**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# METRO HATLARINDA AFET VE ACİL DURUMLARDA ENERJİ SÜREKLİLİĞİNİN SAĞLANMASI

**OSMAN ARMAĞAN**

**KOCAELİ 2025**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# METRO HATLARINDA AFET VE ACİL DURUMLARDA ENERJİ SÜREKLİLİĞİNİN SAĞLANMASI

**OSMAN ARMAĞAN**

**Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ**
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....**
**Doç. Dr. Abdulhakim KARAKAYA**
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....**
**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet UÇAR**
**Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi .....**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 26/03/2025**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)
.....
Osman ARMAĞAN

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezimin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
(İmza)

.....
Osman ARMAĞAN

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Şehir içi yolcu taşımacılığı büyük şehirlerde artan nüfus yoğunluğu ile beraber her geçen gün daha kompleks ve daha zor bir hale gelmekte ve özellikle şehir içi karayolu taşımacılığı büyük şehirlerde artan trafik sorununu ile beraber daha da bir zorlaşmakta, ihtiyaca cevap veremeyecek hale gelmektedir. Bu nedenlerle yer altında tesis edilen metro hatları ile toplu ulaşım tercihleri daha da alternatif olmakta ve yolcularına zamanında hızlı, dakik ve daha güvenli kesintisiz bir ulaşım imkanı sağlamaktadır. Metro hatları yapı gereği yer altında tesis edilmekte ve bu nedenle oluşabilecek herhangi bir acil durumda yolcu tahliyesinin zamanında ve sağlıklı yapılabilmesi adına tüm teknik ve idari gereklilikler sağlanmaktadır. Bu doğrultuda her istasyonun karakteristik özellikleri dikkate alınarak acil durum eylem planları hazırlanmakta ve bu plan dahilinde senaryo test ve tatbikatları gerçekleştirilerek her an acil duruma hazır halde olabilme hedefi amaçlanmaktadır. Burada en önemli konu tüm bu senaryoların gerçekleştirilebilmesi ve kurulan tesislerin enerji ihtiyacının karşılanmasıdır. Metro tasarım projelerinde istasyonların ve tünel yapılarının enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere yerel enerji kaynakları kullanılmakta ve bu enerji kaynakları üzerinden gerekli enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Bunun yanında tedarikçi tarafından sağlanan enerjinin herhangi bir nedenle anlık veya belirsiz zaman aralığında oluşan kayıplarına karşı sisteme entegre acil durum jeneratör sistemleri tesis edilmekte ve bu doğrultuda yaşanması muhtemel afet ve acil durumlarda (Yangın, Deprem, Sel vb. olağan dışı durumlar) veya genel ve yerel enerji kesintilerinde acil durum senaryolarının devreye girmesi ve senaryoya bağlı ekipmanların enerjisinin sağlanması ve tünel içerisinde kalan trenlerin en yakın istasyona iletilmesi için ihtiyaç duyacağı enerjinin sağlanması amaçlanmaktadır.

Hazırlanan bu tez çalışmasında İstanbul geneli yaşanabilecek bir deprem olayına istinaden, genel bir enerji kesintisi yaşanması ile İstanbul metrolarının enerjisiz kalması durumu ve M5 Metro hattı özelinde tahliye ve kurtartma sistemlerinin, enerji ihtiyacının acil durum jeneratörü ile karşılanması süreci detaylandırılmıştır. Devamında gerekli olan enerji ihtiyacının acil durum jeneratör sistemi üzerinden karşılanması süreci Matlab - Simulink simülasyon programı ile desteklenerek benzetim çalışması yapılmıştır. Simülasyonda tüm karar mekanizmaları Mantık denetleyicisi üzerinden takip ve idare edilmiştir.

Çalışmamda bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren kıymetli hocalarım Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ' ve Doç. Dr. Abdulhakim KARAKAYA hocalarıma, tez çalışması içeriğinde yer alması gereken bilgi ve argümanların sağlanması adına gerekli desteğini esirgemeyen tüm Metro İstanbul aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu günlere gelmemde en büyük rol sahibi olan canım annem ve canım babama, varlığına daima şükrettiğim canım kardeşlerime ve bu sürecin her aşamasında sonsuz desteğini esirgemeyen canım eşime ve canım oğlum Ali Mert ARMAĞAN' a en derin sevgilerimle, teşekkür ederim.

Nisan – 2025 Osman ARMAĞAN

## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ ..... i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ..... ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... iii
İÇİNDEKİLER ..... iv
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... vi
TABLOLAR DİZİNİ ..... vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... viii
ÖZET ..... ix
ABSTRACT ..... x
1. GİRİŞ ..... 1
2. METRO HATTI ELEKTRİFİKASYON SİSTEMİ VE YÜK DAĞILIMLARI ..... 10
2.1. CER Trafo Merkezi ..... 11
2.2. AC ve DC Hücreler ..... 12
2.3. Gerilim ve Akım Trafoları ..... 13
2.4. Enerji Doğrultucu Panoları ..... 14
2.5. Sinyalizasyon Sistemleri ..... 15
2.6. Katener Sistemleri ..... 16
2.7. Haberleşme Sistemleri ..... 17
2.8. SCADA ve Uzaktan Kontrol Sistemleri ..... 18
3. M5 METRO HATTI ELEKTRİFİKASYON BİLGİLERİ ..... 19
4. METRO DEPREM OLAYLARI VE M5 HATTI DEPREM SENARYOLARI ..... 22
4.1. Metrolarda Deprem Durumunda Hatların Güvenliği ve Enerji Sürekliliği ..... 22
4.1.1. Deprem Riski ve Metro Sistemleri Üzerindeki Etkisi ..... 22
4.1.2. Metro Hatlarında Deprem Güvenlik Standartları ..... 23
4.1.3. Erken Uyarı Sistemleri ve Acil Durum Protokolleri ..... 24
4.1.4. Enerji Sürekliliği ve Acil Durum Güç Sistemlerinin Rolü ..... 25
4.1.5. Deprem Sonrası İnceleme, Bakım ve Onarım Çalışmaları ..... 27
4.2. Dünya Üzerinde Yaşanan Deprem Olayları ve Analizleri ..... 29
4.2.1. Japonya Töhoku Depremi ve Metro İşletmelerine Etkisi ..... 29
4.2.2. Meksika Puebla Depremi ve Metro İşletmelerine Etkisi ..... 31
4.2.3. Japonya Kobe Depremi ve Metro İşletmelerine Etkisi ..... 32
4.3. M5 Metro Hattı Örnek Deprem Senaryosu ..... 33
4.3.1. Deprem Algılanması ve İlk İhbar Süreci ..... 33
4.3.2. İlk Önlemler, Hat ve Sistem Güvenliği ..... 34
4.3.3. Jeneratörlerin ve Acil Durum Sistemlerinin Devreye Alınması ..... 35
4.3.4. Acil Durum Tahliye Sürecinin Başlatılması ..... 40
4.3.5. Güvenlik ve Hasar Değerlendirmesi ..... 42
4.3.6. Acil Durum Sistemlerinin Yeniden Değerlendirilmesi ..... 42
4.3.7. Deneme Sürüşleri ve Test Süreci ..... 43
4.3.8. Yolcu Bilgilendirme ve Normal İşletmeye Geçiş ..... 44
5. M5 HATTI JENERATÖR SİSTEMİNİN DEVREYE ALINMASI ..... 45
5.1. Fine-Kinney Risk Analizi İle Yük Önceliklendirme ..... 46
5.1.1. Fine Kinney Risk Analizi Parametreleri ..... 46
5.1.2. Öncelik Grubu 1, Hayati Sistemler ..... 47
5.1.3. Öncelik Grubu 2, Operasyonel Sistemler ..... 48
5.1.4. Öncelik Grubu 3, Tünel Tahliye Sistemleri ..... 48

5.1.5. Devreye Alınmayacak Sistemler ..... 48
5.2. Ana Hattın ve İstasyonların Enerjisiz Kalma Durumu ..... 54
5.3. Jeneratörün Devreye Alınması ..... 54
5.4. Jeneratörlerin Çalıştırılması ..... 54
5.5. Hattın Enerjilendirilmesi ..... 56
5.6. İç ihtiyaç Trafolarının Beslenmesi ..... 57
5.7. Jeneratörün Devreden Çıkarılması ..... 58
5.8. Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Yönetimi İşlem Adımları ..... 58
6. M5 HATTI JENERATÖRÜ MATLAB – SİMULİNK SİMÜLASYONU ..... 64
6.1. Simülasyonun Amacı ve Kapsamı ..... 64
6.2. Simülasyon Sisteminin Modelleme Mantığı ve Tasarım Bileşenleri ..... 65
6.2.1. TEİAŞ Giriş Noktaları ..... 66
6.2.2. M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Kontrol Bloğu ..... 66
6.2.3. Jeneratörleri Kontrol Eden Mantık Bloğu ..... 68
6.2.4. Jeneratörler ..... 68
6.2.5. Üç fazlı Sistem Güç Ölçüm Devresi ve Yük kontrol Bloğu ..... 70
6.2.6. Yük kontrol Blokları ..... 71
6.3. Enerji Dağıtımı ve Yük Profilleri Kurgusu ..... 73
6.4. Giriş ve Çıkış Verilerinin Tanımlanması ..... 73
6.4.1. Teiaş Giriş Verilerinin Sağlanması ..... 73
6.4.2. Tren Enerjisi İhtiyacı ..... 74
6.4.3. Havalandırma Sistemleri Enerji İhtiyacı ..... 74
6.4.4. Acil Aydınlatma Sistemleri Enerji İhtiyacı ..... 74
6.4.5. Pompa Grupları Enerji İhtiyacı ..... 74
6.4.6. Hafif Yükler Enerji İhtiyacı ..... 75
6.4.7. Trafo ve İletim hattı kayıp yükleri ..... 75
6.5. Simülasyonun Uygulaması ..... 75
6.5.1. Hattın Enerji Kaybının Gerçekleşmesi ..... 76
6.5.2. M5 Kumanda Merkezi Kontrol Bloğu Süreci ..... 76
6.5.3. Jeneratörlerin Aktif Edilmesi Süreci ..... 76
6.5.4. Yüklerin Enerjilendirilmesi Süreci ..... 77
6.5.5. Simülasyonun Sonlandırılması Süreci ..... 77
6.6. Üretilen ve Harcanan Güç Verileri ..... 77
6.7. Yüklerin Ayrı Ayrı Devreye Alınması ve Güç Değişimi ..... 79
6.8. Saha ve Simülasyondaki Jeneratör Verilerinin Karşılaştırılması ve Analizi ..... 80
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 83
KAYNAKLAR ..... 85
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER ..... 89
ÖZGEÇMİŞ ..... 90

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Anadolu Yakası Raylı Sistem Ağ Haritası. ....8
Şekil 2.1. Örnek CER Trafo Merkezi ....11
Şekil 2.2. Örnek AC ve DC Hücreler ....12
Şekil 2.3. Örnek Gerilim ve Akım Trafoları ....13
Şekil 2.4. Örnek Enerji Doğrultucu Panolar ....14
Şekil 2.5. Örnek Sinyalizasyon Sistemleri ....15
Şekil 2.6. Örnek Katener Sistemi ....16
Şekil 2.7. Örnek Haberleşme Sistemi ....17
Şekil 2.8. Örnek Kumanda Merkezi ....18
Şekil 3.1. M5 hattı Teiaş Besleme Noktaları ....19
Şekil 3.2. M5 Hattı OG Tek Hat Şeması ....19
Şekil 3.3. CER gücü sistemi enerji transfer şeması ....20
Şekil 4.1. Deprem Eylem Planı Karar Süreci ....34
Şekil 4.2. Örnek Üsküdar İstasyonu Aydınlatma SCADA Ekranı ....36
Şekil 4.3. Örnek Üsküdar İstasyonu Karlı Kapılar SCADA Ekranı ....36
Şekil 4.4. Örnek Üsküdar İstasyonu Sulu Söndürme Sistemi SCADA Ekranı ....37
Şekil 4.5. Örnek Üsküdar İstasyonu Drenaj Pis ve Temiz Su SCADA Ekranı. ....37
Şekil 4.6. Örnek Üsküdar İstasyonu Yolculu Alan Havalandırma SCADA Ekranı ....38
Şekil 4.7. Örnek Üsküdar İstasyonu Havalandırma Sistemi SCADA Ekranı. ....38
Şekil 4.8. Örnek Üsküdar İstasyonu Yürüyen Merdiven Asansör SCADA Ekranı ....39
Şekil 4.9. Örnek Üsküdar İstasyonu Yolcu Turnikeleri SCADA Ekranı ....39
Şekil 5.1. M5 Metro Jeneratör Binası Tek Hat Şeması. ....45
Şekil 5.2. M5 Jeneratör Senaryosu İçin SCADA Üzerindeki Onay - İptal Ekranı ....54
Şekil 5.3. M5 Jeneratör Senkronizasyon SCADA Görseli ....55
Şekil 5.4. M5 Jeneratör Grubu SCADA Görseli ....55
Şekil 5.5. M5 Ana Hat İşletme SCADA Görseli ....56
Şekil 5.6. M5 İç İhtiyaç Trafoları SCADA Görseli ....57
Şekil 5.7. M5 Yarı Otomatik Jeneratör Senaryosu Sonlandırma Ekranı ....58
Şekil 6.1. M5 Metro Hattı Ana Hat Teiaş Bağlantı Hattı ....66
Şekil 6.2. M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Kontrol Bloğu ....67
Şekil.6.3. Jeneratör Kontrol Bloğu ....68
Şekil 6.4. Her Biri 2 MVA Görünür Güce Sahip Jeneratörler ....69
Şekil 6.5. Üç fazlı Sistem Analiz Devresi ve Yük Kontrol Bloğu ....71
Şekil 6.6. Yük Blokları ....71
Şekil.6.7. M5 Hattı Acil Durum Jeneratörleri Matlab-Simulink Simülasyonu ....72
Şekil 6.8. Jeneratörlerin Ürettiği Aktif Güç Zaman Grafiği ....78
Şekil 6.9. Harcanan Aktif Güç Zaman Grafiği ....78
Şekil 6.10. İlk Talep Edilen Yükler Güç Zaman Grafiği ....78
Şekil 6.11. Saha Jeneratörlerine Ait Çalışma Parametreleri ....81
Şekil 6.12. Saha Jeneratörleri ve Simülasyon Jeneratörleri Güç Zaman Eğrisi ....81

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. M5 Hattı Elektrifikasyon Ekipman Listesi.....20
Tablo 3.2. M5 Metro Hattı 34,5 kV OG Trafo Tablosu.....21
Tablo 5.1. Fine Kinney Risk Analizi Şiddet Puanı.....46
Tablo 5.2. Fine Kinney Risk Analizi Olasılık Puanı.....46
Tablo 5.3. Fine Kinney Risk Analizi Frekans Puanı.....47
Tablo 5.4. Fine Kinney Risk Analizi Risk Değeri Puanı.....47
Tablo 5.5. Risk Analizi Tablosu.....49
Tablo 5.6. M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları.....59
Tablo 6.1. Simülasyon Jeneratör Parametreleri.....70

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

AC : Alternating Current (Alternatif Akım)
ADMB : Acil Durum Müdahale Birimleri (Polis, İtfaiye, Ambulans, vs.)
ADME : Acil Durum Müdahale Ekipmanı
ADMED : Acil Durum Müdahale Ekipman Dolabı
ADY : Acil Durum Yöneticisi
ADMY : Acil Durum Müdahale Yöneticisi
AND BLOĞU : Logical And Gate (Mantıksal Ve Kapısı)
ATS : Automatic Train Control (Otomatik Tren Denetimi)
ATO : Automatic Train Operation (Otomatik Tren İşletmesi)
APS : Aesthetic Power Suplly (Yerden Besmeli Enerji Sistemi)
CCTV : Closed Circuit Television System (Kapalı Devre Televizyon Sistemi)
CCR : Control Central Room (Kumanda Merkezi)
CER : Control Energy Room (M5 Enerji Kontrol Odası)
DC : Direct Current (Doğru Akım)
EB : Emergency Brack (Acil Fren)
FİX POİNT : Katener Sabitleme Noktası
GEN : Generator (Jeneratör)
GFD : Generator Feeder Disconnector (Jeneratör Besleyici Ayırıcısı)
GOA4 : Grade of Automation Level 4 (4. Seviye Tren Otomasyon Sistemi)
GTF : Generator Terminal Feeder (Jeneratör Terminali Besleyici-Kesici)
GTR : Generator Transformer (Jeneratör Transformatörü)
INC : Incomer Circuit Breaker (DC Giriş Kesicileri)
İBB : İstanbul Büyükşehir Belediyesi
LBS : Load Break Switch (Yük Ayırıcısı)
LF : Load Fuse (Hat Besleme Kesicisi)
MCS : Manual Control System (Yarı Otomatik Tren İşletmesi)
NOT BLOĞU : Logical Not Block (Mantıksal Değil Kapısı)
NREL : National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)
OR BLOĞU : Logical OR Block (Mantıksal Veya Kapısı)
PA : Passenger Announcement (Yolcu Anonsu Sistemi)
PM : Power Management (Mekanik Güç Yönetimi)
PTES : Platform Train Emergency Stop Button (Peron Tren Acil Durdurma Butonu
RCF : Residual Current Fuse (Trafo Besleme Kesicisi)
RFD : Ring Feeder Panel (Ring Fider Panosu)
RTU : Remote Terminal Unit (Uzaktan Kontrol Ünitesi)
SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition (Denetsel Kumanda ve Veri Toplama Sistemi)
STF : Servis Trafosu Besleme Kesicisi
TEİAŞ : Türkiye Elektrik Kurumu
VF : Field Voltage Input (Alan Voltaj Girişi)
VLD : Voltage Limiter (Gerilim Sınırlayıcı)

## METRO HATLARINDA AFET VE ACİL DURUMLARDA ENERJİ SÜREKLİLİĞİNİN SAĞLANMASI


## ÖZET

Bilindiği üzere, kurulan her yapı ve tesis mutlaka birtakım standartlar referans alınarak inşa edilmiştir. Bu doğrultuda, kurulan her metro hattı ve açık demiryolu hattı da mutlaka ilgili standartlara uygun şekilde tasarlanmış, ulusal ve uluslararası norm ve standartlar bu aşamada belirleyici olmaktadır. Metro tasarım projelerinde, istasyonların ve tünel yapılarının enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere yerel enerji kaynakları kullanılmış ve bu enerji kaynakları üzerinden gerekli enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Normal şartlar altında, metro istasyonları bir gün içinde ortalama 18 saat aktif yolcu barındırmakta, geri kalan zaman diliminde ise bakım, onarım ve test faaliyetleri gerçekleştirmektedir. Bu nedenlerle, metro yapılarında 24 saatlik çalışma esasına göre sürekli bir enerji ihtiyacı oluşmakta ve metro tesislerinin enerji ihtiyaç döngüsü bu çerçevede devam etmektedir. Bir diğer önemli konu ise yerel enerji kaynaklarının kaybıdır. Bu durum, tedarikçi tarafından sağlanan enerjinin herhangi bir nedenle anlık veya belirsiz bir zaman aralığında kesintiye uğramasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu olasılıklar göz önüne alındığında, özellikle metro hatlarında kritik yükler olarak tabir edilen havalandırmalar, aydınlatmalar, sinyalizasyon sistemleri vb. yüklerin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla sistem yedekliliği kapsamında kesintisiz güç kaynağı (UPS) destekli yardımcı güç sistemleri tesis edilmiştir. Ancak tesis edilen yardımcı güç sistemleri de belli ölçüde enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Bu nedenle, afet ve acil durumlarda tahliye senaryolarına dahil kritik ekipmanların çalışmasını ve tünelde kalan trenlerin en yakın istasyona ulaşmasını sağlamak için ek olarak acil durum jeneratör sistemleri de tesis edilmiştir.
Bu çalışmada, M5 Üsküdar-Çekmeköy metro hattında acil durum jeneratörlerinin bir deprem anında enerji ihtiyacını nasıl karşıladığı analiz edilmiştir. Çalışmada, jeneratörlerin enerji sürekliliğini sağlama süreci MATLAB/Simulink ortamında modellenerek simüle edilmiştir. Modelde, her bir yük bağımsız olarak devreye alınmış ve talep edilen güç miktarına göre jeneratörlerin üretimi dinamik olarak ayarlanmıştır. Metodoloji kapsamında, risk tabanlı bir yük yönetim stratejisi oluşturularak kritik yüklerin önceliklendirilmesi sağlanmıştır. Simülasyon çalışması, jeneratörlerin yük yönetim süreçlerini ve sistemin herhangi bir olağanüstü durumda enerji sürekliliğinin sağlanması için gereken adımları değerlendirmiştir. MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen modelleme, jeneratör kontrol mekanizmaları ve operatör müdahale süreçlerini test etmeye olanak tanımıştır. Simülasyon sonuçları, yük yönetim stratejilerinin etkinliğini ve jeneratörlerin acil durumlarda sağladığı enerji sürekliliğini değerlendirme imkanı sunmuştur. Çalışmanın sonunda, metro işletmelerinde ve altyapılarında afet durumlarında enerji sürekliliğini artırmaya yönelik öneriler sunulmuş ve yapay zeka tabanlı optimizasyon algoritmaları ile yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi ileri teknolojilerin potansiyel katkıları tartışılmıştır.



**Anahtar Kelimeler:** Afet ve Acil Durum Yönetimi, DC Jeneratör Sistemleri, Enerji Yönetimi, Metro Hatlarında Elektrifikasyon Sistemleri, Yer Altı Metro Tesis ve Yapıları.

**ENSURING ENERGY CONTINUITY IN METRO LINES IN DISASTER AND EMERGENCY SITUATIONS**


## ABSTRACT

As is well known, every constructed structure and facility has been built by referring to certain standards. Accordingly, every metro line and open railway line has been designed in compliance with the relevant standards, with national and international norms and standards playing a decisive role in this process. In metro design projects, local energy sources have been used to meet the energy demands of stations and tunnel structures, and the necessary energy needs have been supplied through these sources. Under normal conditions, metro stations have accommodated passengers for an average of 18 hours within a 24-hour period, while the remaining time has been allocated for maintenance, repair, and testing activities. For this reason, a continuous energy demand has arisen in metro structures based on a 24-hour operational principle, and the energy demand cycle of metro facilities has continued within this framework. Another important issue has been the loss of local energy sources. This refers to power outages caused by the supplier due to any reason, whether instant or for an indefinite period. Considering these possibilities, backup power systems supported by uninterruptible power supplies (UPS) have been installed to ensure the energy supply of critical loads in metro lines, such as ventilation, lighting, and signaling systems. However, these backup power systems have only been able to meet energy needs to a certain extent. Therefore, additional emergency generator systems have been installed to ensure the operation of critical equipment involved in evacuation scenarios during disasters and emergencies, as well as to supply the energy needed for any train stranded in a tunnel to reach the nearest station.

This study analyzed how emergency generators met the energy demand during an earthquake on the M5 Üsküdar-Çekmeköy metro line. In this study, the process of ensuring power continuity through generators was modeled and simulated in the MATLAB/Simulink environment. In the model, each load was independently activated, and the generator output was dynamically adjusted according to the requested power demand. Within the methodology, a risk-based load management strategy was developed to prioritize critical loads. The simulation study evaluated the load management processes of the generators and how the system maintained energy continuity during extraordinary situations. The modeling conducted using MATLAB/Simulink allowed for testing generator control mechanisms and operator intervention processes. The simulation results provided an opportunity to assess the effectiveness of load management strategies and the energy continuity provided by the generators in emergency situations. At the conclusion of the study, recommendations were made to enhance energy continuity in metro operations and infrastructure during disasters, and the potential contributions of advanced technologies such as artificial intelligence-based optimization algorithms and renewable energy integration were discussed.



**Keywords:** Disaster and Emergency Management, DC Generator Systems, Energy Management, Electrification Systems in Metro Lines, Underground Metro Facilities and Structures.

# 1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca ilk çağlardan bu yana taşımacılık faaliyetleri süregelen bir gereklilik olmuştur. İnsan yaşamının gereklilikleri arasında yer alan bu faaliyetler tarihler öncesinde ilk çağlarda bile o zamanın teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Öyle ki, milattan önceki yıllarda ilkel sallar, ağaçtan imal edilen kar kızakları, yük hayvanları ile insan veya yük taşıma vb. faaliyetler gerçekleştirilmişti. Gün geçtikçe toplu yerleşim alanlarındaki yüksek iş potansiyeli ve bu toplu yerleşim alanlarının sosyal imkânları arttıkça, plansız bir nüfus artışı kaçınılmaz olmuştur. Büyük şehirlerde artan nüfusun ortaya çıkardığı büyüme, kalabalık yapılaşma ve bireysel araç kullanımın artması ile ulaşım sorunları ortaya çıkmıştır. Bu alanlarda yaşayan insanların bir yerden başka bir yere ulaşımı zorlaşmış ve bu nedenle toplu şekilde yolcu taşımacılığının, bu karmaşanın çözülmesine dair önemli bir seçenek olduğu anlaşılmıştır (Maden ve Avlar, 2017). Ortaya çıkan trafik sıkışıklığını hafifletmek adına toplu ulaşım sistemleri orta ve büyük ölçekli şehirlerde önemini artırmaktadır (İştahlı, 2013).

