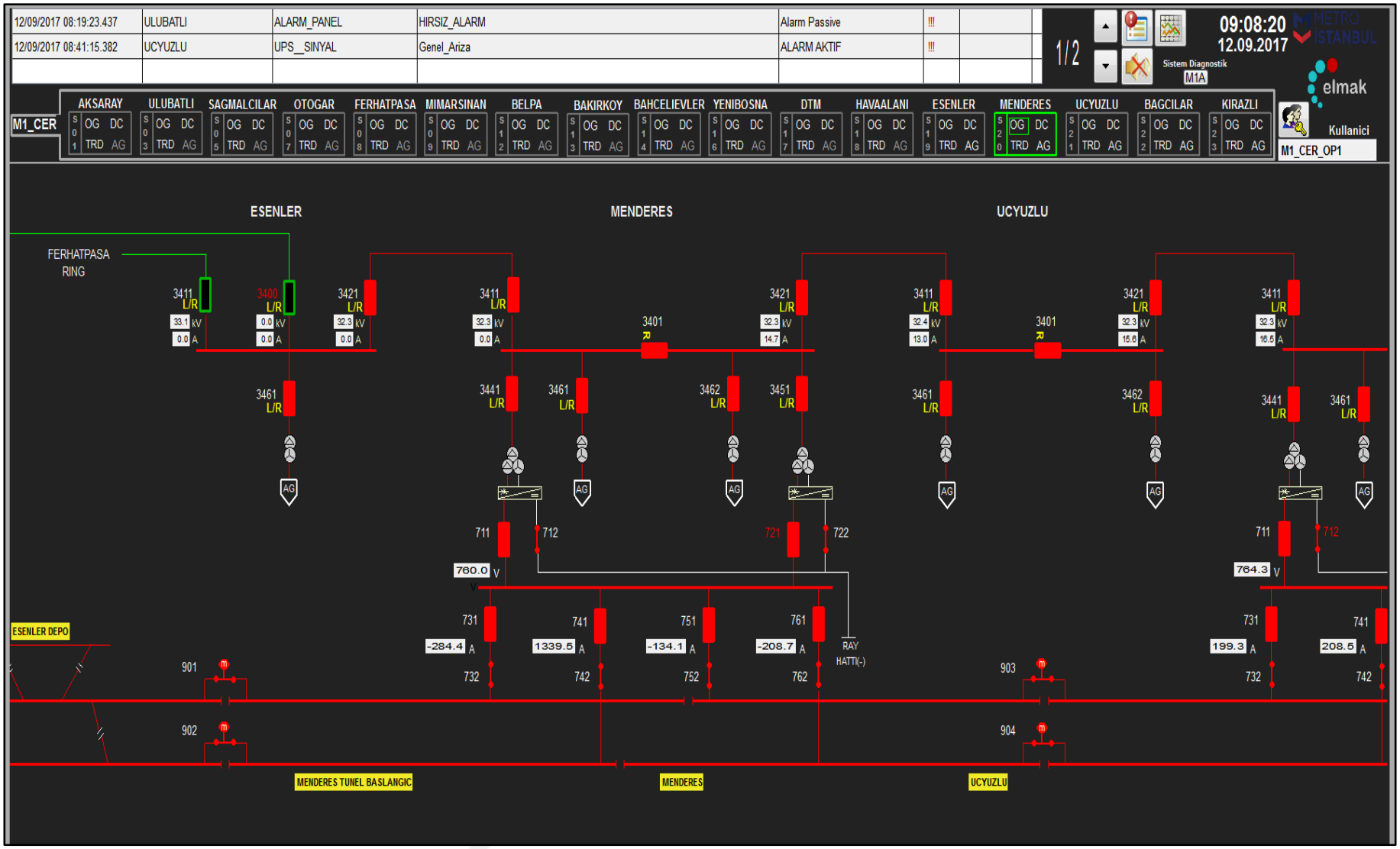


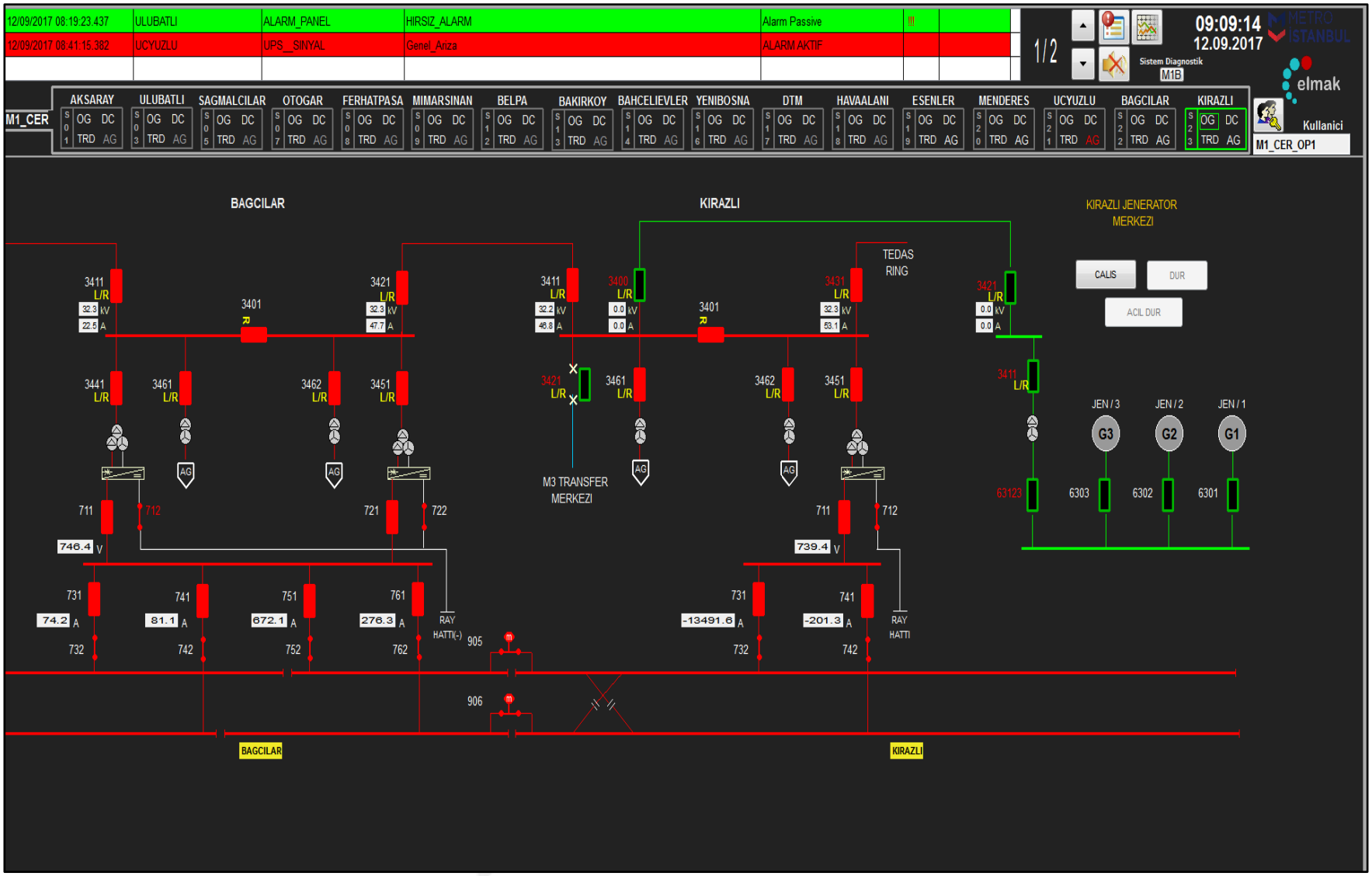

12/09/2017 08:19:23.437 ULUBATLI ALARM_PANEL HIRSIZ_ALARM Alarm Passive !!!
12/09/2017 08:41:15.382 UCYUZLU UPS__SINYAL Genel_Ariza ALARM AKTIF !!!
1/2
09:05:54
12.09.2017
METRO ISTANBUL
Sistem Diagnostik
M1A
elmak
Kullanici
M1_CER_OP1
M1_CER
AKSARAY ULUBATLI SAGMALCILAR OTOGAR FERHATPASA MIMARSINAN BELPA BAKIRKOY BAHCELIEVLER YENIBOSNA DTM HAVAALANI ESENLER MENDERES UCYUZLU BAGCILAR KIRAZLI
OG DC TRD AG
SAGMACILAR
OTOGAR
FERHATPASA
T.E.K.
SAGMALCILAR
TM09
TUNEL AYDINLATMA
ESENLERE
Sagmalcilar-Kartaltepe Istasyon Bes.
Otogar Istasyon Bes.
TERAZIDERE YONU
1. YOL
2. YOL
ESENLER 1.YOL
OTOGAR
FERHATPASA ATOLYE
RAY HATTI(-)
KÖR YOL
ESENLER 1.YOL
ESENLER 2.YOL
CP_003
CP_004
CP_005
CP_006
BAYRAMPASA
SAGMACILAR