Dünya üzerinde birçok farklı taşımacılık örneği olsa da bunların arasında en çok yaygın olarak kullanılanları; Karayolu Taşımacılığı, Havayolu Taşımacılığı, Denizyolu Taşımacılığı ve Demiryolu Taşımacılığıdır. Birbirinden farklı olan bu taşımacılık tercihleri gerek faaliyetin kapsamına, taşınacak insan, ürün, mal veya hizmetin çeşitliliğine, kullanım amacı ve kullanılma yerine göre birçok farklı parametre hesaba katılarak tercih edilmekte ve taşımacılık yani, ulaşım faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Gelişmekte olan ve yoğun nüfuslu toplumlarda, hareketliliği sağlamak amacıyla verimli bir ulaşım ağı oluşturmak zorunluluk haline gelmiştir. Demiryolu ulaşımı, genellikle yük taşımacılığında kullanılmakla birlikte, nüfusun yoğun olduğu ülkelerde yüksek yolcu kapasitesine hizmet verebilmesi nedeniyle önemli bir ulaşım yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Hem trafik yoğunluğunu azaltma hem de toplu taşıma ihtiyacını karşılama konusundaki avantajları, bu ulaşım biçimini büyük şehirlerde vazgeçilmez kılmaktadır (Liu ve Yang, 2018). Bu doğrultuda çerçeveyi biraz daraltıp konuyu şehir içi yolcu taşımacılığına indirgediğimizde özellikle sürekli gelişen, büyüyen ve durmadan göç almaya devam eden büyükşehirlerde yolcu taşımacılığının her geçen gün daha da zorlaştığını görmekteyiz. Özellikle toplu taşıma bilincinin henüz oturmadığı kentlerde bireysel ulaşım tarzı şehrin kalabalık bir trafik yoğunluğu oluşmasına neden olmaktadır.

Hal böyle iken meydana gelen trafik sıkışıklığını azaltmak için toplu ulaşım sistemleri orta ve büyük ölçekli şehirlerde daha önemli hale gelmektedir (Liu, 2024). Şehir içi yolcu taşımacılığının aksamadan devam etmesi, yolcularına daha hızlı, konforlu ve güvenli bir ulaşım imkânı sunulması adına birçok proje hayata geçirilmektedir. Raylı sistem hatları içerisinde metro, hafif metro (LRT), tramvay, füniküler gibi toplu ulaşım tercihleri de bunlardan birer tanesidir. Bu sistemlerin ilk kurulum maliyet her ne kadar yüksek olsa da zaman içerisinde mutlaka kendini amorti etmekte ve orta ve uzun vadede kişi başına düşen ulaşım maliyetlerini de avantajlı konuma getirmektedir. Öte yandan son dönemde iletişim, kontrol ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler, şehir içi raylı sistemlerde otomatik tren işletmesi (ATO) teknolojisinin benimsenmesini sağlamıştır. Bu yenilik, geleneksel manuel sürüşün yerine geçerek şehir içi ulaşımda daha güvenli ve verimli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

ATO sistemleri, sürüşün otomatikleşmesiyle işletme maliyetlerini azaltırken, yolcu güvenliği ve konforunu da artırmaktadır (Dong ve diğ, 2010). Günümüzde raylı sistemlerde, tam otomatik ya da sürücüsüz metro sistemlerine geçiş süreci hız kazanmaktadır ve eski metro hatları da yapı ve tasarım sistemleri el verdikçe bu yeni teknolojiye uygun olarak güncellenmektedir. Özellikle bu kapsamda metro araçlarının pozisyonları, yönleri ve hareketleri sinyalizasyon sistemleri tarafından izlenip kontrol edilmekte, böylece güvenli ve kesintisiz bir ulaşım sağlanmaktadır. Bu modernizasyon, yolcu konforunu artırmanın yanı sıra işletme maliyetlerini azaltarak verimlilik sağlamaktadır (Öztürk ve Günay, 2018).

Otomatik sürücüsüz metro işletmesi tamamen SCADA üzerinden idare edilmektedir. SCADA kontrol sistemi, hattın elektronik, elektromekanik ve elektrik altyapılarının yönetim ve denetiminden sorumludur. Bu sistem, enerji kaynaklarının kontrolünü sağlamak, ana hat ve depo bölgelerinde enerji manevralarını ilgili ekiplerle iş birliği içinde gerçekleştirmek gibi kritik operasyonları yerine getirir. Ayrıca, sistem tarafından tespit edilen arızaların izlenmesi, işletim sırasında hattaki mekanik ve teknik bileşenlerin kontrolü (örneğin; asansörler, yangın algılama ve söndürme sistemleri gibi) gibi görevleri de kapsar. Acil durumlarda, sahadan gelen hattın bilgi ve ihtiyaçlarına göre senaryoların devreye alınması ve yönetimi, SCADA sistemi aracılığıyla hayata geçirilen önemli işlevler arasında yer alır. Teknolojik yenilikler, operasyon süreçlerinin tamamını izleme,

yönetme ve kontrol etme yeteneğine sahip sistemlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. UITP, IEC 62267 standardına benzer şekilde, Otomasyon Seviyelerini (GOA) belirleyerek bu sistemlerin standart bir tanımını yapmıştır. Bu sayede, raylı sistemlerde otomasyon seviyeleri belirgin hale getirilerek güvenli ve verimli bir işletim tekniği sağlanmıştır (Öztürk ve Günay, 2018). Ayrıca bu sistemlerin standartlaşması, dünya üzerindeki birçok metro işletmeleri için birbirleri arasında kıyas yapabilme ortamı oluşturmuştur. Sürücüsüz ve tamamen otomasyon sistemi destekli tren işletimi yapılan hatlarda GOA4 güvenlik seviyesi kullanılmaktadır (Ekici ve Akay, 2024,). Bu seviye son teknoloji yolcu emniyeti sağlayan güvenlik tedbirleri ile donatılmıştır. Ayrıca, tüm kontrollerin trafik kontrol merkezinden yapılması ve acil durumlarda merkezin hızlı müdahale olanağı sunması, sürücüsüz metro sistemlerinin diğer sistemlere göre daha güvenli ve yüksek kalitede hizmet sağladığını göstermektedir. Bu sistematik özellik, yolcu güvenliğini artırırken, işletmede yaşanan aksaklık durumlarında hızlı ve etkili çözümler sunulmasına olanak tanır (Öztürk ve Günay, 2018).

Metro sistemleri yaygınlaştıkça birbirinden farklı, her biri için ayrı bir reaksiyon gerektiren acil durum süreçlerinin yaşanması gayet muhtemel görünmektedir (Lu ve Sun, 2020). Bu nedenle özellikle trenlerde veya istasyonlarda oluşan acil durumlarda güvenlik sistemi en üst düzeyde tutulmuş ve buna bağlı olarak acil durum senaryoları, tünelde kalan trenlerin en yakın istasyona sevk edilmesi ve bunun gibi süreçleri gerçekleştirmektedir. Ancak bu operasyonel süreçlerin gerçekleştirilmesi için mutlak bir enerji ihtiyacı doğmaktadır. Gerekli olan enerji ihtiyacı, metro hattı güzergahı üzerinde bulunan bir yerel elektrik sağlayıcısı tarafından karşılanmaktadır. Şehir içi raylı sistemlerde kullanılan DC besleme gerilimlerinin sınırları, TS EN 50163 standardında tanımlanmakta olup, bu seçim sistemin ihtiyaçlarına göre yapılmaktadır. Bu standart, enerji temininde gerekli olan gerilim seviyelerinin belirlenmesine olanak tanır (Akçay ve Ersoy, 2017).

Kentsel ulaşımda kullanılan metro sistemleri, enerjiyi genellikle orta gerilim seviyesinden temin eder. Bu enerji, önce CER (Çok Fazlı Elektriksel Dağıtım) transformatör merkezlerinde gerilim seviyesi düşürülerek uygun seviyeye getirilir. Ardından, bu enerji doğrultulup doğru akıma (DC) dönüştürülerek metro sisteminin güç ihtiyacını karşılar. Bu süreç, metro hatlarının düzgün bir şekilde çalışabilmesi için gereken stabil enerjinin

sağlanmasına olanak tanır (Karakuş ve Yumurtacı, 2018). Bu giriş ve çıkış verileri hattın yapısı ve ihtiyacı dahilinde mutlaka hat özelinde bir simülasyon programı ile hesaplanmaktadır. DC simülasyonları yapılırken, yaşanabilecek en kötü senaryolar belirlenir ve bu senaryolar içerisinde, bir transformatör merkezindeki CER transformatörlerinden birinin arızalanması ya da komşu bir veya iki transformatör merkezinin tamamen devre dışı kalması gibi durumları içerir. Bu tür olasılıklar, transformatör merkezi tasarımını oluştururken dikkate alınır. Bu yaklaşım, sistemin olası arızalara karşı dayanıklılığını test etmeyi ve arıza durumlarında nasıl bir tepki verileceğini anlamayı amaçlar. Böylece, tasarım, enerji kayıplarını minimize etmek ve sistemin güvenliğini sağlamak üzere yapılır (Karakuş ve Yumurtacı, 2018). Trenler, tasarım kriterlerine bağlı olarak 600 V DC, 750 V DC veya 1500 V DC gibi farklı gerilim seviyelerinde çalışmaktadır.

Bu gerilim seviyeleri, trenlerin enerji ihtiyaçları ve sistemin teknik özellikleri göz önünde bulundurularak belirlenmektedir (Dong ve diğerleri, 2010). Bu tez kapsamında simülasyonu yapılacak olan M5 Metro Hattı, 1500 V DC gerilim seviyesiyle enerji beslemesi sağlamaktadır. Raylı sistemlerde enerji tüketimi, iki ana kategoriye ayrılmaktadır; CER yükü, trenlerin hareket etmesi için gerekli olan enerjiyi ifade ederken, istasyon yükleri, istasyonlardaki aydınlatma, havalandırma, sinyalizasyon sistemleri, güvenlik ve diğer elektrikli ekipmanların çalışmasını sağlar. Metro sistemlerinde bu iki kategorinin enerji tüketimi arasında genellikle belirli bir oran bulunur. Metro hattı sistemlerinde enerji tüketiminin %45' i CER yüklerinden, %55' i ise istasyon yüklerinden oluşmaktadır. Ortaya çıkan bu oran, metro hatlarında kullanılan enerjinin büyük kısmının istasyonlarda tüketildiğini, ancak trenlerin hareketi için gerekli enerjinin de önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir (Su ve diğ., 2016). Metro hatlarındaki istasyon yükleri, enerji tüketimi açısından üç ana gruba ayrılır; rezistif, endüktif ve kapasitif yükler. Rezistif yükler, ısıtıcılar ve bazı elektronik cihazlar gibi enerji tüketen öğeleri içerir. Endüktif yükler, yardımcı servis transformatörleri, yürüyen merdivenler, aydınlatma sistemleri, iklimlendirme cihazları, motorlar ve pompalar gibi manyetik alanlar oluşturan ekipmanları kapsar. Kapasitif yükler ise, besleyici kablolar, elektronik balastlı aydınlatmalar ve kesintisiz güç kaynakları gibi enerji depolama ve düzenleme işlevi gören cihazlardır. Bu üç tür yük, metro sistemlerinin enerji yönetimini ve verimliliğini etkileyen önemli faktörlerdir (Belay, 2016). CER yükü, trenlerin hareketi

için gereken çekiş gücünün yanı sıra, güç dağıtım sistemi üzerindeki iletim hatlarında, hem gidiş hem de dönüş yönünde oluşan enerji kayıplarının toplamını kapsar. Bu yük, trenlerin hareketine harcanan enerji ile iletimdeki kayıpları içerir ve sistemin genel enerji tüketimi üzerinde etkili olur (Su ve diğ., 2016). Ana hat üzerinden, elektrik sağlayıcısı tarafından sağlanan enerji bu şekilde pay edilmektedir. Normal şartlar altında metro İstasyonları 24 saatlik 1 gün diliminde ortalama 18 saat aktif yolcu barındırmaktadır. Bunun dışında, istasyonların işletmeye kapalı olduğu zaman aralığında ise, bakım onarım ve test faaliyetleri gibi çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu nedenlerle metro yapılarında 24 saatlik çalışma esasına göre sürekli enerji ihtiyacı oluşmakta ve metro tesislerinin enerji ihtiyaç döngüsü bu çerçevede devam etmektedir. Bir diğer önemli konu ise yerel enerji kaynaklarının kaybıdır. Bu durumlar tedarikçi tarafından sağlanan enerjinin herhangi bir nedenle anlık veya belirsiz zaman aralığında oluşan enerji kayıplarıdır. Bazı kritik yükler için enerji kesintisi yaşanmamalı, şebekeden kaynaklanabilecek olası sorunlar filtrelenmeli ve gerilimdeki dalgalanmalar engellenmelidir. Bu tür yükler, kesintisiz güç kaynağı (UPS) ile beslenir. SCADA sistemleri, sinyalizasyon ekipmanları, acil çıkışlar, yolcu alanları ve tünel aydınlatması gibi, şebeke kesintilerinin ciddi aksaklıklara yol açabileceği kritik yükler bu kategoriye girer. Bu yüklerin sürekliliği, sistemin güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için büyük önem taşır (Güray, 2013). Bu nedenle İstasyonlarda yedekli sistem enerji kaynağı tesis edilmektedir. Ancak tesis edilen yardımcı güç sistemleri de belli ölçüde enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Ayrıca, enerji giriş noktalarında meydana gelebilecek bir arıza durumunda, sistem orta gerilim şebekesine bağlanabilen jeneratörler sayesinde kesintisiz bir şekilde çalışmaya devam edebilir. Bu özellik, enerji tedarikinde yaşanabilecek olası sorunlara karşı güvenilir bir yedekleme sağlayarak sistemin sürekli çalışmasını temin eder (Güzeller, 2017).

Metro projelerinde enerji teminin sürekliliğini sağlamak için söz konusu sistemlere ilaveten acil durum jeneratör sistemleri de tesis edilmekte olup, söz konusu sistemlerin kapasitesi yedekli şebeke beslemesinin de kaybedilmesi durumlarında metro işletme sistemlerinin kritik güçlerini besleyebilecek büyüklükte seçilmektedir (Kutluay, 2014). Hatta kurulumu yapılan jeneratör sistemi hattın tamamını ortak bara üzerinden beslemekte, ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacını da optimal seviyelerde karşılamaktadır. Bu sistemlerin kontrolü ve takibi yine SCADA üzerinden yapılmaktadır. SCADA sisteminin

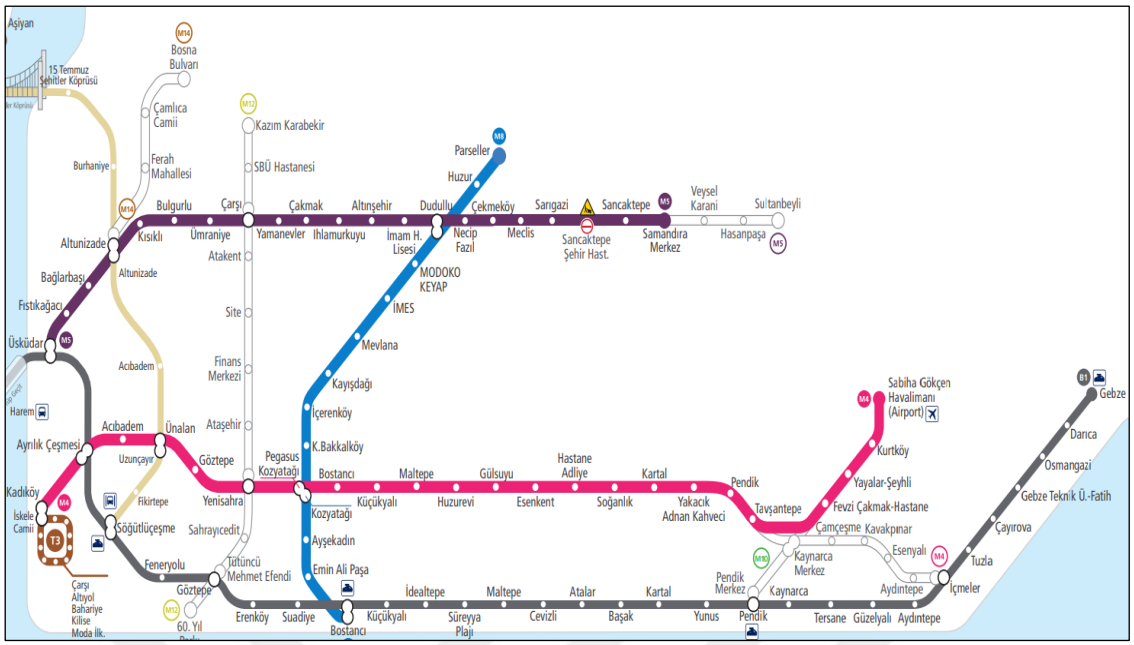
jeneratör setlerinde kullanılması, elektrik enerjisinin daha verimli ve tasarruflu bir şekilde üretilmesini sağlar. Bu sistem, aynı zamanda iş güvenliği risklerini azaltarak olası kayıpları en aza indirir. SCADA, sürekli izlenebilir ve takip edilebilir olduğu için meydana gelebilecek aksaklıklar önceden tespit edilip minimize edilebilir. Ayrıca, sisteme ait anlık ve geçmiş verilere kolayca ulaşılabilmesi ve raporlanabilmesi, değerlendirme süreçlerinde büyük bir kolaylık ve önem taşır (Karataş ve Diğ., 2018). Sisteme entegre edilen jeneratörler, olası enerji kesintilerine karşı her an devreye alınmaya hazır bir şekilde bekletilmektedir. Jeneratör çıkışlarına bağlı orta gerilim (OG) kesici röleleri ile OG ring sistemini besleyen kesici röleler arasında, güvenli ve koordineli bir enerji aktarımını sağlamak amacıyla bir kilitleme mekanizması bulunmaktadır. Bu kilitleme sistemi, enerji kesintisi durumunda devreye girerek, güvenliği sağlamak için önemli bir rol oynar. Komple bir enerji kesintisi yaşandığında, ring kesicilerinin arasında yer alan gerilim ve akım trafoları, bu durumu algılar ve rölelere enerji akışı olmadığına dair bir sinyal gönderir. Bu sinyal, sistemin otomatik olarak durmasına veya kesilmesine neden olur, böylece sistemdeki olası arızaların daha fazla yayılmasının önüne geçilmiş olur. Bu sistem, enerji kaybı yaşandığında kesici rölelerin doğru bir şekilde kontrol edilmesini sağlayarak güvenli ve verimli bir işleyişi oluşturur (Özmen, 2014).

Yer altı metro istasyonlarında, acil durum ihtiva eden durumlar arasında en önemlisi olası bir yangın durumudur. Bu durum meydana geldiğinde istasyonlardan yolcu tahliyesinin en kısa sürede gerçekleştirilebilmesi için birçok sistem aynı anda ve entegre çalışmak durumundadır. Bu sistem entegrasyonu mutlaka birçok hesaplama ve simülasyon ile test ve devreye alma süreçlerinde belirlenmektedir. Metro istasyonları ve tünellerinde, yangın durumlarına karşı kapsamlı güvenlik önlemleri alınmaktadır. Bu önlemler, yangının yayılmasını engellemek ve yolcuların güvenli bir şekilde tahliye edilmesini sağlamak için tasarlanmış bir dizi sistem içerir. Yangın bölmeleri, yangının belirli bir alanda sınırlanmasını sağlayarak diğer bölgelere yayılmasını engeller. Kaçış yolları, yolcuların yangın anında güvenli bir şekilde istasyonlardan ya da tünellerden tahliye edilmesine olanak tanır. Ayrıca, yangın ihbar sistemleri yangının erken tespit edilmesini ve yetkililere anında haber verilmesini sağlar. Yangın söndürme sistemleri, yangın çıktığında hızlı ve etkili bir şekilde müdahale edilmesine olanak verir. Duman kontrol sistemleri ise, yangın sırasında dumanın birikmesini engelleyerek görüş mesafesini artırır ve hava kalitesini iyileştirir. Tüm bu önlemler, metro sistemlerinde yangın güvenliği için

önemli birer bileşendir. Bu tür güvenlik tasarımları, her bir sistemin tek bir yangın olayını dikkate alarak çalışacak şekilde planlanır. Bu, sistemlerin olası bir yangına karşı dayanıklı ve etkin olmasını sağlar. Ayrıca, yangın senaryoları ve eylem planları, yangın durumunda yapılacaklar hakkında detaylı bir rehber sunar ve hızlı bir müdahale için gerekli prosedürleri belirler. Bu kapsamlı yaklaşım, yangın anında hem yolcuların hem de personelin güvenliğini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır (Karakulak ve Eyigün, 2022). Bu tasarımlar yardımcı tesis sistemleri olarak adlandırılmakta ve sistem bileşenleri olarak entegrasyonu sağlanmaktadır. Bu sistemlerin entegrasyonu da yine SCADA üzerinden otomatik olarak hazırlanmakta ve sistemde otomatik acil durum senaryoları olarak adlandırılmaktadır.

Metrolarda yangın senaryoları, yangın anında nasıl müdahale edileceği, dumanın nasıl kontrol edileceği ve yolcuların nasıl tahliye edileceği ile ilgili detaylı bir planı içerir. Bu senaryolar, tahliyenin en hızlı şekilde yapılabilmesini sağlamak amacıyla çeşitli sistemlerle desteklenir. Metro tasarımlarında hem otomatik hem de manuel müdahale yöntemleriyle çalışan kurtarma süreçleri oluşturulmuştur. Otomatik sistemler, yangın başladığında hemen devreye giren yangın söndürme, duman tahliye, acil aydınlatma ve yönlendirme sistemlerini kapsar. Bu sistemler, yangının etkilerini azaltmaya ve tahliyeyi hızlandırmaya yönelik olarak tasarlanmıştır. Manuel sistemler ise, acil durum ekiplerinin aktif müdahale etmesine olanak tanır. Bu sistemler, acil çıkış yollarının yönetilmesi, yangın söndürme ekipmanlarının kullanılması ve yolcuların doğru şekilde yönlendirilmesi gibi işlemleri içerir ( Fazilet, 2015).

Hazırlayacak olduğumuz tez çalışmasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi iştiraki olan Metro İstanbul A.Ş şirketi bünyesinde işletmesi yapılan M5 hattı üzerinde çalışılacaktır. M5 Metro hattı İstanbul'un Anadolu yakasında faaliyet gösteren ikinci metro hattı olmakla beraber, Türkiye'nin de ilk sürücüsüz metro olma özelliğini taşımaktadır (Ölmez ve Kılıç, 2020). M5 Metro hattı ikinci etabına kadar olan kısmın (Üsküdar – Ümraniye – Çekmeköy) yapısal ve işletmesel bilgileri ise; işletme hattı uzunluğu 17,2 km, toplam istasyon sayısı 16, toplam tren sayısı 126, tam tur servis süresi 64 dakika ve sefer sıklığı 4 dakikadır. İstanbul Anadolu Yakasında faaliyet gösteren metro hatlarının tamamı Şekil 1.1.' de görülmektedir.




Şekil 1.1. Anadolu Yakası Raylı Sistem Ağ Haritası (www.metro.istanbul/yolcuhizmetleri/agharitalari, Ziyaret tarihi: 8 Kasım 2024).

Çalışmada M5 Üsküdar Çekmeköy Metro hattının ikinci etaba dahil bölgelerinde herhangi bir olası afet ve acil durumlarda (Yangın, Deprem, Sel vb. Olağan dışı durumlar) veya genel ve yerel enerji kesintilerinde yedeklilik esasına göre çalışan kesintisiz güç kaynağı (UPS) sistemlerinin enerji ihtiyacını karşılayamadığı durumlarda İstasyonların kritik iç ihtiyaçlarının enerjisinin sağlanması, ihtiyaç halinde acil durum senaryolarının devreye girmesi için senaryoya bağlı ekipmanların enerjisinin sağlanması ve tünel içerisinde kalan trenlerin en yakın istasyona sevki için ihtiyaç duyacağı enerjinin sağlanması adına tesis edilen 3 grup = 2 *2 *2 ve toplamda 6 MVA kapasiteli 10 ton yakıt ikmali jeneratör grubu tesis edilmiştir. Bu çalışma, M5 Üsküdar-Çekmeköy metro hattında olası bir deprem anında hattın enerji kaybı durumunda, yolcu tahliye sistemleri ve kritik yüklerin enerji ihtiyacının acil durum jeneratörleri üzerinden nasıl sağlandığını analiz etmektedir. Normal koşullarda 3 farklı koldan yerel enerji kaynağı üzerinden beslenen M5 hattı, senaryo gereği enerji besleme girişlerinin kesilmesiyle enerjisiz bırakılacaktır. Bu durumda jeneratör grubunun senkronizasyonu sağlanarak devreye alınacak ve hattın CER sistemleri ile acil durumda ihtiyaç duyulan istasyon yüklerinin enerji ihtiyacı karşılanacaktır. Jeneratörlerin devreye alınmasından sonra kritik yüklerin belirli bir sıraya göre kademeli olarak devreye alınması sağlanacaktır. Bu süreç, oluşturulan risk analizi doğrultusunda önceliklendirilmiş yüklerin belirli bir plana göre

sisteme entegre edilmesiyle gerçekleştirilecektir. Kritik yüklerin sırası ile devreye alınması, enerji sürekliliğinin sağlanması ve enerji optimizasyonunun gerçekleştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Jeneratörlerden çekilen yük miktarları ile saha enerji ihtiyaçları karşılaştırılarak, enerji yönetiminin verimliliği değerlendirilecektir. Çalışma kapsamında, jeneratörlerin enerji sürekliliğini sağlama süreçleri MATLAB/Simulink ortamında modellenerek simüle edilmiştir. Modelde her bir yük bağımsız olarak devreye alınacak ve talep edilen güç miktarına göre jeneratörlerin üretimi dinamik olarak ayarlanacaktır. Simülasyon, jeneratörlerin farklı yük durumlarında nasıl bir performans sergilediğini analiz ederek, sistemin afet ve acil durum senaryolarında enerji sürekliliğini sağlama kapasitesini değerlendirmeye olanak tanıyacaktır. Risk tabanlı yük yönetim stratejisi, sistemin kritik yüklerin öncelik sırasına göre devreye alınmasını sağlayarak, jeneratörlerin en verimli şekilde çalışmasına olanak tanıyacaktır. Bu strateji sayesinde, hem enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı sağlanacak hem de aşırı yüklenme riskleri en aza indirilecektir. Aynı zamanda sistemin esnekliği artacak ve ani yük değişimlerine karşı daha dirençli bir yapı oluşturulabilecektir. Çalışmanın sonunda, metro işletmelerinde ve altyapılarında afet ve acil durumlarda enerji sürekliliğini artırmaya yönelik öneriler sunulacaktır. Bu öneriler kapsamında, yüklerin sınıflandırılması, senaryo tabanlı müdahale planları ve otomasyonun artırılması gibi unsurlar değerlendirilecektir.
Yapay zeka tabanlı optimizasyon algoritmaları ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi ileri teknolojilerin enerji sürekliliği üzerindeki potansiyel katkıları da tartışılacaktır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, enerji yönetimi sistemlerinde öngörü kabiliyetini artırarak daha proaktif yaklaşımların benimsenmesine olanak sağlayacaktır. Özellikle enerji yönetiminin optimizasyonuna yönelik geliştirilecek yapay zeka senaryolarının, afet ve acil durum senaryolarında jeneratör sistemlerinin daha etkin kullanımını sağlayarak enerji sürekliliğini artıracağı öngörülmektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin güneş ve rüzgar enerjisi) entegrasyonu, sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunarken, kritik yüklerin desteklenmesi için hibrit sistem yapılarının geliştirilmesini teşvik eder. Bu hibrit sistemler, enerjinin kesintisiz sağlanmasında alternatif kaynakların dinamik kullanımını mümkün kılarak sistem esnekliğini artırır.

## 2. METRO HATLARI ELEKTRİFİKASYON SİSTEMİ VE YÜK DAĞILIMLARI

Metro hatlarındaki enerji besleme gerilimleri 750 Volt doğru akım ile 1500 Volt doğru akım arasında bir güç gereksinimine ihtiyaç duymaktadır. Şehirlerarası ve banliyö demiryolu hatları, genellikle 25kV 50Hz' lik besleme gerilimi ile çalışmaktadır. Diğer yandan, nostaljik tramvaylar gibi eski banliyö trenleri 600V DC ile beslenirken, hafif raylı sistemler (LRT) ve metro sistemleri, ihtiyaç duydukları enerji için 750V DC ile 1500V DC arasında değişen gerilim seviyelerini kullanmaktadır. Bu gerilim değerleri, her sistemin çalışma özelliklerine ve altyapısına göre belirlenmiştir (Keskin, 2013). Ülkemizde yaygın olarak kullanılan gerilim seviyeleri, 34,5 kV CER transformatörü çıkışı devamında doğrultucu grubuna gönderilerek 1500 V DC elde edilerek kullanılan gerilim seviyeleridir. Raylı sistemlerde enerji yükleri CER ve istasyon olmak üzere iki ana sistemde ayrılmaktadır. CER yükleri ve istasyon yükleri arasında %45 CER sistemi yükleri ve %55 istasyon sistemleri yükleri tüketimi şeklinde bir oran bulunmaktadır (Ölmez ve Kılıç, 2020).

İstasyonlardaki enerji yük sistemleri rezistif, endüktif ve kapasitif sistem yükleri olmak üzere 3 ayrı kategoride yer almaktadır. İstasyonlardaki rezistif yükler ısıtıcı sistem yükleri ve bir takım elektronik sistem yükleri olarak tanımlayabiliriz. Endüktif yük sistemleri ise yardımcı servis trafoları, aydınlatma üniteleri, ısıtma ve soğutma hatları, yürüyen merdiven ve asansörler, motor ve pompa gruplarıdır. Kapasitif yükler ise hat boyunca besleyici kablolar ve UPS güç kaynaklarıdır. CER yükü ise trenlerin ana hatta hareket edebilmesi için sağlanan yüke eş değedir. Herhangi bir afet ve acil durum nedeniyle hattın enerjisinin kaybedilmesi veya genel ve yerel enerji kesintileri esnasında kritik yükler diye tarif edilen sistemlerin enerjisinin kesintisiz sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle metro tesislerinde yedekli sistem enerji kaynakları kurulmaktadır. Ancak metro hatlarında tesis edilen yardımcı güç sistemleri de belli ölçüde enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Ayrıca tüm enerji giriş noktalarında herhangi bir durum nedeniyle enerji kaybının yaşanması sonrasında, orta gerilim sistemine bağlanarak enerji ihtiyacını karşılayabilen jeneratör beslemesi sistemi bulunmaktadır (Güzeller, 2017). Bu sistemler, istasyonların kritik altyapılarını desteklemenin yanı sıra, acil durum senaryolarında yolcu tahliyesi ve haberleşme sistemlerinin çalışmasını da güvence altına alır. Raylı sistemlerin elektrik ihtiyaç sağlayıcı sistemleri aşağıdaki alt-sistemlerden oluşur.

## 2.1. CER Trafo Merkezi

CER trafo merkezleri, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında hayati bir rol oynayan dönüşüm istasyonlarıdır. Bu merkezler, elektrik akımının gerilim seviyesini ihtiyaçlara göre yükseltip düşürmek için kullanılır. Metro İşletmelerinde trafo merkezlerinin görevleri; Enerji Teiaş tarafından sağlanan enerjinin voltaj değerinin ayarlanmasında, bu değerlerin stabil şekilde hat üzerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Özetle, trafo merkezleri, yüksek voltajı enerji ihtiyacı olan her noktada güvenli bir şekilde kullanabileceği seviyelerde stabil halde sağlamaktadır.

Trafo merkezleri, enerjiyi farklı bölgelere ve kullanım alanlarına dengeli ve güvenli bir şekilde yönlendirir, böylece elektrik her lokasyonun ihtiyacını karşılayacak şekilde dağıtılmış olur. Teiaş tarafından alınan enerjinin dalgalanmalarını denetleyerek aşırı yüklenmelerin önüne geçer ve elektrik sisteminin kararlı çalışmasını sağlar. Koruma ve Güvenlik Sağlama: sistemdeki olası arızalara karşı koruma sağlar ve yüksek gerilimden kaynaklanabilecek tehlikeleri azaltır. Özetle, Metro hatlarında kullanılan trafo merkezleri elektrik enerjisinin güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde iletilmesini sağlayan önemli bileşenlerdir.

Şekil 2.1. Örnek CER Trafo Merkezi

## 2.2. AC ve DC Hücreler

İstasyonlarda ve depo bölgelerinde yer alan AC ve DC hücreleri, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı açısından kritik bir role sahiptir. AC hücreleri, alternatif akım formatında enerji aktarımı yaparak uzun mesafelerde düşük kayıplı iletim avantajı sunar. DC hücreleri ise, doğru akımın kararlılığı sayesinde özellikle enerji depolama sistemleri ve raylı sistemlerin beslemesinde tercih edilir. Her iki hücre tipi de enerji yönetiminin ihtiyaçlarına göre optimize edilerek, sistemlerin güvenli ve verimli çalışmasını destekler. Aynı zamanda, bu hücreler modern enerji altyapılarının temel taşlarını oluşturur. AC ve DC hücrelerinin entegrasyonu, farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmış esnek bir enerji yönetim yapısı sunar. Bu hücreler, enerji kaynaklarının verimli kullanımını artırırken, sistemlerin kesintisiz çalışmasını da mümkün kılar.

Şekil 2.2. Örnek AC ve DC Hücreler

## 2.3. Gerilim ve Akım Trafoları

Metro hatları gibi büyük elektrik sistemlerinde, enerji akışı ve güvenliği sağlamak için gerilim ve akım trafoları büyük önem taşır. Bu trafolar, metro hattında akım ve voltaj seviyelerinin izlenmesini, güvenli seviyelere çekilmesini ve hat üzerinde sürekli bir denetim yapılmasını sağlar. Gerilim trafoları metro enerji istasyonlarında, sinyalizasyon sistemlerinde ve enerji dağıtım noktalarında kullanılır. Bu trafolar sayesinde, enerji hatlarındaki gerilim değerleri güvenli ve hassas bir şekilde ölçülebilir. Akım trafoları, metro hatlarında geçen yüksek akım seviyesini ölçülebilir ve güvenli seviyelere indirir. Metro hatlarında akım dalgalanmaları yaşanabilir; akım trafoları, bu dalgalanmaların doğru bir şekilde izlenmesini sağlar. Genellikle metro enerji dağıtım istasyonlarında, ray hattında veya diğer güç transfer noktalarında kullanılır. Bu trafolar, özellikle ray hattındaki yüksek akımı koruma sistemlerine uygun seviyeye indirir. Ayrıca, metro sisteminin enerji tüketim analizi ve arıza tespiti süreçlerinde de kritik bir rol oynar. Modern akım ve gerilim trafoları, uzaktan izleme ve kontrol sistemleri ile entegre edilebilir, böylece enerji yönetim süreçlerini daha verimli hale getirir.

Şekil 2.3. Örnek Gerilim ve Akım Trafoları

## 2.4. Enerji Doğrultucu Panoları

Metro sistemlerinde enerji doğrultucu panoları, alternatif akımı (AC) doğru akıma (DC) dönüştüren panolardır. Metro hatları genellikle doğru akımla çalışır, çünkü DC güç iletimi, özellikle metro araçlarında motorların daha kararlı ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Enerji doğrultucu panolar, elektrik şebekesinden gelen yüksek gerilimli alternatif akımı (AC) alır ve bu akımı metro sisteminin ihtiyaç duyduğu doğru akıma (DC) dönüştürür. Bu dönüşüm, metro trenlerinin güvenli ve sabit bir enerji kaynağı ile beslenmesini sağlar. Ayrıca metro hatlarında doğrultucu panolar, akım dalgalanmalarını azaltır ve DC enerjinin daha kararlı bir şekilde iletilmesini sağlar. Bu sayede, metro araçları anlık voltaj değişimlerinden etkilenmeden düzenli bir akım alır. Bununla beraber enerji doğrultucu panoları, enerji dönüşümünü yaparak trenlerin güvenli çalışmasını sağlar. Doğrultucu panolar, genellikle metro sistemlerinin kritik noktalarında konumlandırılır ve bu sayede enerji kaynağı sürekliliği sağlanır. Modern enerji doğrultucu panoları, gelişmiş kontrol sistemleri ile donatılarak enerji tüketimini optimize eder ve arıza tespit süreçlerini hızlandırır. Ayrıca, enerji geri kazanımı ve enerji verimliliği gibi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, metro hatlarındaki enerji doğrultucu panoları, alternatif akımı doğru akıma çevirerek metro sisteminin ihtiyacı olan sürekli ve güvenli enerji akışını sağlar.

Şekil 2.4. Örnek Enerji Doğrultucu Panolar

## 2.5. Sinyalizasyon Sistemleri

Metro işletmelerindeki sinyalizasyon sistemleri, trenlerin güvenli, düzenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayan yüksek teknoloji ürünü altyapılardır. Bu sistemler, trenlerin zamanında hareket etmelerini, çakışmaları önlemelerini ve herhangi bir tehlike durumunda hızlıca müdahale edilmesini sağlar. Sinyalizasyon, trenlerin hızlarını kontrol etmek, istasyonlara güvenli şekilde ulaşmalarını sağlamak ve yolcu taşımacılığının kesintisiz devam etmesini temin etmek açısından büyük önem taşır. Sinyalizasyon Sistemleri çalışma sistemi olarak trenlerin hızını ve dur-kalk işlemlerini yöneterek hat üzerindeki güvenli hareketi sağlamaktadır. Bu sayede, trenler arasındaki güvenli takip mesafesi korunmaktadır. Otomatik tren koruma sistemi ile trenlerin ivmelenme ve frenleme reaksiyonlarını takip ve idare etmektedir. Aynı zamanda sinyalizasyon sistemleri, trenler ile kontrol merkezi arasında sürekli bir iletişim sağlayarak kumanda merkezinden gelen talimatları trenler üzerine iletmektedir. Metro Sistemlerindeki Sinyalizasyon Teknolojileri iki kategoride sınıflanabilir; Blok Tabanlı Sinyalizasyon: Metro hattı, belirli bloklara ayrılarak trenlerin yalnızca güvenli bloklarda ilerlemesine izin verir. Bu sistemde, trenlerin konumuna göre hareket kısıtlanır. CBTC (İletişim Tabanlı Tren Kontrolü): Daha modern bir sistem olan CBTC, trenlerin birbirleriyle ve merkezle kablosuz iletişim kurmasını sağlar. Bu sayede, tren aralıkları daha esnek bir şekilde ayarlanabilir ve sistem verimliliği artırılabilir.

Şekil 2.5. Örnek Sinyalizasyon Sistemleri

## 2.6. Katener Sistemleri

Katener sistemi, metro ve tren hatlarında elektrikli trenlerin enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan bir enerji iletim sistemidir. Bu sistem, trenlerin sürekli hareket ederken ihtiyaç duyduğu elektriği sağlar. Katener sisteminde, hattın üzerinde asılı duran bir dizi kablo bulunur ve bu kablolar trenin pantografına (tavanındaki enerji temas noktası) temas ederek enerjiyi trene iletir. Katener Sisteminin Temel Bileşenlerini, katener kabloları, pantograflar, destek ve izolasyon yapıları olarak tarif edebiliriz. Katener sistemi, enerji iletimini sağlamak için hattın üzerinde asılı duran bir ana kablo ve destek kablolarından oluşur. Bu kablolar, tren hareket ettikçe pantografla sürekli temas halinde kalarak kesintisiz enerji aktarımı yapar. Pantograf: Trenin tavanında bulunan pantograf, katener sistemine temas ederek enerjiyi alır ve trene iletir. Bu temas sayesinde tren, sürekli olarak elektrik alır ve kesintisiz bir şekilde hareket eder. Katener kabloları, trenin hareketine dayanacak şekilde gergin tutulur ve yalıtkan malzemelerle desteklenir. Böylece, kablolar güvenli bir yükseklikte sabit kalır ve enerji kesintisi yaşanmaz.

Genleşme Bölgesi Section İzolatör Fix Point

Şekil 2.6. Örnek Katener Sistemi

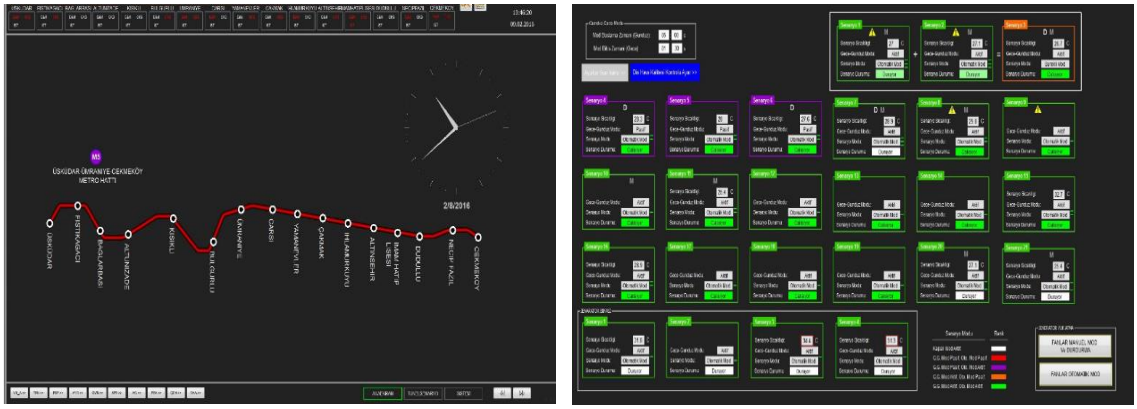
## 2.7. Haberleşme Sistemleri

Metro hatlarında haberleşme sistemi, trenlerin, istasyonların ve kontrol merkezinin birbirleriyle sürekli olarak iletişimde kalmasını sağlayan bir sistemdir. Bu sistem, yolcu güvenliğini artırmak, operasyonları verimli yönetmek ve olası acil durumlara hızlıca müdahale etmek için kritik bir role sahiptir. Metro haberleşme sistemi, sesli ve veri tabanlı iletişim kanallarından oluşur. Bu sistemlerin bileşenlerini ve çalışma sistemini kısaca açıklayacak olursak; Kontrol Merkezi İletişimi: Metro trenleri ve istasyonlar, merkezle sürekli veri ve ses iletişimi sağlar. Kontrol merkezi, trenlerin konumunu, hızını ve yolculuk programını izler ve gerektiğinde talimatlar gönderir. Sürücü-İstasyon İletişimi: Tren sürücüleri, istasyonlarla ve diğer sürücülerle iletişim kurarak yol durumu, gecikmeler veya beklenmedik durumlarla ilgili bilgi paylaşır. Bu iletişim sayesinde, trenler arasında güvenli bir mesafe korunur ve olası kazalar önlenir. Yolcu Bilgilendirme Sistemleri: İstasyonlarda ve trenlerde bulunan dijital ekranlar ve anons sistemleri, yolculara varış saatleri, güzergah değişiklikleri veya gecikmeler hakkında bilgi verir. Bu sistem, yolcu memnuniyetini artırır ve hat içindeki iletişimi güçlendirir.

Şekil 2.7. Örnek Haberleşme Sistemi

## 2.8. SCADA ve Uzaktan Kontrol Sistemleri

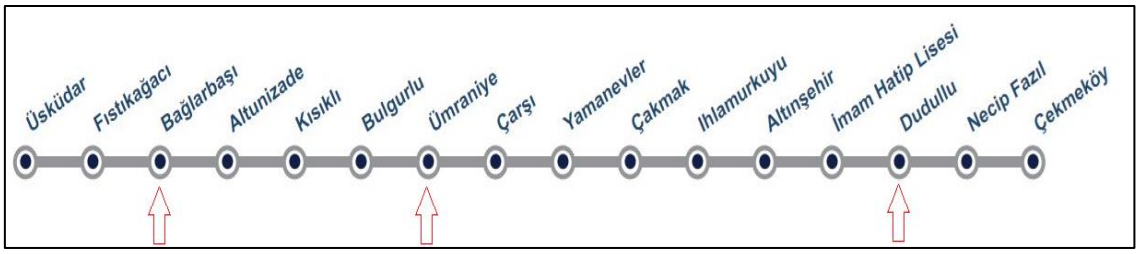
Metro hatlarında kullanılan SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ve uzaktan kontrol sistemleri, metro operasyonlarını izlemek, kontrol etmek ve yönetmek için kullanılan ileri teknoloji sistemleridir. Bu sistemler, hem metro hatları hem de ilgili altyapının güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde çalışmasını sağlar. SCADA, metro sistemlerinin tüm önemli parametrelerini izlemek ve kontrol etmek için kullanılan merkezi bir sistemdir. Bu sistem, enerji yönetimi, tren hareketlerini izleme, sinyalizasyon, hava koşulları gibi pek çok veriyi toplar ve kontrol merkezine ileterek operatörlere anlık bilgi sağlar. Uzaktan Kontrol Sistemleri ise, metro hatları üzerinde kritik ekipmanların ve cihazların yönetilmesini sağlar. Bu sistemler, tren hareketlerini, enerji sistemlerini ve diğer altyapıyı uzaktan denetlemeye olanak tanır. Bu sistemler, kontrol merkezinden, uzaktaki cihazlara ve ekipmanlara müdahale edebilme yeteneği sunar. Örneğin, metro hatlarındaki sinyalizasyon sistemlerini, enerji trafolarını veya katener sistemini uzaktan yönetmek ve hat üzerindeki sorunlara hızlıca çözüm getirmek mümkün olur.



Şekil 2.8. Örnek Kumanda Merkezi (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

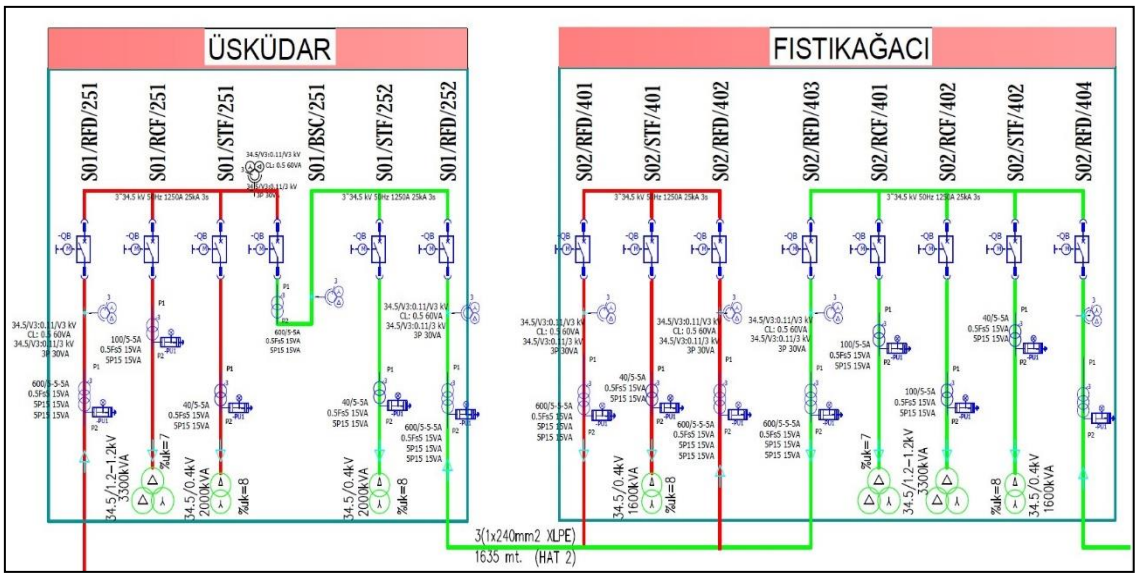
## 3. M5 METRO HATTI ELEKTRİFİKASYON BİLGİLERİ

M5 Metro hattı üzerinde 3 farklı noktadan, elektrik sağlayıcısı üzerinden enerji beslemesi sağlanmaktadır. Bu besleme noktaları; Bağlarbaşı TM, Ümraniye TM ve Dudullu TM merkezleridir, bu merkezler Şekil 3.1.' de gösterilmiştir.



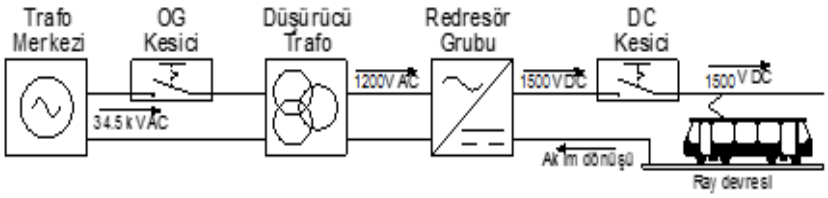

Şekil 3.1. M5 hattı Teiaş Besleme Noktaları (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro – Mekanik İşler Proje Raporu)

Doğru akım ile enerjisi tedarik edilen sistemlerde CER trafo merkezlerinde doğrultucular vasıtasıyla AC 34,5kV / 1200V CER trafolarından beslenmektedir (Ölmez ve Kılıç, 2020). Şekil 3.2. 'de M5 Hattına ait CER gücü tek hat şemasında da gösterildiği üzere, Teiaş merkezlerinden alınan enerji beslemeleri istasyonlara ait OG dağıtım sistemine giriş yapmaktadır. Şekil 3.2.' de Üsküdar ve Fıstıkağacı İstasyonları gösterilmiştir, hatta ait diğer istasyonlar da bu şekilde dizayn edilmiştir. Şekil 3.2. (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro – Mekanik İşler Proje Raporu).