KARTALTEPE
ESENLER


12/09/2017 08:19:23.437 ULUBATLI ALARM_PANEL HIRSIZ_ALARM Alarm Passive !!!
12/09/2017 08:41:15.382 UCYUZLU UPS__SINYAL Genel_Ariza ALARM AKTIF !!!
1/2
09:06:39
12.09.2017
Sistem Diagnostik
M1B
METRO ISTANBUL
elmak
Kullanici
M1_CER_OP1
M1_CER
AKSARAY ULUBATLI SAGMALCILAR OTOGAR FERHATPASA MIMARSINAN BELPA BAKIRKOY BAHCELIEVLER YENIBOSNA DTM HAVAALANI ESENLER MENDERES UCYUZLU BAGCILAR KIRAZLI
OG DC TRD AG
FERHATPASA
MIMARSINAN
BELPA
ESENLERE
TRANSFER MERKEZI
SÖNT REAKTOR
DEMIRCILER TM
MERTER TM
Terazidere-D.Pasa Istasyon Bes.
Mer.-ZeytinB. Istasyon Bes.
FERHATPASA ATOLYE
RAY HATTI(-)
KÖR YOL
ESENLER 1.YOL
ESENLER 2.YOL
1. YOL
2. YOL
TERAZIDERE
DAVUTPASA
MERTER
ZEYTINBURNU
ESENLER


12/09/2017 08:19:23.437 ULUBATLI ALARM_PANEL HIRSIZ_ALARM Alarm Passive !!!