Şekil 3.2. M5 Hattı OG Tek Hat Şeması (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro – Mekanik İşler Proje Raporu)

Şekil 3.2.' de görüldüğü üzere, bir Teiaş merkezinden iki ayrı trifaze orta gerilim beslemesi TGP panosundan istasyona giriş yapmaktadır. Daha sonra ayrılmış olan OG bara gruplarına RFD hücrelerinden enerji verilmektedir. İki ayrı RFD hücresinin arasında bulunan baradan ise iç ihtiyaç ve CER trafoları enerjilendirilmektedir. Bununla beraber iki ayrı istasyonu birbirine seri şekilde bağlayan, tünelden geçen OG kablolarına ise RFD kesicileri enerji sağlamaktadır. Trafodan gelen 34.500 Volt AC, düşürücü trafolardan geçerek 1200 Volt AC ye oradan da doğrultucular vasıtasıyla 1500 Volt DC ye çevrilir. 1500 Volt DC de trenin hareket etmesi için gerekli olan gerilim değeri olup katener vasıtası ile trene aktarılır. Katener ucu devrenin + ucunu, ray ise – ucunu temsil eder ve ray üzerinden redresörlere ulaşan akım ile devre kendini tamamlamış olur. Şekil 4.3; (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro- Mekanik İşler Proje Raporu).




Şekil 3.3. CER gücü sistemi enerji transfer şeması (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro- Mekanik İşler Proje Raporu)

Tablo 3.1. M5 Hattı Elektrifikasyon Ekipman Listesi

| **M5 HATTI ELEKTRİFİKASYON SİSTEM EKİPMANLARI** | **EKİPMAN SAYILARI** | **M5 HATTI ELEKTRİFİKASYON SİSTEM EKİPMANLARI** | **EKİPMAN SAYILARI** |
|---|---|---|---|
| OG Dağıtım Panosu | 138 | AG Ana Dağıtım Panosu | 376 |
| Yardımcı Servis Trafosu | 34 | AG Tali Dağıtım Panosu | 560 |
| Cer Trafosu | 18 | UPS Tali Dağıtım Panoları | 250 |
| DC Redresör Panoları | 36 | Tünel Priz Panoları | 600 |
| DC Negatif Dönüş Panoları | 10 | Şönt Reaktör Panoları | 38 |
| DC Giriş Fideri Panoları | 18 | BCB Panoları | 27 |
| DC Hat Fideri Panoları | 36 | Sulu Tip Aküler | 1590 |
| LBS Panoları | 66 | UPS Üniteleri | 73 |
| VLD Panoları | 17 | Kuru Tip Aküler | 4500 |
| Katener (KM) | 34 | Armatürler | 14800 |

Tablo 3.2. M5 Metro Hattı 34,5 kV OG Trafo Tablosu (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro- Mekanik İşler Proje Raporu)

| **İstasyonlar** | **OG Yardımcı Trafolar** | **OG CER Trafoları** | **Teknik Hacim Trafoları** |
|---|---|---|---|
| 1- Üsküdar | 2 x 2 MVA | 1 x 3,3 MVA | - |
| 2- Fıstıkağacı | 2 x 1,6 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| 3- Bağlarbaşı | 2 x 1,6 MVA | - | - |
| 4- Altunizade | 2 x 2 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| 5- Kısıklı | 2 x 2 MVA | - | - |
| 6- Bulgurlu | 2 x 1,6 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| 7- Ümraniye | 2 x 1,6 MVA | - | - |
| 8- Çarşı | 2 x 1,6 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| 9- Yamanevler | 2 x 1,6 MVA | - | - |
| 10- Çakmak | 2 x 1,6 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| 11- Ihlamurkuyu | 2 x 1,6 MVA | - | - |
| 12- Altınşehir | 2 x 1,6 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| 13- Lise | 2 x 2 MVA | - | - |
| 14- Dudullu | 2 x 2,5 MVA | 2 x 3,3 MVA | - |
| Dudullu Depo Sahası | - | 2 x 3,3 MVA | 2 x 0,63 MVA |
| 15- Necip Fazıl | 2 x 2 MVA | - | - |
| 16- Çekmeköy | 2 x 2 MVA | 1 x 3,3 MVA | - |
| Dudullu – Gen | 3 x 2 MVA | - | - |
| **Toplam Güç** | **63,8 MVA** | **59,4 MVA** | **1,26 MVA** |
| **Kurulu Trafo Gücü** | | | **124,46 MVA** |

Tabloda görüldüğü üzere, M5 metro hattı güzergahında her istasyonda 2'şer adet Orta Gerilim Yardımcı Trafoları ve 2'şer adet Orta Gerilim CER Trafoları bulunurken, Dudullu depo sahasında ayrıca 2 adet Teknik Hacim Trafoları yer almaktadır. Bu trafo gruplarının her biri, sistemin kesintisiz çalışmasını sağlamak amacıyla birbirini yedekleyecek şekilde tasarlanmış ve kurulmuştur. Yedekli yapı sayesinde, herhangi bir trafo grubunun devre dışı kalması durumunda diğer grup devreye girerek enerji arzında süreklilik sağlamakta ve sistem performansını düşürmeden işletmeye devam edilmektedir.

# 4. METRO DEPREM OLAYLARI VE M5 HATTI DEPREM SENARYOLARI

## 4.1. Metrolarda Deprem Durumunda Hatların Güvenliği ve Enerji Sürekliliği

Deprem anlarında metro hatlarının güvenliği ve enerji sürekliliği, yolcu tahliyesi ve operasyonel kontrol açısından kritik öneme sahiptir. Hatlarda meydana gelebilecek yapısal hasarların önlenmesi için deprem sensörleri ve erken uyarı sistemleri entegre edilmelidir. Enerji sürekliliği, acil durum jeneratörleriyle sağlanarak istasyon içi aydınlatma, haberleşme ve tahliye sistemlerinin kesintisiz çalışması garanti altına alınmalıdır. SCADA ve otomasyon sistemleri ile merkezi kontrol sağlanarak, operasyonel kararlar hızlı ve etkin şekilde alınabilir. Bu yaklaşımlar, metro sistemlerinin afetlere dirençli hale getirilmesinde temel rol oynar.

### 4.1.1. Deprem Riski ve Metro Sistemleri Üzerindeki Etkisi

Depremler, Türkiye gibi aktif fay hatları üzerinde bulunan ülkelerde ciddi güvenlik riskleri oluşturur. Metro hatları, yoğun nüfuslu bölgelerde hem hızlı hem de güvenli bir ulaşım imkânı sağladığından, deprem anında ve sonrasında işleyişlerini sürdürebilmeleri toplumsal güvenlik açısından önem arz etmektedir. Herhangi bir deprem olasılığına karşı yapılan hesaplamalar ve tasarım analizleri, yer altı ve yer üstü yapılarının tasarım felsefesi genel itibariyle birbirinden farklı şekildedir (Gao, 2024). Metro işletmelerinin depreme dayanıklılığı, özellikle zemin hareketleri nedeniyle oluşabilecek ivme ve basınç gibi etkileri absorbe eden özel tasarımlarla sağlanır. Ray, tünel ve istasyon yapılarında kullanılan beton, çelik ve diğer dayanıklı malzemeler, yüksek mukavemetli yapılar oluşturarak deprem anında yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olur. Tüm bunların yanında depremler, yer altı yapılarında özellikle de zemin hareketlerine bağlı olarak ciddi yapısal strese neden olabilir. Metro sistemlerinde de bu riskleri yönetebilmek için kapsamlı bir mühendislik tasarımı ve güvenlik önlemleri bir dizi plan dâhilinde gerçekleştirilmektedir. Deprem sırasında zemin yüzeyinde meydana gelen yatay ve dikey hareketler, yer altındaki metro tünelleri ve istasyonlar üzerinde yüksek basınç ve gerilimler oluşturur (Huang, 2024). Bu hareketler, metro yapılarında üzerine aldığı ivme ve enerji ile birleşerek deformasyon riski doğurmaktadır. Metro yapılarının bu basınç ve gerilimleri süspanse edebilmesi için tünellerde özel esnek bağlantı elemanları, destek yapıları ve güçlü beton karışımları kullanılmaktadır. Bu önlemler, deprem dalgalarının

tünel boyunca yayılmasını yavaşlatarak, yapısal hasarın önüne geçmeyi hedeflemektedir. Metro sistemlerinin depreme dayanıklılığı, kullanılan malzemeler ve modern teknolojilerle desteklenmektedir. Yüksek mukavemetli çelik, dayanıklı beton türleri ve elastik bağlantı elemanları, metro sistemlerinin dayanıklılığını artırmada önemli bir rol oynar. Örnek olarak bazı metropollerde kullanılan yenilikçi metro tünel yapım teknikleri zeminin etkilerini dengeleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu yöntemlerde, depreme dayanıklı çelik kafes sistemleri ve titreşimi azaltan izolasyon tabakaları gibi yenilikçi yapılar tasarlanmaktadır. Özellikle sismik yalıtım teknikleri sayesinde deprem sırasında oluşabilecek yer hareketleri absorbe edilerek tünellerin hareket esnekliği artırılır. Tünel sistemlerinde kullanılan yatay ve dikey destekler, zemin dalgalarının tünel içindeki enerjisini yayarak tünelin çeşitli noktalarında yoğunlaşan stresi azaltır. Tüm bunların yanında metro hattının inşa edildiği zemin ve alanlarda bu doğrultuda etkileşimde önem arz etmektedir. Yumuşak topraklarda yapılan metro inşaatları, daha sert zeminlere göre daha fazla titreşim ve ivme hareketi ile karşılaşır. Bu durum, metro sistemlerinin çevresindeki zemine uygun şekilde güçlendirilmesi gerekliliğini doğurur. Gelişen teknoloji ile bazı metro sistemlerinde depreme dayanıklı enerjiyi absorbe eden sismik izolasyon ve amortisör sistemleri kullanılır. Bu sistemler, deprem sırasında raylar ve tüneller üzerinde oluşabilecek hareketleri hafifletir. Örneğin, sismik sistem izolasyon cihazları, deprem dalgalarının raylara doğrudan iletilmesini engelleyerek enerji yayılımını kontrol eder. Aynı zamanda, tünel içindeki destek noktalarında yer alan amortisörler, deprem dalgalarının ani hareketlerinin tünel boyunca yayılmasını azaltır (Tsinidis, 2022). Bu önlemler, depremin yıkıcı etkilerinin metro hattına doğrudan zarar vermesini önler.

### 4.1.2. Metro Hatlarında Deprem Güvenlik Standartları

Metro sistemlerinin depreme karşı dayanıklı olması, başta yolcuların güvenliğini sağlamak ve operasyonların devamlılığını korumak açısından hayati önem taşımaktadır. Türkiye'deki metro hatları, ulusal ve uluslararası deprem güvenlik standartlarına uygun olarak inşa edilir. Bu standartlar, metro sistemlerinin tasarım aşamasından işletme sürecine kadar birçok alanda rehber niteliğindedir. Türkiye'de metro sistemlerinin depreme dayanıklılığı, Türk Deprem Yönetmeliği (TDY) gibi yerel standartlar ve Avrupa'da yaygın olan Eurocode 8 gibi uluslararası standartlarla güvence altına alınarak

tesis edilmektedir. Bu standartlar, zemin yapısının değerlendirilmesinden yapı malzemelerinin seçimine kadar ayrıntılı kriterler içerir. Örneğin, tünellerin ve istasyonların inşasında kullanılan malzemeler, belirli esneklik ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak zorundadır. TDY, her bir metro bileşeni için gereken mukavemet seviyesini belirleyerek tünel yapılarının deprem sırasında esneyebilmesine olanak tanıyan teknikler sunar. Metro sistemlerinde uygulanan güçlendirme teknikleri, depremin etkilerini absorbe etmek ve yapısal bütünlüğü korumak için geliştirilmiştir. Tünellerde, çevreleyen toprağın basıncını dengeleyen çelik destek yapıları ve esnek bağlantılar kullanılır. Bu destekler, depremin tünel boyunca yayılacak titreşimlerini sönümlemeye yardımcı olur. Ayrıca, metro tünellerinin inşasında uygulanan "çift katmanlı beton kaplama" gibi teknikler, depremin doğrudan etkisini azaltarak yapının sağlam kalmasını sağlar (Huang, 2024). Bu kaplama sistemlerinde, iç ve dış katman arasında bir yalıtım tabakası bulunur ve bu sayede tünelin bütünlüğü korunur. Ayrıca depremler sonrasında raylar, tüneller, istasyonlar ve acil çıkışlar gibi kritik altyapılar detaylı incelemelerden geçirilir. Bu incelemelerde, deprem sırasında meydana gelen gerilimlerin yapısal elemanlarda herhangi bir hasara yol açıp açmadığı kontrol edilir. Hasar tespit edilmesi durumunda, onarımlar hızla başlatılır ve belirlenen güvenlik standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilir. Düzenli bakım ve onarımlar, metro sisteminin depremlere karşı uzun vadede dayanıklı kalmasına yardımcı olur.

### 4.1.3. Erken Uyarı Sistemleri ve Acil Durum Protokolleri

Metro sistemlerinde, deprem gibi ani afetlerde yolcu güvenliğini sağlamak için hızlı ve etkili müdahale büyük önem taşır. Deprem anında metro sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışabilmesi için erken uyarı sistemleri ve acil durum protokollerinin sorunsuz bir şekilde çalışması gerekmektedir. Bundan hareketle özellikle deprem öncesi için sismik sarsıntıların hissedilmesi ve bu erken uyarı sistemlerinin erken haber verme kabiliyetleri ile yolcu tahliye, koruma ve kollama reaksiyonları gerçekleştirilebilir (Wu ve Kanamori, 2008). Türkiye'de Kandilli Rasathanesi ve AFAD gibi deprem izleme merkezleri tarafından sağlanan erken uyarı sinyalleri, metro yönetim sistemlerine anında iletilir. Deprem dalgaları metro hatlarına ulaşmadan önce bu sinyaller ile deprem bilgisi otomatik olarak alınır ve sistemde anında önlemler alınır. Bu uyarılar sayesinde, raylarda veya tünel yapılarında oluşabilecek hasar ve yolcuların güvende olmaması gibi riskler önceden

minimize edilir. Erken uyarı sistemiyle birlikte uygulanan acil durum protokolleri, deprem anında yolcu güvenliğini sağlamak için ayrıntılı bir tahliye planını içerir. Metro çalışanları, bu tür durumlarda yolculara rehberlik etmek üzere düzenli olarak eğitilir ve tatbikatlarla pratik yaparlar. Deprem anında ve sonrasında, metro istasyonlarında görevli personel, yolcuları güvenli çıkış noktalarına yönlendirir ve tahliye işlemini koordine eder. Aynı zamanda, otomatik acil durum anonsları ve yönlendirme ışıkları, yolculara güvenli çıkış noktalarını ve acil çıkış yollarını göstererek tahliyeyi kolaylaştırır. Erken uyarı sistemleri ve acil durum protokolleri, metro sistemlerinde deprem gibi acil durumlarda yolcuların güvenliğini sağlamak için olmazsa olmaz önlemler arasındadır. ATS (Otomatik Tren Durdurma Sistemi) sistemleri, tahliye planları, acil durum güç kaynakları ve dijital izleme sistemleri sayesinde, deprem anında ve sonrasında hızlı, güvenli ve etkili bir şekilde müdahale edilir. Bu önlemler, metro hatlarının yolcu konforuna ve güvenliğine etkisi oldukça büyüktür.

### 4.1.4. Enerji Sürekliliği ve Acil Durum Güç Sistemlerinin Rolü

Metro hatlarında enerji sürekliliği, yolcu güvenliği ve hizmetin aksamadan devam edebilmesi için kritik bir faktördür. Elektrik kesintileri, özellikle deprem gibi doğal afetler sırasında yaşandığında, metro sisteminde ciddi operasyonel zorluklara yol açabilir. Bu nedenle, metro hatlarında acil durum güç sistemleri devreye alınarak, enerji sürekliliği sağlanır. Bu sistemler, elektrik kesintisi durumunda devreye girerek metro hattının belirli işlevlerinin devam etmesine olanak tanır ve yolcuların güvenliğini sağlar. Bu anlamda acil durum güç sistemleri, metro hattının kritik unsurlarına enerji sağlayacak kapasiteye sahip jeneratörlerden ve kesintisiz güç kaynağı olan UPS sistemlerinden oluşur. Bu sistemler, istasyon aydınlatması, havalandırma sistemleri, tünel aydınlatma sistemleri, ve acil durum yolcu tahliyesine yönelik anonslar, flaşörler vb. sistemleri de besleyebilmektedir. Ayrıca, sinyalizasyon ve iletişim sistemleri için gerekli enerjiyi sağlayarak operasyonel yönetimin sürekliliğini sağlar. Acil durum güç sistemleri, enerji kesintisinin yaşandığı anda hızlı bir şekilde devreye girerek, metro hattının kapalı bir alanda faaliyet gösteren ve enerjinin kritik önem taşıdığı bir ortamda bile güvenli işleyişini mümkün kılar. Acil durum jeneratörleri ve kesintisiz güç kaynağı olan UPS sistemleri, enerji sürekliliğini sağlamak için metro istasyonlarında hazır bulundurulur. Jeneratörler, uzun süreli elektrik kesintilerinde bile enerji sağlayabilen güçlü motorlarla

donatılmıştır. Genellikle dizel veya doğalgazla çalışan bu jeneratörler, elektrik kesildiğinde otomatik olarak devreye girer ve metro hattındaki kritik bileşenlere enerji aktarır. Kesintisiz güç kaynağı olan UPS sistemleri ise kısa süreli kesintilerde devreye girer ve daha hızlı bir enerji aktarımı sağlar ancak tabi bu sistemler de belirli bir süre ve belirli ekipmanların enerjilerini sağlayabilecek kapasitededirler. Acil durum güç sistemleri, deprem gibi acil durumlarda istasyonların aydınlatma ve havalandırma sistemlerine enerji sağlamak için kritik bir rol oynar. Metro tünelleri ve istasyonları, doğal ışık ve havalandırmadan yoksun olduğu için, bu sistemlerin çalışır durumda kalması önemlidir. Elektrik kesintisi durumunda acil durum jeneratörleri devreye girerek istasyon aydınlatmasını ve havalandırmayı aktif tutar. Bu durum, yolcuların panik yapmasını önleyerek, tahliye işlemlerinin güvenli ve sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesine katkı sağlar. Özellikle havalandırma sistemleri, tünel ve istasyon içerisindeki hava kalitesini koruyarak yolcuların güvenli bir ortamda bulunmasını sağlar. Enerji sürekliliği, metro sisteminde sinyalizasyon ve iletişim sistemleri için de büyük önem taşır. Sinyalizasyon sistemi, trenlerin güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlayan temel bileşendir; bu sistemde yaşanacak bir kesinti, trenlerin güvenli mesafelerini korumasını engelleyebilir ve kazalara yol açabilir. Bu nedenle, acil durum güç sistemleri, sinyalizasyon ağının enerji ihtiyacını karşılayarak trenlerin kontrollü bir şekilde hareket etmesine olanak tanır. Aynı şekilde, iletişim sistemleri de acil durum gücünden faydalanarak personelin hızlı iletişim kurmasını ve yolcuların bilgilendirilmesini sağlar. Bu sayede, deprem veya başka bir afet durumunda trenlerin güvenli bir şekilde durdurulması ve yolcuların bilgilendirilmesi sağlanır. Acil durum jeneratörlerinin güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için düzenli bakım ve test işlemleri büyük önem taşır. Metro hatlarındaki jeneratörlerin periyodik olarak kontrol edilmesi, arızaların önceden tespit edilmesini ve acil durumda sorunsuz bir şekilde devreye girmesini sağlar. Bakım işlemleri, jeneratörlerin yakıt seviyelerinin, motor durumlarının ve bağlantıların düzenli olarak incelenmesini içerir. Bu testler sayesinde jeneratörlerin performansı doğrulanır ve enerji kesintisi anında güvenilir bir şekilde çalışmaları sağlanır. Bu periyodik bakım süreçleri, enerji sürekliliğinin teminatıdır ve metro sisteminin her an hazırlıklı olmasını sağlar. Ayrıca, bakım sırasında jeneratörün soğutma sistemi, yağ seviyesi ve akü durumu da detaylı şekilde kontrol edilmelidir. Bu kapsamlı denetimler sayesinde, jeneratörlerin hem teknik hem de operasyonel açıdan her zaman çalışmaya hazır olması garanti altına alınır.

### 4.1.5. Deprem Sonrası İnceleme, Bakım ve Onarım Çalışmaları

Deprem sonrası metro hatlarının güvenli bir şekilde çalışmaya devam edebilmesi, kapsamlı inceleme, bakım ve onarım çalışmalarının hızlıca yapılmasını gerektirir. Metro altyapısı, deprem sırasında çeşitli sarsıntılara maruz kalır ve raylarda, istasyon yapılarında, sinyalizasyon ve elektrik sistemlerinde hasar meydana gelebilir. Bu nedenle, deprem sonrasında güvenliği sağlamak ve potansiyel riskleri önlemek adına metro hatlarında acil bir müdahale süreci başlatılır (Tan, 2024). Bu süreç, inceleme, bakım ve gerekli durumlarda onarım çalışmalarını içerir. Depremin ardından, metro sisteminin güvenliğini sağlamak için hızlı müdahale ekipleri görevlendirilir. Bu ekipler, rayların, tünellerin, istasyon yapılarının ve teknik altyapının durumunu değerlendirmek üzere derhal incelemelere başlar. Hasar tespit çalışmaları, öncelikle yolcuların sıkça kullandığı istasyonlarda ve kritik öneme sahip olan ray hatlarında yapılır. Rayların ve altyapının gözle görülür şekilde zarar görmesi durumunda, sistemin güvenli bir şekilde çalışması sağlanana kadar ilgili hat işletmeye kapatılır. Tüm incelemeler, metro sistemindeki güvenlik standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir ve detaylı bir hasar raporu hazırlanarak onarım ekiplerine iletilir. Deprem sonrası rayların ve tünellerin güvenliğini sağlamak için detaylı yapısal incelemeler yapılır. Ray hatları, sarsıntıların etkisiyle kayma, eğilme veya çatlama gibi hasarlara uğrayabilir. Bu tür durumlarda rayların yeniden hizalanması veya gerektiğinde değişim işlemleri uygulanır. Tünellerde ise çatlak oluşumu veya destek yapılarında zayıflama riski göz önüne alınarak kapsamlı bir inceleme yapılır. Beton yapılar ve tünel duvarları dikkatle kontrol edilir ve yapısal zayıflık tespit edilirse güçlendirme çalışmaları başlatılır. Bu incelemeler, metro hattının tekrar güvenli bir şekilde çalışabilmesi için önemlidir. Deprem sonrasında sinyalizasyon sistemlerinin düzgün çalışıp çalışmadığı kontrol edilir. Sinyalizasyon, trenlerin güvenli mesafelerde seyretmesini sağlayan kritik bir sistemdir; bu nedenle sistemin deprem sonrası arızalanması kazalara yol açabilir. Elektrik sistemlerinin de depremden etkilenme olasılığı yüksektir, özellikle kablolama veya enerji transfer hatlarında meydana gelen herhangi bir hasar, metro sisteminin güvenilirliğini tehdit edebilir. Bu kapsamda, elektrik panoları, sinyalizasyon cihazları, iletişim sistemleri ve diğer teknik bileşenlerin ayrıntılı bir incelemesi yapılır. Gerektiğinde bu sistemlerde tamir ve bakım işlemleri gerçekleştirilir. Deprem sonrası yolcu güvenliğini sağlamak adına istasyonlardaki acil çıkış kapıları ve tahliye yolları kontrol edilir. Sarsıntı esnasında bu çıkış yollarının hasar

görmüş olması, sonraki bir acil durumda yolcuların güvenli şekilde tahliye edilmesini zorlaştırabilir. Bu nedenle, acil durum çıkışlarının sağlam olduğundan emin olunur ve gerektiğinde onarım yapılır. Acil çıkış tabelaları, yönlendirme levhaları ve ışıklandırma sistemleri de bu kapsamda incelenir. Bu denetimlerle, olası bir ikinci deprem veya acil durumda tahliye sürecinin sorunsuz bir şekilde işlemesi sağlanır. Depremin ardından tespit edilen yapısal zayıflıklar için güçlendirme çalışmaları başlatılır. Raylarda ve tünellerde meydana gelen hasarlar, betonarme yapıların yeniden sağlamlaştırılması veya çelik desteklerle güçlendirilmesiyle giderilir. Özellikle eski yapılarda, zamanla dayanıklılığı azalmış alanlar için güncel teknolojiler kullanılarak güçlendirme çalışmaları yapılır. Bu sayede, olası bir sonraki depremde metro sisteminin daha dayanıklı olması sağlanır. Güçlendirme çalışmaları, yalnızca mevcut hasarların onarılmasını değil, aynı zamanda gelecekte benzer afetlere karşı dayanıklılığı artırmayı hedefler. Deprem sonrası güvenlik önlemlerinin etkinliğini artırmak için periyodik incelemeler ve tatbikatlar yapılır. Rayların, istasyonların ve tünellerin düzenli aralıklarla kontrol edilmesi, olası risklerin önceden tespit edilmesini sağlar. Ayrıca, metro çalışanları için düzenlenen deprem tatbikatları, acil durumlara daha hızlı yanıt verilmesini mümkün kılar. Acil durum jeneratörlerinin güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için düzenli bakım ve test işlemleri büyük önem taşır. Metro hatlarındaki jeneratörlerin periyodik olarak kontrol edilmesi, arızaların önceden tespit edilmesini ve acil durumda sorunsuz bir şekilde devreye girmesini sağlar. Bakım işlemleri, jeneratörlerin yakıt seviyelerinin, motor durumlarının ve bağlantıların düzenli olarak incelenmesini içerir. Bu testler sayesinde jeneratörlerin performansı doğrulanır ve enerji kesintisi anında güvenilir bir şekilde çalışmaları sağlanır. Bu periyodik bakım süreçleri, enerji sürekliliğinin teminatıdır ve metro sisteminin her an hazırlıklı olmasını sağlar. Ayrıca, bakım sırasında jeneratörün soğutma sistemi, yağ seviyesi ve akü durumu da detaylı şekilde kontrol edilmelidir. Bu kapsamlı denetimler sayesinde, jeneratörlerin hem teknik hem de operasyonel açıdan her zaman çalışmaya hazır olması garanti altına alınır. Bu sayede, afet sonrası ortaya çıkabilecek aksaklıkların en kısa sürede giderilmesi mümkün olur ve hizmet sürekliliği sağlanır. Tüm bu çalışmalar, metro sistemlerinin sadece normal şartlarda değil, olağanüstü durumlarda da güvenli ve etkin bir şekilde çalışmasını garanti eder. Jeneratör sistemlerinin uzaktan izleme ve erken uyarı sistemleri ile desteklenmesi, potansiyel arızaların henüz gerçekleşmeden fark edilmesini sağlar.

## 4.2. Dünya Üzerinde Yaşanan Deprem Olayları ve Analizleri

Dünya üzerinde yaşanan depremler neticesinde birçok Metro hattı hasar görmüş veya Acil Durum tahliye süreçleri ile karşı karşıya kalmıştır. Aşağıda bu bağlamda Acil Durum Tahliye süreçlerine maruz kalan birkaç örnek deprem hadisesine yer verilmiştir.

### 4.2.1. Japonya Töhoku Depremi ve Metro İşletmelerine Etkisi

11 Mart 2011'de Japonya'nın kuzeydoğusunda gerçekleşen Töhoku depremi, günümüze kadar dünya tarihinin en yıkıcı ve hasarı en büyük noktalara ulaşan doğal afetlerinden biri olarak anılmaktadır. Richter ölçeği olarak 9.1 büyüklüğündeki bu felaket, yalnızca büyük bir insan kaybına ve altyapı tahribatına yol açmakla kalmamış, aynı zamanda Tokyo'nun ulaşım sistemlerini, özellikle de metro işletmelerini doğrudan etkilemiştir (Ozawa, 2012). Depremin büyüklüğü, başkent Tokyo'nun yer altı ulaşımını ciddi şekilde tehdit etmiş olsa da, Tokyo Metro' sunun sağlam altyapısı, oluşabilecek herhangi bir deprem olayına hazırlıklı olmaları ve hızlı acil durum planları ve reaksiyonları ile büyük ölçüde riski yönetebilir bir süreç geçirmiştir. Bu olay, ulaşım güvenliği ve sismik dayanıklılık açısından birçok ders çıkarmaya yetmiş ve tüm ülkece ulaşım sistemlerinin aksaması ile nasıl bir kaos ortamı oluştuğuna birebir tanık olmuşlardır. Deprem olayının yaşandığı an itibari ile tünellerde ve istasyonlarda binlerce insan birikimi olması, haliyle bir panik ortamı oluşmasına neden olmuştur. Ancak, sistematik bir şekilde acil durum süreçlerini yönetebilme kabiliyetine sahip alanlarda sürecin kontrol altına alındığını söylemek mümkündür. Depremin hemen ardından, Tokyo Metro ağı, gelişmiş sismik sensörlerle donatılmış altyapısı sayesinde ilk sarsıntıları hızla tespit etti. Bu sensörler, sarsıntının büyüklüğünü ve türünü doğrular doğrulamaz, tüm metro hatlarına yayılan bir güvenlik önlemi olarak trenlere derhal durdurma komutu gönderdi. Otomatik güvenlik sistemleri, trenlerin hızla durmasını sağladı ve bu sayede raydan çıkma, çarpışma gibi olası kazalar engellendi. Sarsıntı esnasında metro hatlarındaki trenlerin hareketliliği, potansiyel olarak büyük riskler yaratabilecekken, bu otomatik durdurma, kazaların önlenmesinde kritik bir rol oynadı. Tokyo'nun metro ağı, büyüklüğü ve hat çoğunluğu açısından oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğundan özellikle yer altındaki tünellerde ve yüksek raylardaki trenlerin derhal durdurulması daha büyük can ve mal kaybına engel olmuştu (Liu ve Diğ., 2014). Bu sayede hem yolcuların güvenliği sağlandı hem de altyapının daha fazla hasar görmesinin önüne geçildi. Bu durum, Tokyo Metrosu'nun felakete karşı

hazırlıklı olduğunu ve teknolojik sistemler ile alt yapı ağını geliştirdiğini göstermektedir. Trenlerin durmasının ardından, en büyük zorluklardan biri, binlerce yolcunun güvenli bir şekilde tahliye edilmesiydi. Yer altındaki tünellerde ve yüksek raylardaki trenlerde mahsur kalan yolcular, depremin yarattığı ani sarsıntı sonrası tehlikede kaldılar. Karanlık tünellerde ilerlemek zorunda kalan ve sıkışık alanlarda kalan yolcular, acil durum prosedürleri sayesinde hızlıca tahliye edildi. Acil durum aydınlatmaları, haritalar ve iletişim sistemleri etkinleştirilerek, yolcuların en yakın çıkış noktalarına yönlendirilmesi sağlandı. Tokyo Metro personeli, eğitimli ve profesyonel müdahaleleriyle bu süreçte önemli bir rol oynadı. Personeller, her bir yolcuyu dikkatlice yönlendirerek, stresli bir ortamda bile güvenliği sağladı. Özellikle karanlık ve yoğun kalabalıkların bulunduğu tünellerde, acil durum haritalarının ve çıkış noktalarının açıkça işaretlenmiş olması, tahliye işleminin hızlı ve düzenli bir şekilde yapılmasına olanak tanıdı. Tüm bu koordinasyon yolcuların güvenli bir şekilde tahliye edilmesini sağladı. Tokyo Metrosu, depreme karşı son derece dayanıklı bir yapıda olmasına rağmen, depremin büyüklüğü bazı altyapı unsurlarında hasara yol açtı. Özellikle bazı tünellerde ve istasyon binalarında çatlaklar ve küçük yapısal hasarlar meydana geldi. Ancak bu tür hasarlar, Tokyo Metrosu'nun dayanıklılığını test etmek için bir fırsat oldu. Deprem sonrası yapılan güvenlik değerlendirmeleri kapsamında bazı hatlar geçici olarak kapatıldı ve detaylı denetimler gerçekleştirildi. Bu denetimler, yapısal zayıflıkları tespit etmek ve olası tehlikeleri ortadan kaldırmak amacıyla büyük bir özenle yapıldı (Koshimura ve Diğ., 2013). Bu süreç, gecikmelere, istasyon kapanmalarına ve sınırlı hizmete yol açtı; ancak, bu tür önlemler yolcuların uzun vadede güvenliğini sağlamak için gerekliydi. Güvenlik kontrolleri tamamlandıktan sonra, metro hatları kademeli olarak yeniden faaliyete geçti ve Tokyo Metrosu hızla normale dönmeye başladı. Bu gecikmeler, sistemin güvenliği için kritik bir adım olarak değerlendirildi. Tokyo Metrosu, deprem sonrası hızlı bir şekilde toparlanmayı başardı. İlk sarsıntıların ardından, altyapıdaki hasarları ve sistemin güvenliğini değerlendiren ekipler hızla çalışmaya başladı. İlk birkaç saat içinde bazı metro hatları sınırlı kapasiteyle yeniden faaliyete geçti. Ancak, tam normalleşme süreci birkaç gün sürdü. Bu süre zarfında, Tokyo Metrosu güvenlik değerlendirmeleri yaparak, yolcular için risk oluşturabilecek tüm yapısal sorunları giderdi. Bu süreç, metro ağının dayanıklılığını ve kriz yönetimindeki etkinliğini bir kez daha gözler önüne serdi. 2011 Töhoku depremi, sadece Japonya için değil, dünya genelinde ulaşım altyapıları için

önemli dersler çıkarılmasına vesile oldu. Tokyo Metrosu'nun bu kriz sırasında sergilediği performans, altyapı tasarımında sismik dayanıklılığın ne denli kritik olduğunu bir kez daha ortaya koydu. Ayrıca, otomatik tahliye sistemlerinin ve personel eğitimlerinin büyük ölçekli bir deprem olayında ne kadar önemli olduğu açıkça görüldü. Bu tür felaketler karşısında hızlı müdahale, sağlam altyapı ve iyi eğitimli personellerin, yolcu güvenliğini sağlamak için ne denli önemli olduğu bir kez daha anlaşılmış oldu. Tokyo'nun bu deneyimi, diğer şehirler için önemli bir model oluşturmuş ve dünya çapında ulaşım güvenliği konusunda önemli değişimlerin ve iyileştirmelerin önünü açmıştır. Ayrıca, Tokyo Metrosu'nun felaket sonrası toparlanma süreci, tüm dünya için bir örnek teşkil etmekle beraber, gelecekteki büyük felaketlerde alınacak önlemler için bir referans noktası olmuştur.

### 4.2.2. Meksika Puebla Depremi ve Metro İşletmelerine Etkisi

19 Eylül 2017'de gerçekleşen 7.1 büyüklüğündeki deprem, Mexico City'yi sallayarak şehirdeki binalara, köprülere ve yollar gibi kritik altyapıya ciddi zararlar verdi. Depremin, 1985 yılında şehri büyük bir yıkıma uğratan depremin yıl dönümünde gerçekleşmesi ise ayrı bir endişe kaynağı oldu (Alberto, 2018). Mexico City halkı, her yıl yapılan deprem tatbikatlarına aşinaydı, dolayısıyla metro ve diğer ulaşım sistemleri, bu tür felaketler için hazırlıklıydı. Deprem tüm acil durum tahliye süreçleri devreye alındı ve metro sisteminde geniş çaplı bir tahliye süreci başlatıldı. Deprem sırasında, metro istasyonlarında ve trenlerde bulunan yolcular güvenli bir şekilde tahliye edildi. Bu tahliye süreci oldukça hızlı ve organize bir şekilde yürütüldü. Metro personelleri, yolcuları bilinçli bir şekilde yönlendirdi ve kalabalığı düzenli bir şekilde istasyonlardan dışarı çıkardı. Trende olan yolcular için tahliye prosesleri devreye alındı. Yolcuların metro tünelleri boyunca yürümeleri gerektiğinde ise görevliler rehberlik etti ve acil durum ekipleri yolculara eşlik etti. Depremden sonra metro istasyonlarının tamamında yapısal değerlendirmeler yapıldı; bu değerlendirmelerde herhangi bir çatlak, zayıflık veya kayma olup olmadığı kontrol edildi. Böylece metro hatlarının olası yeni bir sarsıntıda yolcular için risk oluşturmaması sağlanmaya çalışıldı. Bu tür tahliye operasyonlarında sismik dayanıklılık stratejileri ve acil durum prosedürleri büyük önem taşıyor. 2017'deki deprem sırasında da bu teknolojiler hızlıca devreye girerek olası çarpışmaları veya raydan çıkmaları önlemeye yardımcı oldu. Ayrıca, şehir genelinde güvenli toplanma alanları önceden belirlenmiş

olduğu için, tahliye edilen yolcular bu alanlara yönlendirildi ve şehirdeki diğer acil durum ekipleri, metrodan tahliye edilen insanlara destek sağladı. Depremden hemen sonra metro çalışanlarının acil durum talimatlarına uygun olarak her istasyonda yer aldığı, kalabalığı düzenli bir şekilde yönlendirdiği ve güvenliği sağladığı görüldü. Bu operasyon, metro sisteminde çalışan personelin afet anında hızlı hareket etme yeteneğini ve eğitiminin ne kadar etkili olduğunu gösterdi. Mexico City yönetimi, 1985'ten bu yana sismik risklere karşı metro altyapısının dayanıklılığını artırmak amacıyla önemli yatırımlar yapmıştı. Deprem sonrası metro hatlarında gerçekleştirilen kontroller, bu yatırımın ne kadar yerinde olduğunu gösterdi (Mayoral ve Diğ., 2019). Metro tünelleri, köprüler ve viyadükler deprem sonrasında ciddi hasar almasa da, kapsamlı bir şekilde kontrol edildi. Yapılan incelemeler sonrasında gerek duyulan güçlendirme çalışmaları başlatıldı ve böylece metro altyapısının uzun vadede depremlere karşı daha dayanıklı hale getirilmesi sağlandı (Roeslin, 2020).

### 4.2.3. Japonya Kobe Depremi ve Metro İşletmelerine Etkisi

1995 Kobe Depremi, Japonya'nın Hyogo eyaletinde yer alan Kobe şehrini ve çevresini vuran, Japonya tarihindeki en yıkıcı depremlerden biri olarak kabul edilir. Deprem, sabah saat 05:46'da meydana geldi ve yaklaşık 20 saniye sürdü. Bu kısa süre içinde şehir genelinde devasa bir yıkım yaşandı; binalar çöktü, altyapı hasar gördü ve ulaşım sistemleri felç oldu. Depremin yer altı ulaşım sistemine olan etkileri, özellikle metro ve demiryolu ağında ciddi sorunlara neden oldu. Kobe'nin metro sistemi, şehrin şehrin en önemli taşıma sistemlerinden biri idi. Deprem sırasında sarsıntının şiddeti, metro tünellerinin bazı bölümlerinde çatlaklara ve yer yer çökme riskine yol açtı. İstasyonlarda yapısal hasarlar, tavan malzemelerinin düşmesi ve zemin kaymaları gibi sorunlar oluştu. Elektrik hatlarının kopması, aydınlatma ve sinyalizasyon sistemlerinin devre dışı kalmasına neden oldu. Deprem sırasında bazı metro trenleri seferdeydi. Trenler otomatik güvenlik sistemleriyle durdurulmuş olsa da, yolcuların tünellerde mahsur kalması ciddi bir endişe kaynağıydı. Özellikle sarsıntının hemen ardından oluşan kaos, tahliye sürecini zorlaştırdı. Depremden hemen sonra, Kobe metrosunun tüm hatları hizmet dışı bırakıldı. Tünellerde mahsur kalan yolcuların güvenli bir şekilde tahliye edilmesi için acil durum ekipleri devreye girdi. Çökmeye açık bölgelerdeki yolcular, yaya olarak en yakın çıkış noktalarına yönlendirildi. Elektrik kesintisi nedeniyle karanlık tünellerde tahliye işlemleri

el fenerleri ve taşınabilir aydınlatma ekipmanlarıyla gerçekleştirildi. İstasyonlarda kalan insanlar, binaların daha fazla hasar görme riski nedeniyle açık alanlara yönlendirildi. Bazı yolcular ise yıkılmış veya zarar görmüş istasyonlarda mahsur kalmıştı. Kurtarma ekipleri, bu kişilere ulaşmak için enkaz kaldırma çalışmaları yaptı. Deprem sonrası yapılan incelemeler, metro sisteminin önemli ölçüde zarar gördüğünü ortaya koydu. Tünellerdeki çatlakların yanı sıra rayların yerinden oynaması ve sinyalizasyon sistemlerindeki sorunlar, metro hattının uzun süre hizmet dışı kalmasına neden oldu. Japon mühendislik ekipleri, metro altyapısını hızla onarmak ve sistemi tekrar çalışır hale getirmek için gece gündüz çalıştı. Ancak bazı hatların onarımı haftalar sürdü. Bu süreçte, depremden etkilenen binlerce kişi alternatif ulaşım yöntemleri aramak zorunda kaldı. Şehir genelinde otobüs seferleri artırıldı ve geçici servisler kuruldu. Metro sisteminin devreye girmesiyle şehirdeki ulaşım normale dönmeye başladı, ancak tam anlamıyla toparlanması aylar sürdü.

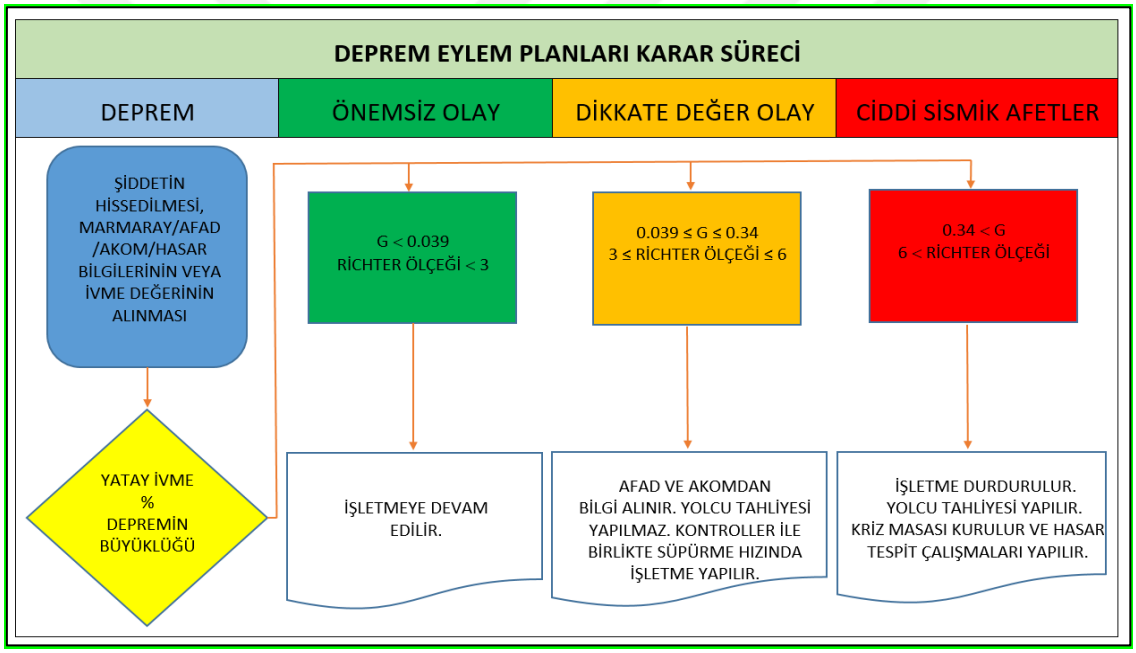
### 4.3. M5 Metro Hattı Örnek Deprem Senaryosu

İstanbul'da olası bir büyük depremde, kritik süreçlerin yönetimi, depremin şiddetiyle doğru orantılı olarak şekillenecektir. Şekil 4.1. ’de görüldüğü üzere, deprem sırasında ölçülen ivme değerine göre deprem eylem planının karar mekanizması devreye girecektir. Olası bir deprem durumunda yapılacak faaliyetler, TCDD Marmaray 1. Bölge, Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü, AFAD ve AKOM gibi kurumların sağladığı bilgilerle netleştirilir ve eylem planına uygun olarak adımlar atılacaktır. Bu tezde, İstanbul'da gerçekleşebilecek ciddi bir deprem afet senaryosuna odaklanılmaktadır. Richter ölçeğinde 6 ve üzeri bir deprem, şehri ciddi şekilde etkileyerek orta derecede yıkımlara yol açabilir. Bu durumda, şehir genelinde elektrik sağlayan ana dağıtım hatlarında meydana gelen hasarlar nedeniyle uzun süreli ve kalıcı enerji kesintilerinin yaşanması olasılığı üzerinde durulmaktadır. Buna karşılık tüm müdahaleler aşağıda sıralanmıştır.

#### 4.3.1. Deprem Algılanması ve İlk İhbar Süreci

M5 Metro hattı ile entegre olan Gebze – Halkalı Marmaray hattının Üsküdar İstasyonunda deprem algılama sensörleri bulunmaktadır. Bu sensörler üzerinden gelen herhangi bir bildirim M5 Metro hattı ilgilileri ile paylaşılmaktadır. Ayrıca bunun yanında İstanbul Kandilli Rasathanesi vasıtasıyla da anlık bildirim alınabilmektedir. İstanbul'da olası bir

büyük depremde, kritik süreçlerin yönetimi, depremin şiddetiyle doğru orantılı olarak şekillenecektir. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere, deprem sırasında ölçülen ivme değerine göre deprem eylem planının karar mekanizması devreye girmektedir. Olası bir deprem durumunda yapılacak faaliyetler, TCDD Marmaray 1. Bölge, Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü, AFAD ve AKOM gibi kurumların sağladığı bilgilerle netleştirilir ve eylem planına uygun olarak adımlar atılır. Bu tezde İstanbul'da gerçekleşebilecek ciddi bir sismik afet senaryosuna odaklanılmaktadır. Richter ölçeğinde 6 ve üzeri bir deprem, şehri ciddi şekilde etkileyerek orta derecede yıkımlara yol açabilir. Bu durumda sürecin aksiyonu ayağında, şekil 4.1.' de yer alan Deprem Eylem Planı Karar Süreci aksiyonu alınmaktadır.




Şekil 4.1. Deprem Eylem Planı Karar Süreci ( İBB Metro İstanbul A.Ş - EK181 - Metro İstanbul Acil Durum Yönetim Sistemi El Kitabı)

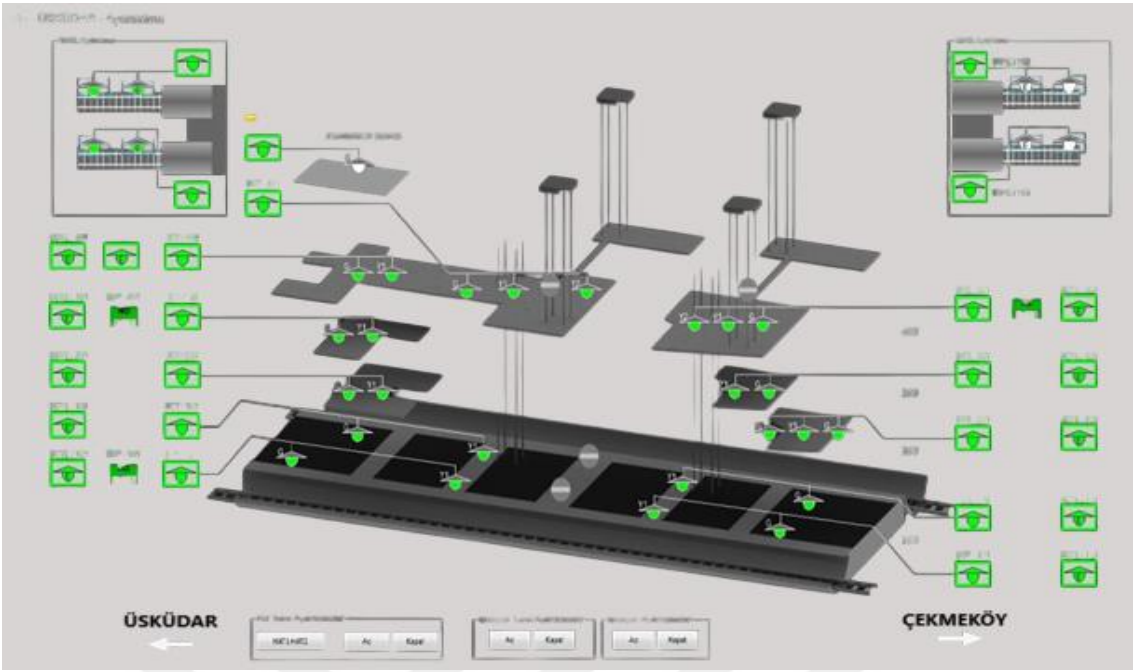
### 4.3.2. İlk Önlemler, Hat ve Sistem Güvenliği

Sensörler vasıtasıyla deprem algılandığında, güvenlik protokolleri anında devreye girer ve tüm trenler mevcut bulundukları konumda güvenle durdurulur. Bu işlem, trenlerin beklenmedik hareketler yapmasını engelleyerek hem yolcuların güvenliğini sağlamak hem de ray sisteminin zarar görmesini önleme amacı taşır. Depremin tespitiyle birlikte, hattın genelinde bulunan yüksek gerilim hatları hızla devre dışı bırakılır. Bu durum, hattın gerilim altında kalmasını önleyerek elektrik kaynaklı riskleri azaltmayı amaçlar. Kritik

sistemlerin (sinyalizasyon, haberleşme, SCADA vb.) çalışmaya devam etmesi gerektiğinden, bu sistemler için yedek güç kaynakları devreye alınır. Uninterruptible Power Supply (UPS) sistemleri bu süre zarfında sinyalizasyon ve iletişim sistemlerinin kesintisiz çalışmasını sağlar. Deprem sonrası ilk müdahaleyi gerçekleştiren hattın kumanda merkezi, tünellerin ve istasyonların güvenliğini sağlamak için hızlı bir değerlendirme sürecine girer. Bu değerlendirme, tünel ve istasyon yapılarının yanı sıra sinyalizasyon ve elektrik sistemlerinin de kapsamlı bir güvenlik taramasını içerir. Kumanda merkezi üzerinden ve istasyonlardaki SOR (Station Operation Room) bölgesinden, kapalı devre korumalı CCTV kameraları üzerinden İstasyonların tüm mahalleri kontrol edilerek, herhangi bir olağan dışı durumun olup olmadığı değerlendirilir. Öte yandan sahada ve kumanda merkezinde yapılan teknik değerlendirmeler neticesinde hattı besleyen Teiaş girişlerinin enerji kaybına uğradığı SCADA sistemi üzerinden görülmüştür. Bu durumda gerekli tahliye ve acil durum proseslerinin başlayabilmesi için hattın tekrar enerjilendirilmesi gerekmektedir.