12/09/2017 08:41:15.382 UCYUZLU UPS__SINYAL Genel_Ariza ALARM AKTIF !!!
1/2
09:07:20
12.09.2017
METRO ISTANBUL
Sistem Diagnostik
M1A
elmak
Kullanici
M1_CER_OP1
M1_CER
AKSARAY ULUBATLI SAGMALCILAR OTOGAR FERHATPASA MIMARSINAN BELPA BAKIRKOY BAHCELIEVLER YENIBOSNA DTM HAVAALANI ESENLER MENDERES UCYUZLU BAGCILAR KIRAZLI
OG DC TRD AG
BAKIRKOY
BAHCELIEVLER
YENIBOSNA
T.E.K.
YENIBOSNA
44.6 MW
32.2 kV
421
3431
3411
3421
34.4 A
15.0 A
33.7 A
43.1 A
42.1 A
859.6 kV
51.5 A
0.0 A
57.8 kV
33.0 kV
32.9 kV
33.4 kV
3451
3441
1.4 A
54.0 A
53.7 A
71.5 A
74.9 A
3471
Yenibosna-Atakoy
Istasyon Bes.
441
411
721 722 711 712
740.5 V
631.5 V
731 741 751 761
-6.8 A 6.2 A 105.3 A 3.9 A
-1.2 A -44.0 A 20.8 A 766.0 A
732 742 752 762
RAY HATTI(-)
380/220 V AC DAGITIM
655 656 657 658 659 660
NU
BAKIRKOY
BAHCELIEVLER
ATAKOY
YENIBOSNA