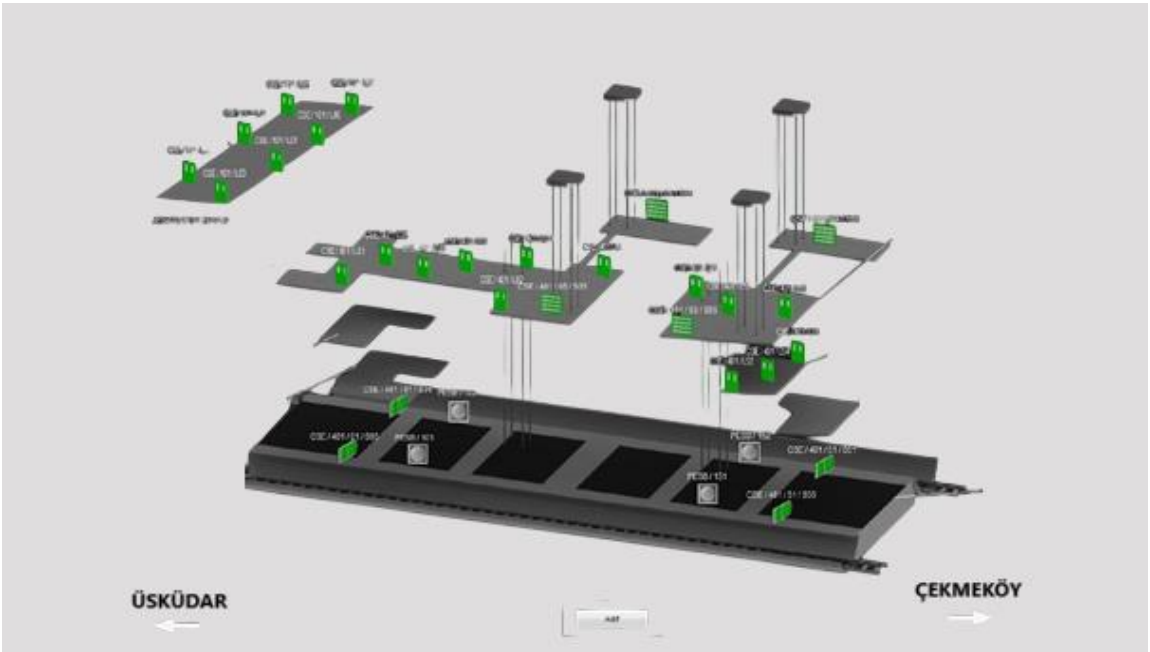
### 4.3.3. Jeneratörlerin ve Acil Durum Sistemlerinin Devreye Alınması

Bu durumda acil durum jeneratörleri hızla devreye alınarak hattın enerji ihtiyacını karşılamaya başlar. Tünelde kalan trenlerin en yakın istasyona iletilmesi için CER sistemi enerjilendirilir. İstasyonlarda biriken yolcuların tahliyesi için jeneratörler vasıtasıyla istasyon iç ihtiyaçları enerjilendirilir. Bu süreçte, istasyonun acil durum yönlendirme sistemleri devreye girer. Öte yandan istasyonlara ait, acil durum tahliye sistemlerine dâhil havalandırma sistemleri, aydınlatma sistemleri, yangın ve su tahliye pompa grupları, acil tahliye yönlendirme ve anons sistemleri de devreye alınır. Bu sistemler, yolcuların çıkış yollarını kolaylıkla bulabilmesi için güvenli çıkış noktalarını işaret eden yönlendirme levhalarını ve uyarı işaretlerini aktif hale getirir. Acil havalandırmalar devreye alınarak istasyonda birikmesi muhtemel duman, zehirli gaz vb. kirli hava yığınını drene etmek için istasyonlardaki EXF (İstasyon Kirli Hava Fanları) fanları hazırda bekletilir, bunun yanında tünel bölgesinde aynı riskin olması ihtimaline karşı TVF fanları da hazırda bekletilir. İstasyon geneli için temiz hava ihtiyacının karşılanması adına INF fanları da hazırda bekletilir. Yangın pompa tesisatları herhangi bir yangın riskine karşı hazırda bekletilir. İstasyonda herhangi bir su birikmesi, taşması durumuna karşı atık su pompa grubu hazır halde bekletilir.



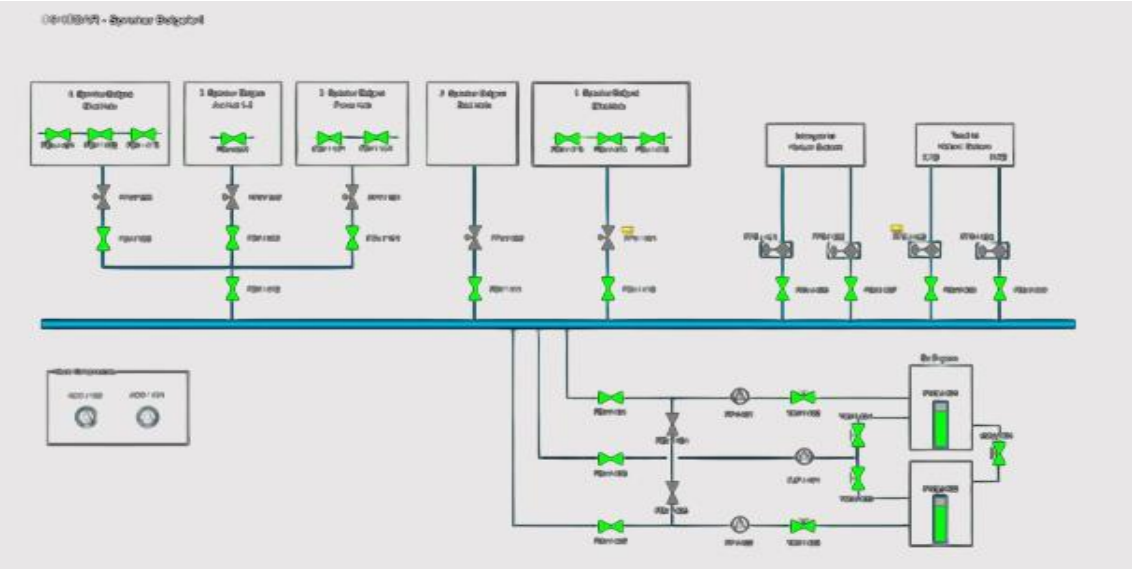

Şekil 4.2. Örnek Üsküdar İstasyonu Aydınlatma SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

Şekil 4.2.' de yer alan SCADA ekranı üzerinden her bir istasyon için acil aydınlatmalar devreye alınır (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları).



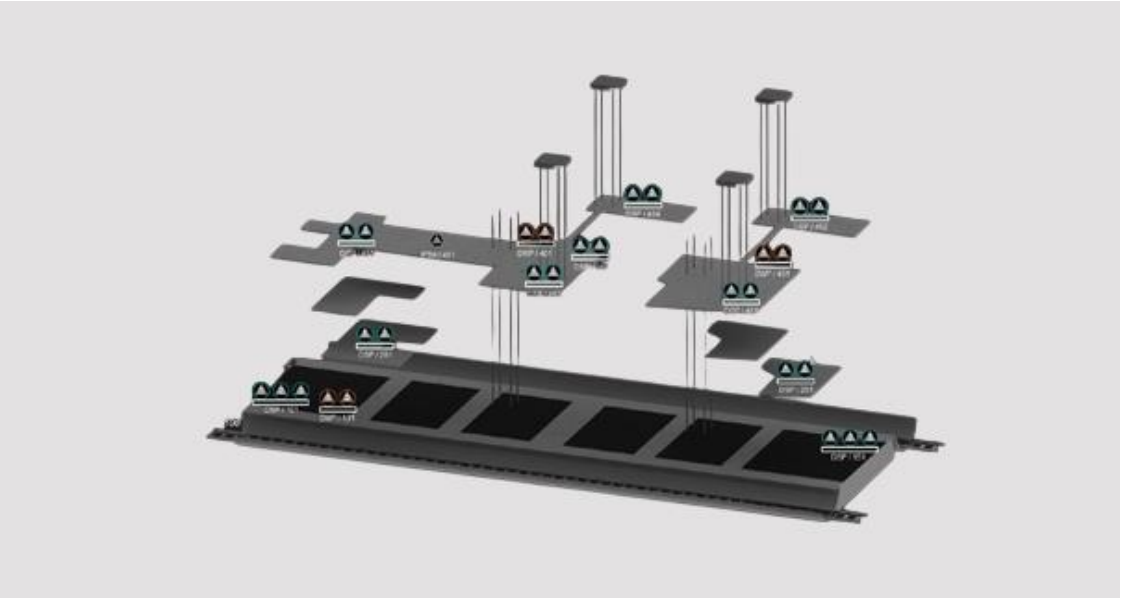

Şekil 4.3. Örnek Üsküdar İstasyonu Karlı Kapılar SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

İstasyonlarda bulunan tüm kapılar acil durumlarda her iki yönde de açılacak pozisyona gelebilmesi için tüm manyetik kartlı kapılar serbest konuma alınır (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları).



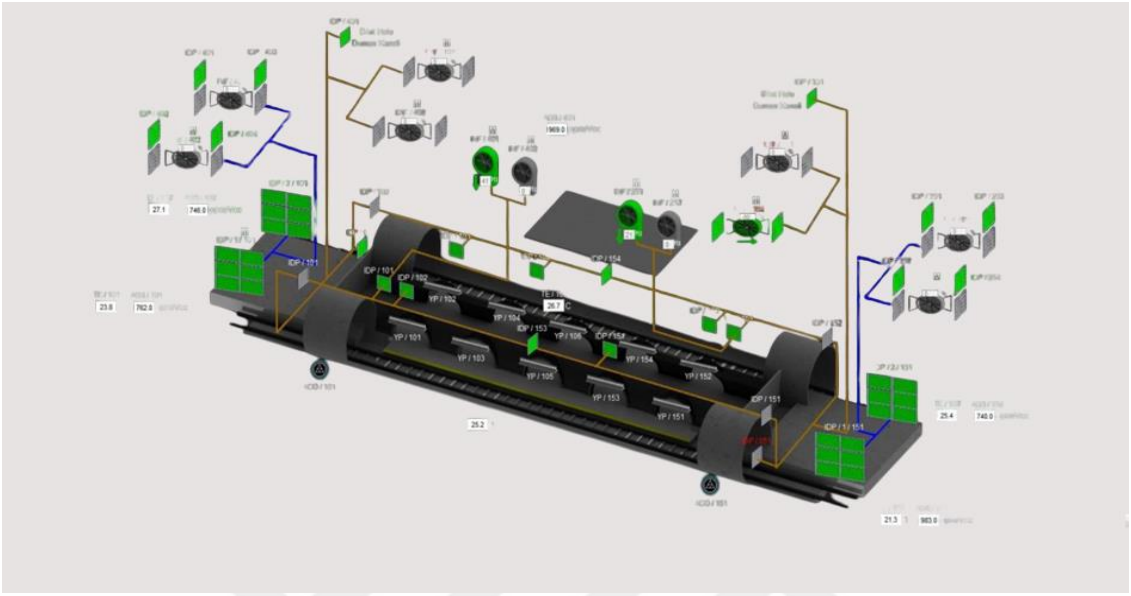
Şekil 4.4. Örnek Üsküdar İstasyonu Sulu Söndürme Sistemi SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

Hat boyunca herhangi bir yangın olayına müdahale için yangın pompa grupları devreye alınır (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları).



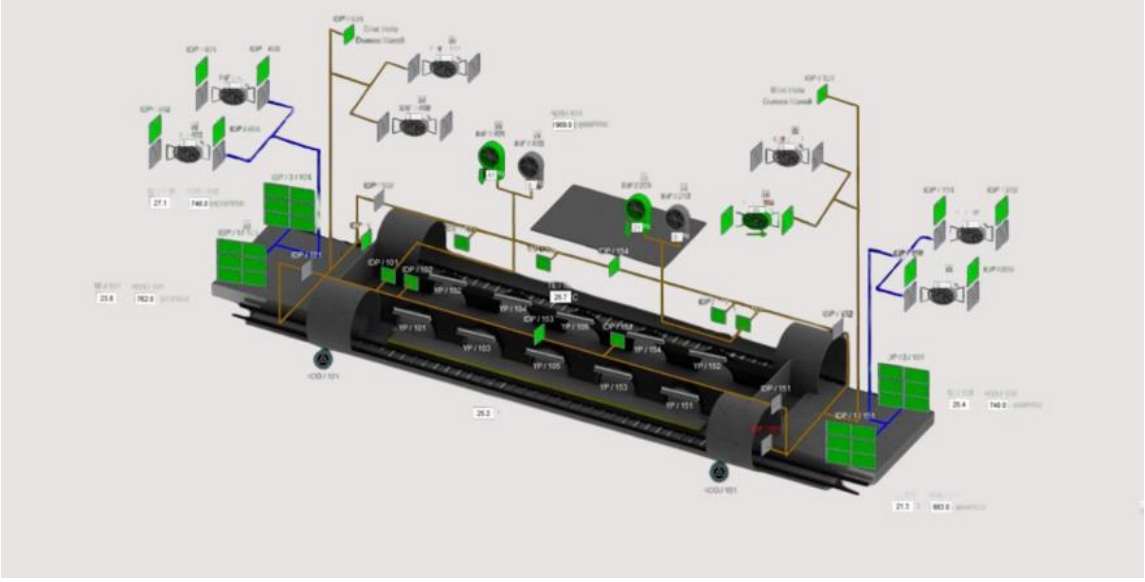
Şekil 4.5. Örnek Üsküdar İstasyonu Drenaj Pis ve Temiz Su SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları).

Meydana gelmesi muhtemel su baskınları veya temiz su ihtiyacı için tüm istasyonlarda pis ve temiz su sistemleri aktif edilir (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)



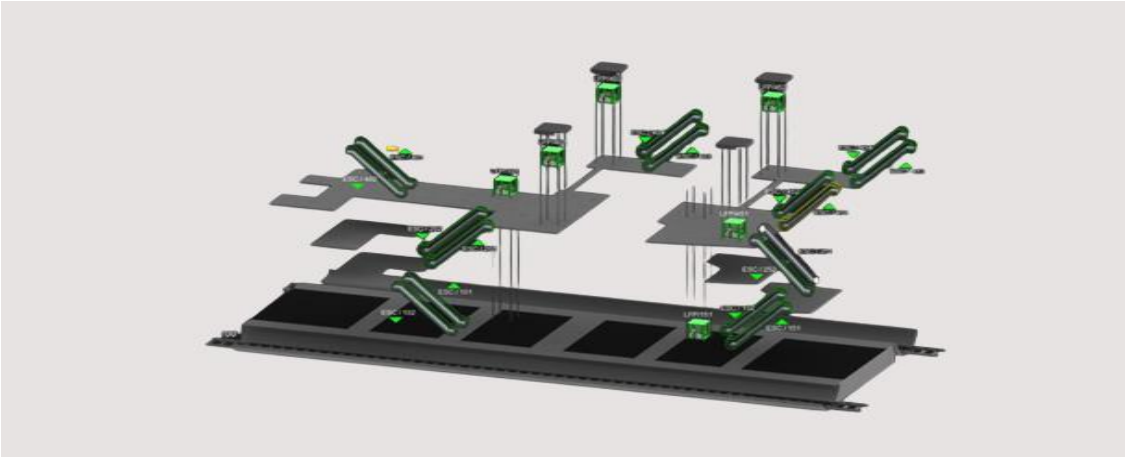
Şekil 4.6. Örnek Üsküdar İstasyonu Yolculu Alan Havalandırma SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

İstasyonlarda oluşması muhtemel herhangi bir zehirli gaz, boğucu gaz, duman, sis vb. dumanların tahliyesi ve istasyona temiz hava sağlanabilmesi için havalandırma fanları devreye alınır (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)



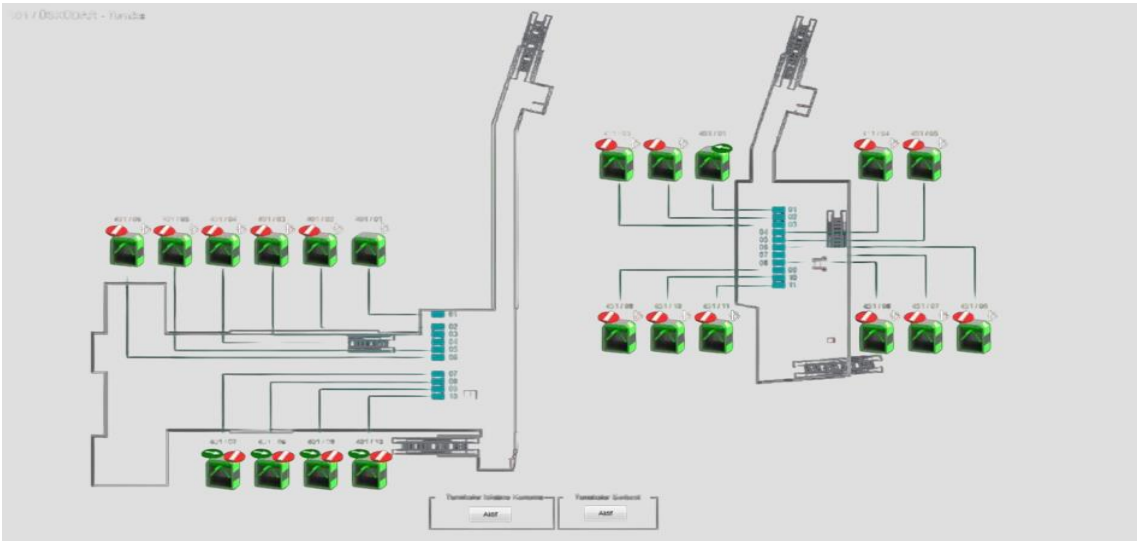
Şekil 4.7. Örnek Üsküdar İstasyonu Havalandırma Sistemi SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları).

Bu havalandırma sistemi ilgili mahaller üzerinden ihtiyaca binaen devreye alınması gereken sistemlerdir. Herhangi bir ihtiyaç karşısında pasif – aktif halde hazırda bulundurulur (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)



Şekil 4.8. Örnek Üsküdar İstasyonu Yürüyen Merdiven Asansör SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

Tüm istasyonlarda yer alan yürüyen merdivenler ve asansörler SCADA ekranları üzerinden pasif konuma alınarak devre dışı bırakılır (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)



Şekil 4.9. Örnek Üsküdar İstasyonu Yolcu Turnikeleri SCADA Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

Tüm istasyonlara ait yolcu turnikeleri SCADA ekranı üzerinden her iki yönde dönecek şekilde konumlandırılır (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

Deprem sonrası metro hattındaki tüm sistemlerin durumunu izlemek, hızlı bir şekilde müdahale edebilmek ve enerji dağılımını yönetmek için SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) kontrol sistemi kullanılır. Depremde meydana gelen hasarların hızla tespit edilmesi, enerji sağlama sistemlerinin etkinliği ve kritik altyapıların durumunu kontrol etmek için SCADA' nın rolü büyüktür. SCADA, jeneratörlerin çalışıp çalışmadığını, acil durum enerji sistemlerinin beslediği ekipmanların aktif olup olmadığını ve kritik sistemlerin enerji ihtiyacını takip eder. Hattın kumanda merkezi, SCADA sistemi üzerinden deprem sonrası aktif olan jeneratörlerin gücünü ve her bir sistemin enerji durumunu anlık olarak izler. Örneğin, metro tünellerindeki acil aydınlatma, hava tahliye sistemleri ve acil iletişim hatları gibi ekipmanların enerji seviyeleri sürekli olarak SCADA üzerinden kontrol edilir. Bu kontrol sistemi, aynı zamanda deprem sonrası ortaya çıkabilecek herhangi bir yapısal hasar sonucu meydana gelen sistem arızalarını tespit etmekte kullanılır.

### 4.3.4. Acil Durum Tahliye Sürecinin Başlatılması

Jeneratör sistemi üzerinden CER gücü beslemesi yapıldıktan sonra hattın enerjilendirilmesi sağlanır (Jeneratörlerin CER gücünü enerjilendirmesi süreci Madde 6. da detaylandırılmıştır). Deprem sonrası, tüm trenler güvenlik protokollerine uygun olarak derhal durdurulur ve mevcut konumlarında sabitlenir. Bu durdurma işlemi, olası artçı sarsıntılar veya beklenmedik hareketlere karşı yolcuları korumak için gereklidir. İlk olarak trenlerin bulunduğu konumlarına göre güvenlik değerlendirmesi yapılır. Tünel bölgesinde kalan trenlerin sevki ve ray hattının kontrolü için trenlerin bulundukları konuma birer teknik personel ve tren sürücüsü sevk edilir. Bu değerlendirmede, trenin yapısal durumu, raylarda herhangi bir deformasyon olup olmadığı ve hareketin güvenli olup olmadığı kontrol edilir. Hasar olmadığı belirlendiğinde, trenin yavaşça en yakın güvenli istasyona ilerlemesine izin verilir. Bu hareket sırasında, tren sürücüsü ile kumanda merkezi arasında sürekli ve kesintisiz bir iletişim sağlanır. Tren, dikkatlice kontrol edilerek düşük hızda ilerletilir ve bu esnada ani hızlanma veya frenleme gibi hareketlerden özellikle kaçınılır. Bu kontrollü hız ve hareket yönetimi, yolcuların sarsıntı veya ani hareketler nedeniyle panik yaşamalarını önler. Yolcular, güvende olduklarını hissettikleri için daha sakin kalır, bu da tahliye sürecinin düzenli ve sorunsuz bir şekilde ilerlemesine olanak tanır. Tüm bu adımlar, yolcuların emniyetini en üst düzeyde

sağlamak ve tahliye işleminin güvenli bir şekilde gerçekleşmesini temin etmek üzere titizlikle yürütülür. Trenler en yakın istasyona ulaştırılarak kapılarını açar ve yolcuları ilk etapta peron bölgesine tahliye eder. İstasyon personeli, bu aşamada sakinliği sağlamak ve panik oluşumunu önlemek amacıyla düzenli bilgilendirmeler yaparak yolcularla iletişimde kalır. Yolcuların güvenli bölgelere yönlendirilmesi için personel, tahliye güzergâhlarını göstererek yolcuların hangi yönde hareket etmeleri gerektiğini net bir şekilde belirtir. Güvenlik görevlileri ve istasyon personeli, acil durum planları doğrultusunda hareket eder ve istasyonun güvenli alanlarına hâkim olduklarından, en güvenli ve hızlı tahliye yollarını bilirler. Tüm bu adımlar, yolcuların güvenle tahliye edilmesini ve tahliye sürecinin hızlı, düzenli ve güvenli bir şekilde sonlanmasını sağlamak üzere titizlikle uygulanır. İstasyonda yer alan yolcuların güvenli bölgelere tahliyesi devam ederken yaralanma ihtimali olan veya mahsur kalma ihtimali olan yolculara en kısa sürede müdahale edebilmek için hattın kumanda merkezi tarafından, itfaiye ve sağlık ekipleri hızlıca olay yerine yönlendirilir. İtfaiye ekipleri, tren ya da istasyon içinde sıkışmış olan yolcuların güvenli bir şekilde tahliye edilmesini sağlamak için özel olarak donatılmış ekipmanlara sahiptir. Bu ekipmanlar arasında yangına dayanıklı kıyafetler, dar alanlarda çalışabilmek için nefes alma cihazları ve gerektiğinde kullanılmak üzere kesici ve açıcı aletler yer alır. Her türlü acil duruma karşı hazırlıklı olan itfaiye ekipleri, tüneller gibi kapalı alanlarda profesyonelce hareket ederek, yolcuları güvenli bir şekilde kurtarmak için gereken tüm önlemleri alır. Sağlık ekipleri de yaralı yolcuların olması ihtimaline karşı istasyon bölgelerinde hazır bekletilir. İlk yardım konusunda eğitimli personel, yaralıların durumunu değerlendirir ve acil yardım müdahalesi yapar. Durumu kritik olan veya ileri tıbbi yardıma ihtiyaç duyan yolcular, vakit kaybetmeden en yakın sağlık kurumuna sevk edilir. Sağlık ekipleri, sedyeler, taşınabilir oksijen tüpleri ve diğer acil tıbbi cihazlarla donatılmış şekilde, gerektiğinde hızlı müdahale için hazırlıklı olarak bekler. İstasyonlarda stratejik noktalara yerleştirilmiş yangın söndürücüler, ilk yardım kitleri ve diğer acil durum ekipmanları, olası bir yangın veya dumanla karşılaşıldığında veya ilk yardım gerekmesi durumunda hızlı erişim sağlar. Bu ekipmanlar, hem itfaiye hem de sağlık ekiplerinin görevlerini hızlı ve etkin bir şekilde yerine getirmelerine yardımcı olur. İtfaiye, sağlık ve istasyon personelinin koordineli çalışması sayesinde, tahliye süreci güvenli, düzenli ve hızlı bir şekilde tamamlanır ve tüm yolcuların güvenliği en üst düzeyde sağlanır.

### 4.3.5. Güvenlik ve Hasar Değerlendirmesi

Tünel ve ray kontrolleri kapsamında ilk olarak, tüneller ve diğer yapısal elemanlar deprem kaynaklı herhangi bir hasar, deformasyon veya çatlak olup olmadığını belirlemek için incelenir. Rayların kayması, tünellerdeki sızıntılar veya çatlaklar gibi olası sorunlar için sahada bir fiil teknik ekipler marifetiyle kontroller gerçekleştirilir. Ayrıca, ray bağlantı elemanlarının, makas sistemlerinin ve geçiş noktalarının da deprem sonrası pozisyonları kontrol edilerek güvenli bir şekilde çalışıp çalışmadığı değerlendirilir. İstasyon İncelemeleri kapsamında, istasyonlardaki tüm yapılar tüm teknik ekiplerin katılımı ile tek tek titizlikle incelenir. Duvarlar, tavanlar, zeminler, yürüyen merdivenler ve asansör gibi hareketli aksamlar detaylı bir incelemeden geçirilir. Bu inceleme, yolcuların güvenliği için hayati önem taşır ve özellikle depremden en çok etkilenen bölgelerde öncelikli olarak yapılır. İnceleme sürecinde ayrıca havalandırma sistemleri, acil çıkış yolları ve yangın kaçış donanımları da gözden geçirilir. Elektrik ve Sinyal Sistemleri kapsamında kontroller için elektrik hatları, trafolar, sinyalizasyon ekipmanları ve iletişim sistemleri kontrol edilir. Deprem sırasında kesilen veya hasar gören kabloların ya da sinyal cihazlarının kontrolleri detaylıca gerçekleştirilir. Ayrıca sistemin genel çalışma senaryoları test edilerek yeniden çalışabilirlik doğrulanır. Kritik noktalarda yedek sistemlerin devreye alınıp alınmadığı ve SCADA ile olan veri iletişiminin sürekliliği de bu kapsamda değerlendirilir. Bu bütünsel değerlendirme süreci, metro sisteminin güvenli bir şekilde yeniden faaliyete geçebilmesi için kritik bir rol oynar.

### 4.3.6. Acil Durum Sistemlerinin Yeniden Değerlendirilmesi

Deprem anında devreye girecek acil durum jeneratörleri ve UPS (Kesintisiz Güç Kaynağı) sistemlerinin operasyonel durumu, metro sistemlerinin güvenliği ve sürekliliği açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu sistemlerin işlevselliği, özellikle deprem gibi öngörülemeyen durumlarda yolcuların tahliyesini kolaylaştırmak ve istasyonlardaki operasyonların aksamadan devam etmesini sağlamak adına kritik bir role sahiptir. Bu nedenle, söz konusu sistemlerin düzenli olarak bakım ve test süreçlerinden geçirilmesi gereklidir. Acil durum jeneratörleri, enerji kesintisi durumlarında devreye girerek istasyonların ve trenlerin temel işlevlerini sürdürebilmesi için elektrik sağlar. Bu jeneratörlerin, herhangi bir gecikme veya arızaya mahal vermeden sorunsuz bir şekilde devreye girebilmesi için yakıt seviyesi, motor durumu ve kontrol sistemleri gibi tüm alt

bileşenleri detaylı bir şekilde incelenir. Bunun yanı sıra, UPS sistemleri de ani enerji kayıplarına karşı anında tepki verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sistemlerin batarya kapasiteleri, şarj durumları ve genel performansı düzenli olarak ölçülerek olası bir sorun erken aşamada tespit edilir. Deprem sonrası UPS bataryalarının durumunun analiz edilmesi, enerji sürekliliğini sağlama konusunda öncelikli bir adım olarak değerlendirilir. İstasyonlarda bulunan yangın söndürme sistemleri, duman dedektörleri ve acil aydınlatma sistemleri de bu kapsamda titizlikle kontrol edilmesi gereken diğer unsurlardır. Yangın söndürücüler, kullanım süreleri, basınç durumları ve fiziksel kontroller açısından periyodik olarak denetlenir. Duman dedektörleri ise hem sensör hassasiyetleri hem de bağlantı sistemleri açısından test edilir. Acil durum aydınlatma sistemleri, enerji kesintisi sırasında devreye girmesi gereken bir diğer önemli sistem olup, tüm ışık kaynaklarının ve bağlantı noktalarının düzenli olarak test edilmesi şarttır. Bu süreçlerin etkin bir şekilde işletilmesi, yalnızca tespit edilen sorunların düzeltilmesi ile sınırlı kalmaz. Aynı zamanda, yapılan her bakım ve test faaliyeti detaylı bir şekilde kayıt altına alınır. Bu kayıtlar, sistemlerin geçmiş performansını analiz etmek ve ilerleyen süreçlerde olası arızaları önceden tespit etmek için bir referans kaynağı oluşturur.

### 4.3.7. Deneme Sürüşleri ve Test Süreci

Metro hattının yeniden açılma sürecinde güvenliği en üst düzeyde sağlamak için kapsamlı testler gerçekleştirilir. Ray ve sistem güvenliği yetkili teknik ekipler tarafından titizlikle incelendikten sonra, kontrollü test süreci başlatılır. Deneme sürüşleri, metro hattının farklı bölümlerinde yolcusuz trenlerle gerçekleştirilir. İlk aşamada trenler düşük hızlarda ilerler ve sistemin temel işleyişi gözlemlenir. Ardından, kademeli olarak tren hızları artırılarak rayların dayanıklılığı, sinyalizasyon sisteminin doğru tepki verip vermediği ve genel işletme güvenliği doğrulanır. Bu süreçte, ray hattındaki eğimler, bağlantı noktaları, makas mekanizmaları ve tünel içi yapı elemanlarının stabilitesi detaylı bir şekilde kontrol edilir. Trenlerin hareketini düzenleyen sinyal sistemlerinin hatasız çalışması için istasyonlar arası veri iletişimi ve kontrol merkezinin operasyonel yetkinliği test edilir. Aynı zamanda, istasyon içi sesli anons sistemleri, acil çağrı noktaları ve operatörlerin iletişim kanalları kontrol edilir. Herhangi bir olumsuzluk tespit edilmesi durumunda, ilgili sistem tekrar kontrol edilir ve gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra test süreci yenilenir.

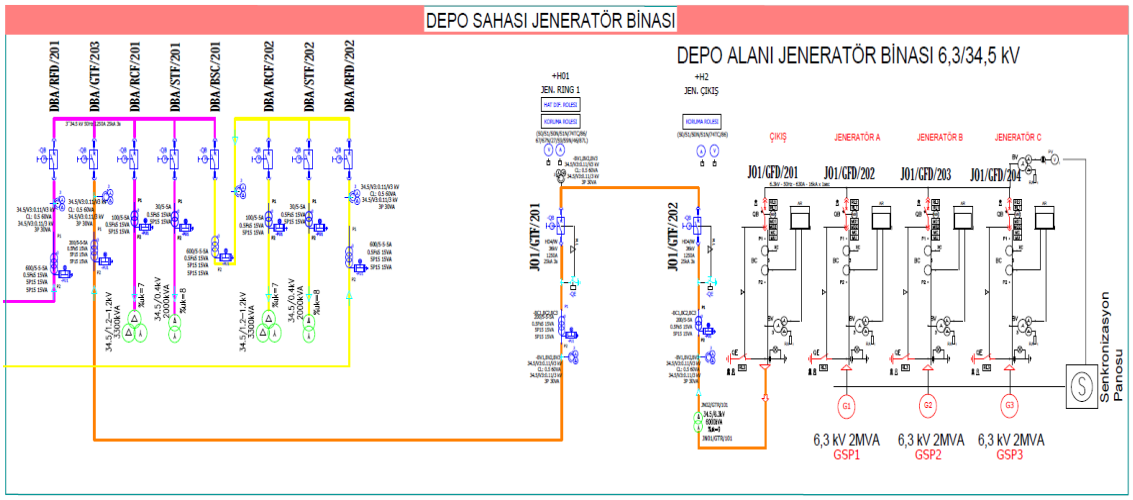
Tüm bu adımlar tamamlanıp sistemin güvenliği kesin olarak onaylandıktan sonra, metro hattının kademeli olarak yolcu taşımaya başlamasına izin verilir.

### 4.3.8. Yolcu Bilgilendirme ve Normal İşletmeye Geçiş

Metro hattının yeniden açılması öncesinde, yolcuların güvenliğinin tamamen sağlandığından emin olunana kadar kapsamlı bilgilendirme çalışmaları yürütülür. Yolculara, hattın açılış süreci, alınan güvenlik önlemleri ve olası gecikmeler hakkında şeffaf bir şekilde bilgi verilir. Bu bilgilendirmeler; dijital panolar, sosyal medya platformları, mobil uygulamalar ve sesli anons sistemleri aracılığıyla geniş bir kitleye ulaştırılır. Hattın yeniden işletmeye alınmasının ilk günlerinde, trenler kontrollü hızlarla ve dikkatli bir operasyon süreciyle çalıştırılır. Teknik ekipler, ray hattının, sinyalizasyon sistemlerinin ve istasyon altyapısının tam güvenli olduğunu doğrulamak için sürekli denetimler gerçekleştirir. Denetim sürecinde elde edilen veriler, merkezi kontrol sistemine aktarılarak gerçek zamanlı analizlerle değerlendirilir. Olası aksaklıkların önüne geçebilmek adına, sefer aralıkları ve duraklama süreleri optimize edilir. Ayrıca, yolcu yoğunluğu ve operasyonel süreçler anlık olarak takip edilerek gerekli durumlarda ek önlemler alınır. Yoğunluk yaşanabilecek aktarma noktaları ve ana istasyonlarda, ilave personel ve geçici yönlendirme tabelaları ile yolcu akışı düzenlenir. Güvenlik personeli ve istasyon görevlileri, yolculara rehberlik etmek ve yönlendirme sağlamak amacıyla kritik noktalarda görevlendirilir. Ray hattının tamamen güvenli olduğu onaylanana kadar, tüm seferler kontrollü bir şekilde yürütülmeye devam eder. Yolcuların güvenliği en üst düzeyde tutulurken, sürecin sorunsuz ilerlemesi için ilgili yetkililer tarafından sürekli değerlendirmeler yapılır. Ayrıca, bu süreçte elde edilen tüm gözlem ve veriler, ileride yaşanabilecek benzer durumlar için bir referans kaynağı oluşturur. Metro hattının yeniden açılması, yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda psikolojik açıdan da yolcuların kendini güvende hissetmesiyle mümkündür. Bu nedenle, kriz sonrası yeniden işletmeye geçişte güven duygusunun tesisi için şeffaflık ve bilgilendirme kilit rol oynar. Eğitimli personelin varlığı ve istasyonlarda sağlanan yönlendirme desteği, sürecin başarıyla tamamlanmasında büyük önem taşır. Aynı zamanda, kriz sonrası hazırlık planları güncellenerek sistemin dayanıklılığı artırılır. Tüm bu çabalar, metro sisteminin sadece bir ulaşım aracı değil, aynı zamanda güvenli bir ulaşım hattı olduğunu pekiştirir.

## 5. M5 HATTI JENERATÖR SİSTEMİNİN DEVREYE ALINMASI

Üsküdar - Ümraniye - Çekmeköy Metro Hattı'nda, Dudullu depo sahasında kurulu, 2 MVA görünür güce sahip 3 adet acil durum jeneratörü bulunmaktadır. Şekil: 6.1' de de görüldüğü üzere bu jeneratörler, tek başlarına çalışabildikleri gibi senkronize olarak da çalışarak toplamda 6 MVA (nominal güç değeridir) güç üretebilirler. Dizel yakıtla çalışan bu jeneratörlerin 10 ton kapasiteli yakıt depoları vardır. Yerel Elektrik Dağıtım Şirketi tarafından herhangi bir enerji kesintisi veya ani ve yüksek enerji voltaj düşüklüğü meydana geldiğinde, jeneratörler Kumanda merkezi SCADA ekranına bilgi gönderir. Gönderilen bilgide hattın enerji kaybına uğradığını, bu durumda hattın ihtiyacı olan enerjinin jeneratörler vasıtasıyla karşılanması gerektiği uyarısını yapar. Kumanda merkezi tarafından yapılan değerlendirmeler neticesinde senaryonun başlatılması emri SCADA üzerinden verilir. Şekil: 6.2' de görüldüğü üzere, devreye giren jeneratörler gerekli enerji sağlayarak metro hattındaki acil durum ve tahliye senaryolarına yönelik sistemlerin yanı sıra trenlerin en yakın istasyona ulaşabilmesi için gerekli CER güç sistemini de besler. Yaşanan acil durumun ardından tüm sistemlerin tekrar normale dönmesi ile jeneratör senaryosu durdurulabilir. Elektrik şebekesinin yeniden devreye girmesi durumunda kumanda merkezinin tüm kontrolleri sonrasında yarı otomatik jeneratör senaryosu sonlandırılır, normal enerji kaynağına geri dönülür. Jeneratör sisteminin temel bileşenleri şekil 5.2.' de yer alan şemada gösterilmiştir (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro – Mekanik İşler Proje Raporu).




Şekil 5.1. M5 Metro Jeneratör Binası Tek Hat Şeması (İ.B.B. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro – Mekanik İşler Proje Raporu).

## 5.1. Fine-Kinney Risk Analizi İle Yük Önceliklendirme

M5 Üsküdar-Çekmeköy metro hattında, olası bir deprem senaryosu kapsamında enerji sürekliliğini sağlamak ve mevcut jeneratör kapasitesini en etkin şekilde yönetmek amacıyla Fine-Kinney risk analizi yöntemi uygulanmıştır. Bu analiz, sistemdeki tüm bileşenlerin risk olasılığı, risk etkisi ve risk derecesi gibi kritik parametreler çerçevesinde değerlendirilmesini sağlayarak, afetten etkilenen metro operasyonlarının güvenliğini sağlamak için öncelikli sistemlerin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Deprem sırasında jeneratörler acil enerji kaynağı olarak devreye alınacak ve enerji yönetimi belirlenen risk önceliği sırasına göre gerçekleştirilecektir. Gerçekleştirilen bu analizde Tablo 5.1 – 5.2 – 5.3 ve 5.4' de yer alan parametreler kullanılmıştır.

### 5.1.1. Fine Kinney Risk Analizi Parametreleri

Tablo 5.1. Fine Kinney Risk Analizi Şiddet Puanı

| ŞİDDET PUANI | TANIM |
|---|---|
| 1 | Önemsiz (Hafif yaralanmalar) |
| 3 | Az önemli (Tedavi gerektirir) |
| 7 | Ciddi (Uzun süreli iş görmezlik) |
| 15 | Çok ciddi (Kalıcı sakatlık) |
| 40 | Ölüm veya çoklu ölüm |

Tablo 5.2. Fine Kinney Risk Analizi Olasılık Puanı

| OLASILIK PUANI | TANIM |
|---|---|
| 0.1 | Çok düşük (Neredeyse imkansız) |
| 0.5 | Düşük (Nadir gerçekleşir) |
| 1 | Orta (Belirli koşullarda gerçekleşebilir) |
| 3 | Yüksek (Düzenli olarak gerçekleşir) |
| 6 | Çok yüksek (Kaçınılmaz) |

Tablo 5.3. Fine Kinney Risk Analizi Frekans Puanı

| FREKANS PUANI | TANIM |
|---|---|
| 0.5 | Yılda bir |
| 1 | Altı ayda bir |
| 2 | Ayda bir |
| 3 | Haftada bir |
| 6 | Günde bir |
| 10 | Saatte bir |

Fine-Kinney yönteminde risk değeri aşağıdaki formülle hesaplanır:

Risk Değeri (R) = Şiddet (S) × Olasılık (P) × Frekans (F) (5.1)

Tablo 5.4. Fine Kinney Risk Analizi Risk Değeri Puanı

| RİSK DEĞER ARALIĞI | RİSK SEVİYESİ | ALINACAK AKSİYON |
|---|---|---|
| 1 - 20 | Yılda bir | İleride gözden geçirilir. |
| 21 - 70 | Altı ayda bir | Kontrol önlemleri alınmalıdır. |
| 71 - 200 | Ayda bir | Derhal kontrol altına alınmalıdır. |
| > 200 | Haftada bir | Faaliyet durdurulmalı ve acil önlem alınmalıdır. |

### 5.1.2. Öncelik Grubu 1, Hayati Sistemler

Bu gruptaki sistemler, deprem anında metro hattının güvenliğinin sağlanması ve operasyonların aksamadan sürdürülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Metro sisteminin kapalı bir yapı olması nedeniyle, afet anında meydana gelebilecek olumsuzlukların en aza indirilmesi ve yolcu güvenliğinin sağlanması için bu sistemlerin kesintisiz çalışması gerekmektedir. Jeneratör devreye alındığında bu sistemler öncelikli olarak çalıştırılacaktır. Bu sistemler içerisinde; Acil Durum Aydınlatma Sistemi, Acil Durum Havalandırma Sistemi, Haberleşme Sistemleri, İhbar ve Anons Sistemleri,

Sinyalizasyon Sistemleri yer almaktadır. Simülasyonda İhbar, anons ve sinyalizasyon gibi sistemler hafif yükler olarak değerlendirilmiştir.

### 5.1.3. Öncelik Grubu 2, Operasyonel Sistemler

Bu sistemler, metro hattının temel altyapısının korunması ve acil müdahale süreçlerinin sürdürülebilmesi açısından önemlidir. Ancak hayati sistemlerden sonra devreye alınacaktır. Yangın Söndürme ve Su Tahliye Sistemleri: Yangın risklerine karşı söndürme sistemlerinin çalıştırılması ve tünel ile istasyon bölgelerinde su baskınlarını önlemek amacıyla atık su tahliye sistemlerinin aktif hale getirilmesi gerekmektedir.

### 5.1.4. Öncelik Grubu 3, Tünel Tahliye Sistemleri

Bu gruptaki sistemler, deprem sonrasında yolcu tahliyesinin güvenli bir şekilde yürütülmesini sağlamak amacıyla devreye alınacaktır. Tren Tahliye Sistemleri: Deprem sırasında tünelde kalan trenlerin en yakın istasyona ulaştırılması ve yolcuların güvenli tahliyesinin sağlanması için kritik bir rol oynamaktadır.

### 5.1.5. Devreye Alınmayacak Sistemler

Öncelik sırası 4, 5 ve 6 olan sistemler, afet anında enerji tasarrufu sağlamak ve jeneratör kapasitesini kritik sistemler için korumak amacıyla devre dışı bırakılacaktır. Bu sistemler, yapılan risk analizine göre hayati veya operasyonel risk taşımadığı için deprem senaryosu kapsamında çalıştırılmayacaktır. Örnek bir deprem senaryosuna göre hazırlanan risk analizi çıktıları değerlendirildiğinde; bu sistemlerin devreye alınmasının, enerji yönetimi açısından verimsiz olacağı ve kritik sistemlerin işleyişini tehlikeye atabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda, sadece yolcu güvenliği, tahliye, yangınla mücadele ve temel haberleşme gibi hayati öneme sahip sistemler enerjiyle beslenmeye devam edecektir. Düşük öncelikli sistemlerin geçici olarak devre dışı bırakılması, hem enerji kaynaklarının kontrollü kullanımını sağlar hem de jeneratör sistemlerinin aşırı yüklenmesinin önüne geçer. öylece, olası bir enerji dengesizliği yaşanmadan metro operasyonlarının güvenli ve kesintisiz şekilde devam ettirilmesi mümkün olur. Ayrıca bu yaklaşım, kaynakların en kritik ihtiyaçlara yönlendirilmesini sağlayarak, yolcuların hızlı ve etkin tahliyesine katkı sunar.