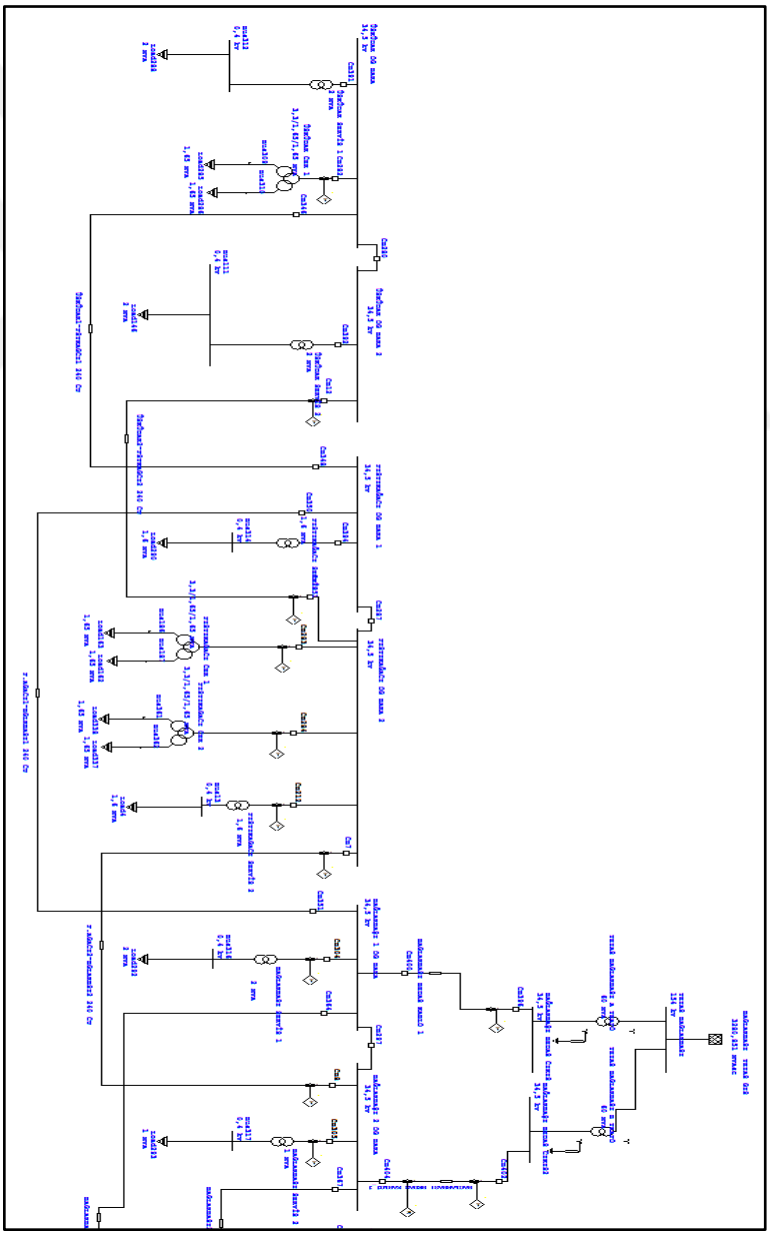

12/09/2017 08:19:23.437 ULUBATLI ALARM_PANEL HIRSIZ_ALARM Alarm Passive
12/09/2017 08:41:15.382 UCYUZLU UPS__SINYAL Genel_Ariza ALARM AKTIF
1/2
09:07:52
12.09.2017
Sistem Diagnostik
M1B
METRO ISTANBUL
elmak
Kullanici
M1_CER_OP1
M1_CER
AKSARAY ULUBATLI SAGMALCILAR OTOGAR FERHATPASA MIMARSINAN BELPA BAKIRKOY BAHCELIEVLER YENIBOSNA DTM HAVAALANI ESENLER MENDERES UCYUZLU BAGCILAR KIRAZLI
YENIBOSNA
T.E.K.
DTM
HAVAALANI
65.8 MW
32.1 kV
68.3 A
858.4 kV
78.6 A
0.0 A
33.3 kV
32.9 kV
102.0 A
106.5 A
Yenibosna-Atakoy
Istasyon Bes.
631.5 V
731 -5.8 A
741 269.7 A
751 475.7 A
761 148.0 A
RAY HATTI(-)
0.1 A
1.0 A
1638.4 kV
1.0 A
0.0 A
721.6 V
731 9481.2 A
741 -247.7 A
DTM Istasyon Bes.
44.4 A
22.9 A
33.5 kV
8.7 A
23.7 MW
0.0 kV
BEDAS
380/220 V AC DAGITIM
ATAKOY
YENIBOSNA
DTM
HAVALIMANI

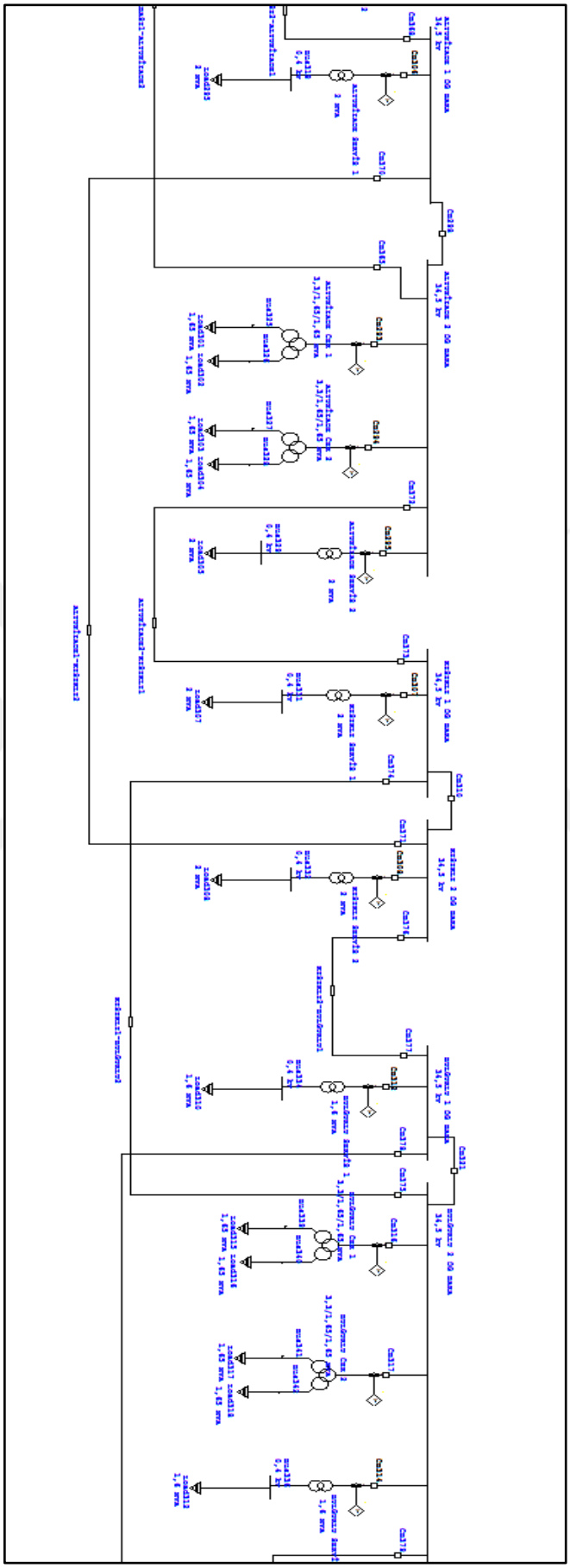

12/09/2017 08:19:23.437 ULUBATLI ALARM_PANEL HIRSIZ_ALARM Alarm Passive !!!
12/09/2017 08:41:15.382 UCYUZLU UPS__SINYAL Genel_Ariza ALARM AKTIF !!!
1/2
09:08:20
12.09.2017
Sistem Diagnostik
M1A
METRO ISTANBUL
elmak
Kullanici
M1_CER_OP1
M1_CER
AKSARAY ULUBATLI SAGMALCILAR OTOGAR FERHATPASA MIMARSINAN BELPA BAKIRKOY BAHCELIEVLER YENIBOSNA DTM HAVAALANI ESENLER MENDERES UCYUZLU BAGCILAR KIRAZLI
OG DC TRD AG
ESENLER
MENDERES
UCYUZLU
FERHATPASA RING
3411 L/R 38.1 kV 0.0 A
3400 L/R 0.0 kV 0.0 A
3421 L/R 32.3 kV 0.0 A
3401 R
3461 L/R
3411 L/R 32.3 kV 0.0 A
3421 L/R 32.3 kV 14.7 A
3441 L/R
3461 L/R
3462 L/R
3451 L/R
3411 L/R 32.4 kV 13.0 A
3421 L/R 32.3 kV 15.6 A
3411 L/R 32.3 kV 16.5 A
AG
711 712 721 722
760.0 V
764.3 V
731 741 751 761
-284.4 A 1339.5 A -134.1 A -208.7 A
199.3 A 208.5 A
732 742 752 762
RAY HATTI(-)
ESENLER DEPO
901 902 903 904
MENDERES TUNEL BASLANGIC
MENDERES
UCYUZLU

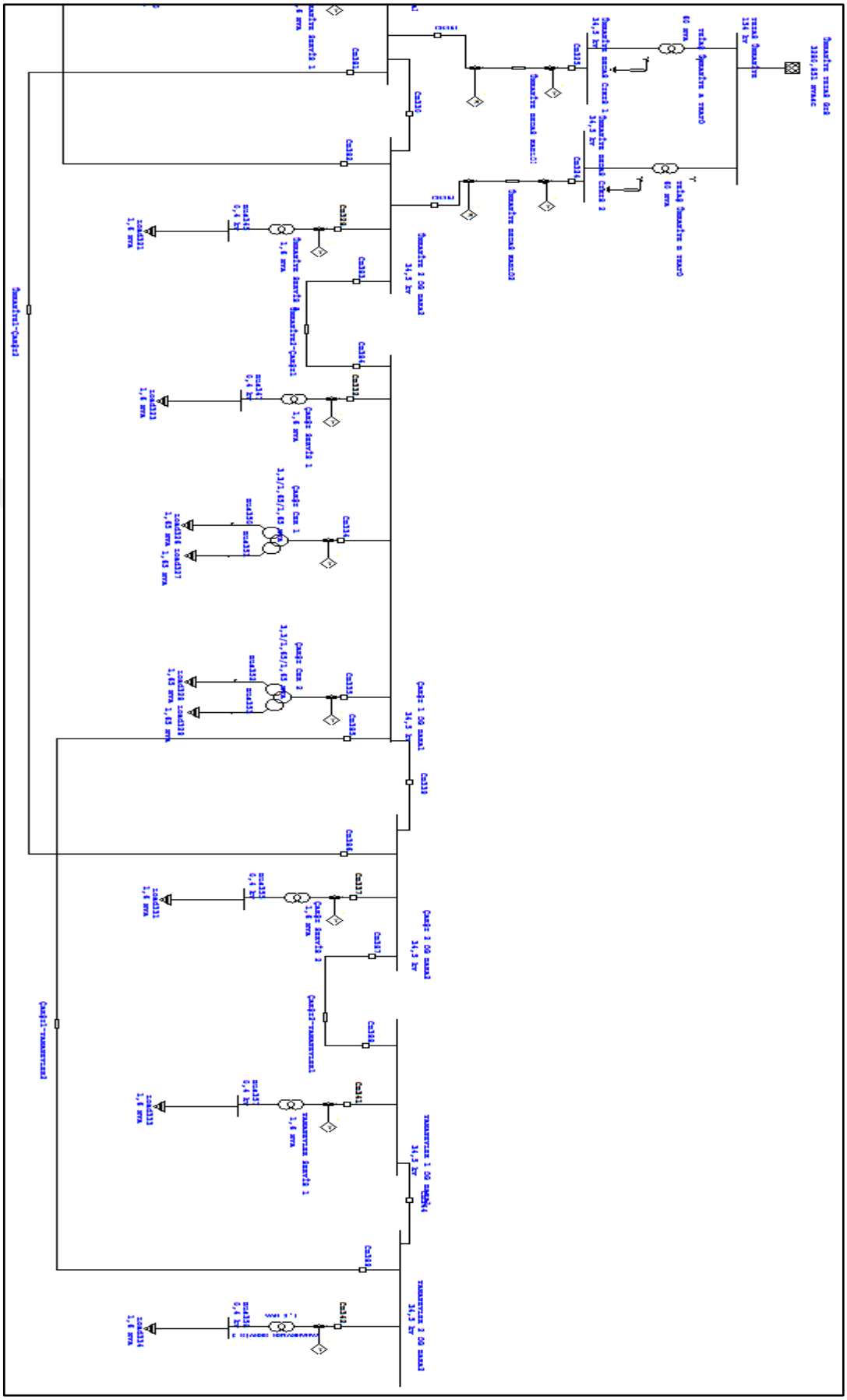

12/09/2017 08:19:23.437 ULUBATLI ALARM_PANEL HIRSIZ_ALARM Alarm Passive
12/09/2017 08:41:15.382 UCYUZLU UPS__SINYAL Genel_Ariza ALARM AKTIF
1/2
09:09:14
12.09.2017
Sistem Diagnostik
M1B
METRO ISTANBUL
elmak
Kullanici
M1_CER_OP1
M1_CER
AKSARAY ULUBATLI SAGMALCILAR OTOGAR FERHATPASA MIMARSINAN BELPA BAKIRKOY BAHCELIEVLER YENIBOSNA DTM HAVAALANI ESENLER MENDERES UCYUZLU BAGCILAR KIRAZLI
OG DC TRD AG
BAGCILAR
KIRAZLI
KIRAZLI JENERATOR MERKEZI
TEDAS RING
CALIS
DUR
ACIL DUR
3411 L/R
3421 L/R
3401
3441 L/R
3461 L/R
3462 L/R
3451 L/R
3400 L/R
3431 L/R
M3 TRANSFER MERKEZI
JEN / 3
JEN / 2
JEN / 1
G3
G2
G1
63123
6303
6302
6301
711
712
721
722
731
741
751
761
732
742
752
762
746.4 V
739.4 V
74.2 A
81.1 A
672.1 A
276.3 A
-13491.6 A
-201.3 A
RAY HATTI(-)
RAY HATTI
905
906
BAGCILAR
KIRAZLI

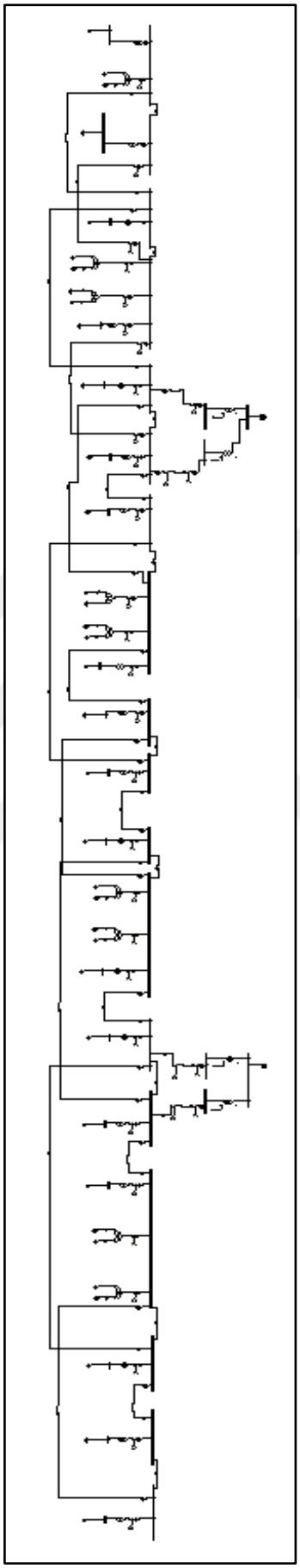
EK-B

M5 HATTI ETAP MODELİ









ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Ahmet YILDIZ

Doğum Tarihi ve Yeri :18.03.1991 / Dörtdivan

Yabancı Dili :İngilizce, Almanca

E-posta :ahmetyldz91@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Sayısal	Atakent Anadolu Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2015-	Metro İstanbul AŞ	Elektrik Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Yıldız, A., Arıkan, O., “Increasing The Electrical Energy Efficiency In Urban Rail Systems” (2017). International Symposium on Electrical Railway Transportation Systems, Eskişehir.