Tablo 5.5. Risk Analizi Tablosu

| Tehlike/Risk Unsuru | Tehlike | Risk | Olasılık | Frekans | Şiddet | Risk Puanı | Öncelik Sırası |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ACİL DURUM AYDINLATMA SİSTEMİ | Karanlıkta hareket edememe ve yön bulamama, Acil çıkış noktalarına ulaşılamaması ve güvenli tahliye yapılamaması. Görme veya hareket kısıtlılığı olan bireyler için ciddi tehlikeler. | Karanlık ortamda yön kaybı ile panik ve İzdiham sonucu yaralanma, Yetersiz aydınlatma ve yönlendirmeler nedeniyle acil çıkış noktalarının bulunamaması sonucu mahsur kalma, Can kaybı vb. Riskler. | 6 | 3 | 40 | 720 | **1** |
| ACİL DURUM HAVALANDIRMA SİSTEMİ | Dumandan etkilenme, Oksijen seviyesinin azalması, Sıcaklık artışı, Hava kalitesinin düşmesi, Panik ve kaos ortamı gibi ciddi tehlikeler. | Oksijen kalitesinin azalması ile yolcuların nefessiz kalma zehirlenme riski, Tahliye sürecinde oluşacak kaos ortamı ile yaralanma can kaybı vb. riskler. | 6 | 3 | 40 | 720 | **1** |
| SİNYALİZASYON SİSTEMLERİ | Yolcuların trende ve tünelde mahsur kalması, Tren Tren teması, Trenin raydan çıkması (Deray olayı), Trenlerin hareket ettirilememesi, kumanda merkezinin saha kontrolünü kaybedilmesi vb. tehlikeler. | Çarpışma sonucu ciddi yaralanmalar, can kaybı, trenlerin hasar görmesi ve uzun süreli hizmet aksaması, Tren hareketleri, sinyalizasyon ve diğer hayati sistemlerin yolcuların trende ve tünelde mahsur kalması sonucu yaralanma, can kaybı vb. riskler. | 6 | 2 | 40 | 480 | **1** |

Tablo 5.5. (Devam) Risk Analizi Tablosu

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HABERLEŞME SİSTEMLERİ | Acil Durum Müdahale sürecinin yönetilememesi, Tren ve İstasyonlar Arasında Koordinasyon Eksikliği, Arızaların Hızlı Tespiti ve Çözümü İmkânsızlığı, yolcu bilgilendirme ve haberleşme süreçlerinin yapılamaması vb. tehlikeler. | Deprem anında hızlı ve etkili müdahale yapılamaması, can ve mal kaybı, Tren hareketi, tahliye süreci vb. kritik süreçlerin yerine getirilememesi ile yaralanma ve can kaybı, her tür tehdide karşı müdahale ve yönetim zorluğu sonucu ciddi yaralanma ve can kaybı riskleri. | 6 | 2 | 40 | 480 | **1** |
| İHBAR VE ANONS SİSTEMLERİ | Etkili Yönetim ve Koordinasyon Eksikliği, deprem anı Yönlendirme Eksiklikleri, Deprem anının fark edilememesi, yolcular ile iletişim kurulamaması vb. tehlikeler. | Deprem anında karar alma süreçlerinin yavaşlaması, ekipler arası koordinasyonun sağlanamaması ile müdahale süresini uzaması, uyarı ve anonsların yapılmaması ile yaralanma ve can kaybı riskleri | 6 | 2 | 40 | 480 | **1** |
| SÖNDÜRME VE ATIK SU TAHLİYE SİSTEMLERİ | Deprem anında olası bir yangın tehlikesine karşı söndürme sistemlerinin çalışmaması ile yangına müdahale edememe, su tesisatı atık su sistemlerinin patlaması vb. tehlikeler. | Söndürme sistemlerinin devre dışı kalması, su baskını, kirli su nedeniyle yolcuların zehirlenme riski, Su baskını ve yangın nedeniyle tahliye tahliyenin aksaması sonucu yaralanma ve can kaybı riskleri. | 4 | 2 | 40 | 320 | **2** |

Tablo 5.5. (Devam) Risk Analizi Tablosu

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TREN TAHLİYE SİSTEMLERİ | Deprem anı ve sonrasında yolcuların tren içinde tünelde mahsur kalmaları, acil durum tahliye süreçlerinin aksaması vb. tehlikeler. | Tünel bölgesinde kalan trenlerin içindeki yolcuların tünelde mahsur kalması sonucu panik ve izdiham oluşması, kalabalık ortam riskleri vb. | 2 | 3 | 40 | 240 | **3** |
| KAMERA VE GÜVENLİK SİSTEMLERİ | Yaşanan deprem olayı anında ve sonrasında istasyon mahallerinin izlenememesi, ekiplerin yönlendirme ve takip süreçlerinin sağlanamaması. | Güvenlik kamera sistemlerinin çalışmaması, olayların kayıt altına alınamaması ile sonraki süreçlerin iyileştirilememesi riski, yapılarında oluşması muhtemel güvenlik riskleri. | 2 | 3 | 15 | 90 | **4** |
| YOLCU BİLGİLENDİRME SİSTEMLERİ | Bu sistemler yolcuların işletme bilgilendirmeleri sınıfına girmektedir, aynı zamanda acil durumlar anında yolcu bilgilendirme ve yönlendirme yapılmaktadır açısından tehlike arz etmektedir. | Yolcu bilgilendirme ve yönlendirmeye yardımcı sisteminin devre dışı kalması ile yolcu yoğunluğu, kalabalık ortam ve kaos oluşması ile yaralanma vb. riskler. | 2 | 2 | 15 | 60 | **4** |

Tablo 5.5. (Devam) Risk Analizi Tablosu

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GİRİŞ VE ÇIKIŞ KONTROL SİSTEMLERİ | Deprem anı ve sonrasında istasyon mahallerinden düzensiz çıkışlar ve girişler olması vb. tehlikeler. | İstasyonlara kontrolsüz giriş ve çıkışlar olması ile yoğunluk yaşanması ve buna bağlı olarak yolcu tahliye proseslerinin aksaması ile mahsur kalma yaralanma vb. riskler. | 2 | 2 | 15 | 60 | **5** |
| TURNİKE GRUPLARI | Turnikelerin devre dışı kalması ile yolcuların yoğunlaşması, tahliye süreçlerinin aksaması ve yolcu akışının bozulması vb. tehlikeler. | Yolcu tahliye süreçlerinin yavaşlaması, aksaması vb. ön görülebilir ve tolore edilebilir riskler. | 1 | 1 | 15 | 15 | **6** |
| ISITMA VE SOĞUTMA SİSTEMLERİ | Soğutma ve ısıtma sistemlerinin devreye alınamaması sonucu ortamın çok sıcak veya çok soğuk olması ile termal hava konforunun bozulması vb. tehlikeler. | İstasyon mahallerinin çok sıcak veya çok soğuk olması sonucu termal konfor ortamının sağlanamaması ile yolcularda geçici stres ortamı oluşması gibi tolore edilebilir riskler. | 1 | 1 | 15 | 15 | **6** |

Tablo 5.5. (Devam) Risk Analizi Tablosu

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| YÜRÜYEN MERDİVENLER | Yaşanan deprem esnasında yeryüzü veya istasyon mahallerindeki yürüyen merdivenlerin hasar alma durumu ihtimali düşünülerek yürüyen merdivenler servis dışı kalacaktır. | Yaşanan deprem esnasında yeryüzü veya istasyon mahallerindeki yürüyen merdivenlerin hasar alma durumu ihtimali düşünülerek yürüyen merdivenler servis dışı kalacaktır. | 1 | 3 | 3 | 9 | **6** |
| ASANSÖR GRUPLARI | Asansörler, deprem sırasında yapısal hasar, elektrik kesintisi veya acil durumu tespit edememe gibi risklerle karşılaşabilir. Asansörler servis dışı kalacaktır. | Asansörler, deprem sırasında yapısal hasar, elektrik kesintisi veya acil durumu tespit edememe gibi risklerle karşılaşabilir. Asansörler servis dışı kalacaktır. | 1 | 3 | 3 | 9 | **6** |

## 5.2. Ana Hattın ve İstasyonların Enerjisiz Kalma Durumu

M5 hattını 3 farklı koldan besleyen Teiaş girişlerinin enerjisinin kaybedilmesi ile her bir Teiaş giriş bölgesinde bulunan ve TGP (Teiaş Giriş Panoları) panolarına ait kesicilerin açık konumda ve kesicilerden "Kablo Enerjisiz" sinyalinin gelmesi durumu, hattın tamamen enerjisiz kaldığını göstermektedir. Bu adımda hattın komuta merkezi olan kumanda merkezindeki görevli operatöre uyarı ekranı gösterilir ve Jeneratör yarı otomatik senaryosunu başlatması (operatör onayı) beklenir.

## 5.3. Jeneratörün Devreye Alınması

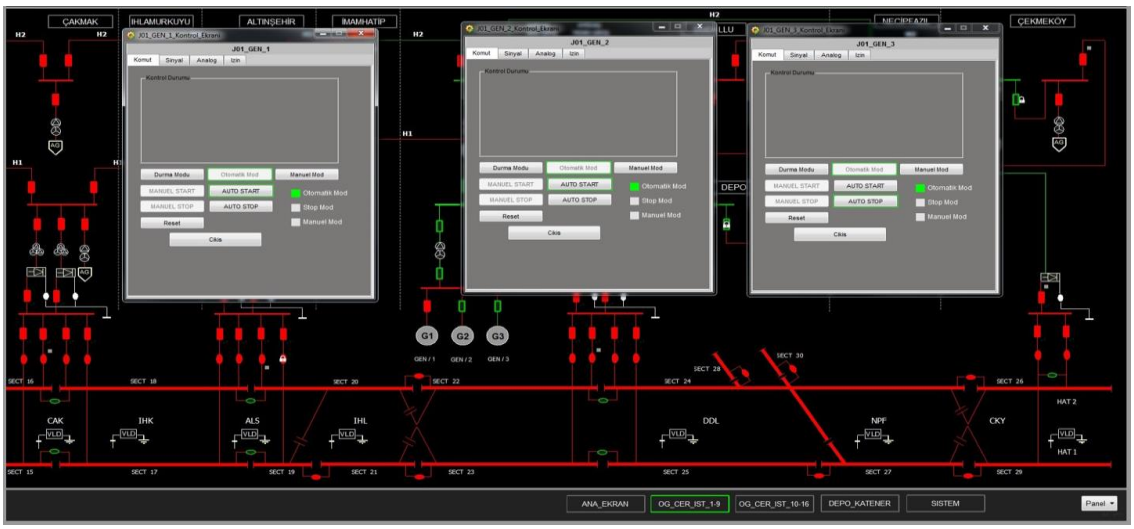
OG hattını besleyen Bağlarbaşı, Ümraniye, Dudullu AYEDAŞ giriş (Tüm TGP) kesicileri herhangi bir nedenden dolayı açılmışsa ve hat enerjisiz ise jeneratörlü İşletmeye geçilir. Bu durumlarda operatörü uyarmak ve hızlı bir şeklide müdahale etmesini sağlamak için SCADA'da "Jeneratör Yarı Otomatik Senaryosu" önerilir. Senaryonun başlatılması adımları aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır.

Şekil 5.2. M5 Jeneratör Senaryosu İçin SCADA Üzerindeki Onay - İptal Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

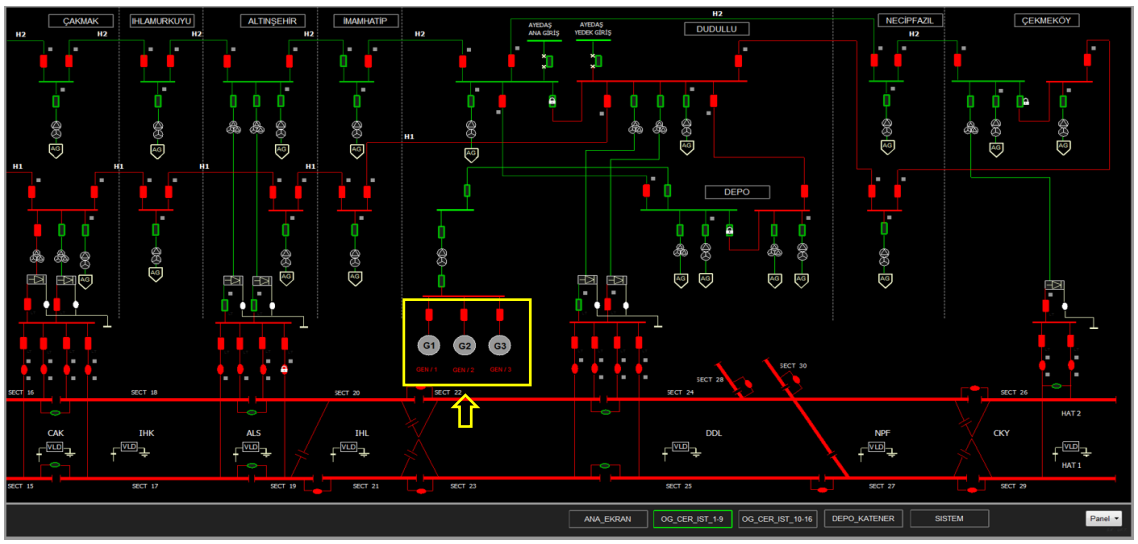
## 5.4. Jeneratörlerin Çalıştırılması

Hattın jeneratör üzerinden beslenmesi senaryosunda, enerji güvenliğinin sağlanması amacıyla ilk olarak TEİAŞ giriş panolarındaki kesiciler kilitlenir ve bu işlemle olası hata, kısa devre veya insan kaynaklı müdahalelerin önüne geçilmesi hedeflenir. Bu önleyici adım, jeneratörlerin güvenli bir şekilde devreye alınmasının temelini oluşturur. Kilitleme işlemi tamamlandıktan sonra SCADA operatörü tarafından yarı otomatik jeneratör senaryosu başlatılır ve her üç jeneratörün senkron bir şekilde çalışması beklenir. Jeneratörlerin ürettiği gerilim değerleri, Şekil 6.3'te belirtilen standart koşullara

ulaştığında SCADA ekranında "Hazır" durumu görüntülenir ve sistem operatörüne, jeneratörlerin stabil bir şekilde çalıştığı bilgisi iletilir. Bu kritik aşamada, TEİAŞ giriş panolarındaki kesicilerin açık durumda olması enerji akışının düzenli ve güvenli bir şekilde gerçekleşmesi için hayati önem taşır. Jeneratörler çalışmaya başladıktan sonra yükseltici transformatör devreye alınır ve enerji jeneratör binalarındaki orta gerilim güç baralarına aktarılır. Akabinde, jeneratör binalarındaki iç ihtiyaç servis trafolarının enerji beslemesi sağlanır; bu adım, operatör tarafından servis trafosu kesicisine gönderilen kapatma komutuyla tamamlanır.



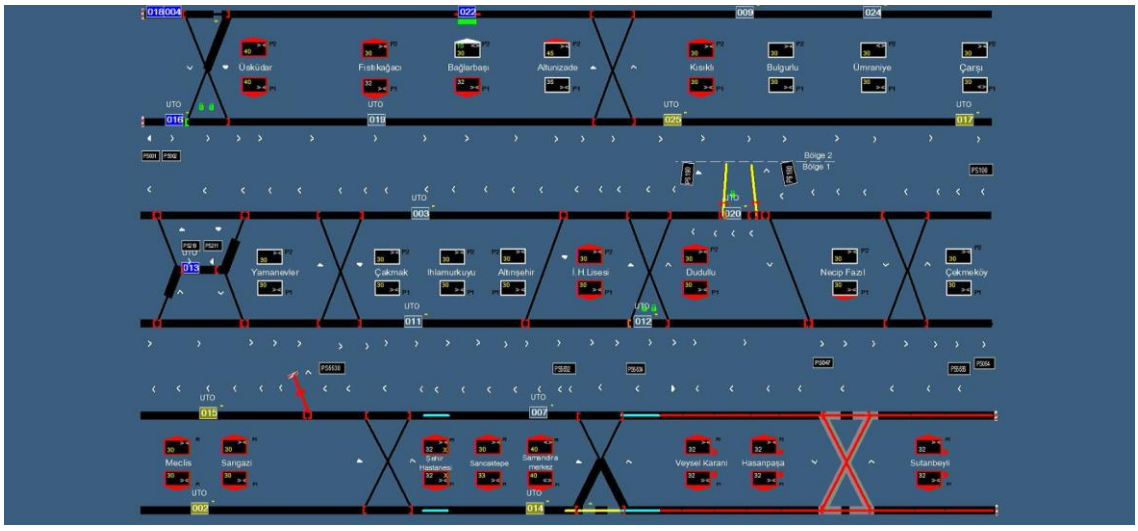

Şekil 5.3. M5 Jeneratör Senkronizasyon SCADA Görseli (İ.B.B. Metro İstanbul Acil Durum Jeneratörü Test ve Devreye Alma Raporu)




Şekil 5.4. M5 Jeneratör Grubu SCADA Görseli (İ.B.B. Metro İstanbul Acil Durum Jeneratörü Test ve Devreye Alma Raporu)

### 5.5. Hattın Enerjilendirilmesi

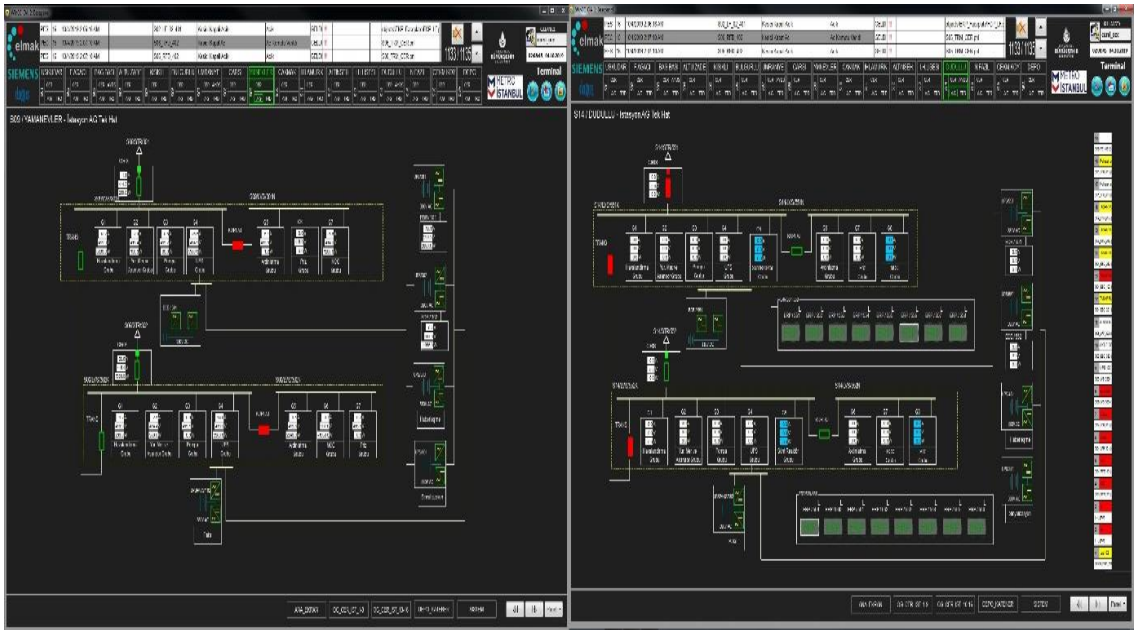
Servis trafosunun ring kesicisinin kapalı konuma getirilmesiyle birlikte, hattı besleyen orta gerilim baralarına enerji verilmiş olur. Bu adım, istasyonlar arasında enerji akışının başlatılması için kritik bir adımdır. İlk olarak, Çekmeköy, Altınşehir, Çarşı ve Fıstıkağacı istasyonlarındaki kesiciler devreye alınır. Bu kesiciler sırasıyla RCF (CER trafosu besleme kesicisi), INC (DC Giriş Kesicileri), LF (Hat Besleme Kesicisi) ve LBS (Yük Ayırıcı Panosu) kesicileri olup, her birinin kapalı konuma getirilmesi, sistemin düzgün çalışmasını ve enerji aktarımını sağlar. Enerjilendirme sürecinin bir sonraki aşaması, Fıstıkağacı İstasyonu üzerinden gerçekleşir. Buradaki OG bara üzerinden, yine RCF, INC, LF ve LBS pano kesicilerinin kapalı konuma alınması sağlanır. Bu işlemin tamamlanmasının ardından, Üsküdar - Çekmeköy hattı arası Hat1 ve Hat2 katener hatları enerji alarak çalışmaya başlar. Bu aşama, hattın enerjilendirilmesi ve tünel bölgesindeki trenlerin en yakın istasyona sevki için gerekli olan enerjinin sağlanmasıyla ilgilidir. Trenlerin hareketi, hem yarı otomatik hem de manuel modda süpürücü tren hızında sağlanır. Her bir tren için ayrı ayrı hareket sağlanarak, trenlerin en yakın perona ulaşmaları ve güvenli bir şekilde istasyonlara yönlendirilmeleri sağlanır. Son olarak, bu işlemler tüm hat boyunca enerji verilmesi ve trenlerin düzgün bir şekilde yönlendirilmesi için gerekli olan güvenlik önlemlerini içerir. Bu süreç, sistemin hızlı ve verimli bir şekilde yeniden çalışmaya başlamasına olanak tanır.




Şekil 5.5. M5 Ana Hat İşletme SCADA Görseli (http://172.22.160.240:8080) (Ziyaret tarihi: 1 Eylül 2024)

## 5.6. İç ihtiyaç Trafolarının Beslenmesi

Üsküdar İstasyonu'nun H2 (Hat 2) kolundaki STF/202 kesicilerinin kapalı konuma alınması, bölgedeki enerji yönetimi için kritik bir adımdır. Bu işlemin gerçekleştirilmesiyle birlikte, Üsküdar-Çekmeköy hattındaki iç ihtiyaç trafoları otomatik olarak devreye girer. Bu devreye girme, hattın tüm istasyonlarının enerji ihtiyacının transfer yöntemiyle karşılanmasını sağlar. Enerji aktarımı, istasyonlar arasındaki enerji dengesinin sağlanmasına ve her bir istasyonun elektriksel gereksinimlerinin karşılanmasına olanak tanır. Özellikle istasyonlarda elektrik kesintisi yaşanması durumunda, bu enerji transferi, operasyonların devamlılığını sağlamak için hayati önem taşır. Acil durum senaryoları, enerji sistemlerinin kararlı bir şekilde işlemesini gerektirir. Bu noktada, sağlanan enerji kaynağı, yalnızca günlük operasyonları değil, aynı zamanda acil durum tahliye senaryolarını da kapsar. İstasyonlardaki acil durum jeneratörleri, bu enerjiyi kullanarak yolcuların güvenli bir şekilde tahliye edilmesini sağlayacak ekipmanların çalışmasını sürdürür. Acil durum jeneratörleri, acil çıkış ışıkları, yönlendirme sistemleri, güvenlik ekipmanları gibi kritik sistemlerin devrede kalmasına olanak verir. İç ihtiyaç trafolarının SCADA görseli aşağıda yer almaktadır. (İ.B.B. Metro İstanbul Acil Durum Jeneratörü Test ve Devreye Alma Raporu)



Şekil 5.6. M5 İç İhtiyaç Trafoları SCADA Görseli (İ.B.B. Metro İstanbul Acil Durum Jeneratörü Test ve Devreye Alma Raporu)

### 5.7. Jeneratörün Devreden Çıkarılması

Metro hattının enerji ihtiyacının acil durum jeneratörleri ile karşılandığı bir senaryoda, yerel elektrik sağlayıcısı olan TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) tarafından hattın herhangi bir TGP (Traction Power Substation) giriş noktasına enerji aktarımı sağlanması durumunda, hattın tekrar normal işletme moduna geçirilmesi için belirli adımlar izlenir. Bu geçiş süreci, enerji sürekliliğini ve sistem kararlılığını korumak amacıyla titizlikle planlanmış bir prosedüre göre gerçekleştirilir. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi üzerinden hattın yarı otomatik jeneratör senaryosu sonlandırılır. Bu işlem, jeneratörlerin devreden çıkarılması ve hat üzerindeki tüm yüklerin yerel enerji kaynağına tekrar aktarılması sağlanır.

Şekil 5.7. M5 Yarı Otomatik Jeneratör Senaryosu Sonlandırma Ekranı (İ.B.B. Metro İstanbul M5 Hattı SCADA Ekranları)

### 5.8. Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Yönetimi İşlem Adımları

Tablo 5.6. M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları

| | M5 HATTI JENERATÖR SİSTEMİ YARI OTOMATİK SENARYOSU YÖNETİMİ İŞLEM | Evet | Hayır | Normal Operasyon |
|---|---|---|---|---|
| **1** | S03 / TGP / 251 "Kabloda enerji yok" sinyali görüldü | | | |
| **2** | S03/ TGP / 252 "Kabloda enerji yok" sinyali görüldü | | | |
| **3** | S07 / TGP / 251 "Kabloda enerji yok" sinyali görüldü | | | |
| **4** | S07 / TGP / 252 "Kabloda enerji yok" sinyali görüldü | | | |
| **5** | S14/ TGP / 551 "Kabloda enerji yok" sinyali görüldü | | | |
| **6** | S14/ TGP / 552 "Kabloda enerji yok" sinyali görüldü | | | |

Tablo 5.6. (Devam) M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **7** | Yarı otomatik senaryonun başlatılması (Operatör onayı) | | | |
| **8** | Enerji kesilmiştir. Lütfen tüm TGP kesicilerine kilit koyunuz | | | |
| **9** | S03/ TGP / 251 kilitlendi | | | |
| **10** | S03/ TGP / 252 kilitlendi | | | |
| **11** | S07 / TGP / 251 kilitlendi | | | |
| **12** | S07 / TGP / 252 kilitlendi | | | |
| **13** | S14/ TGP / 551 kilitlendi | | | |
| **14** | S14/ TGP / 552 kilitlendi | | | |
| **15** | Depo Jeneratörleri (GEN_01, GEN_02, GEN_03) SCADA Operatörü tarafından yarı otomatik çalıştırıldı. | | | |
| **16** | J01_GFD_202, J01_GFD_203, J01_GFD_204 kesicilerinin otomatik olarak kapalı konuma geçtiği görüldü. | | | |
| **17** | Jeneratör senaryosu aktif görüldü. | | | |
| **18** | Jo1 / ssc / zo1 açıldı. | | | |
| **19** | S14/ BSC / 551 açıldı | | | |
| **20** | S14/ TGP / 551 açıldı. | | | |
| **21** | S14/ TGP / 552 açıldı. | | | |
| **22** | S16/ BSC / 351 açıldı. | | | |
| **23** | S07 / TGP / 251 açıldı. | | | |
| **24** | S07 / TGP / 252 açıldı. | | | |
| **25** | S07 / BSC / 251 açıldı. | | | |
| **26** | S03/ TGP / 251 açıldı. | | | |
| **27** | S03 / TGP / 252 açıldı. | | | |
| **28** | S03/ BSC / 251 açıldı. | | | |

Tablo 5.6. (Devam) M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **29** | S03/ BSC / 251 açıldı. | | | |
| **30** | S01 / BSC / 251 açıldı. | | | |
| **31** | OG Ring hattı beslenmeye uygundur bilgisi SCADA ekranında görüldü. | | | |
| **32** | J01 / GTF / 201 kapatıldı. | | | |
| **33** | J01 / GTF / 202 kapatıldı. | | | |
| **34** | J01 / GTF / 203 kapatıldı. | | | |
| **35** | STF 201 beslemek için SCADA Operatörü tarafından J01/ STfi / 201 kesicisinin kapatılması için bir komut gönderildi. | | | |
| **36** | Çekmeköy ile Altınşehir arasından Altınşehir RFD /303 devre kesiciye kadar H2'den beslenen OG baralarında enerji görüldü. | | | |
| **37** | S12 RFD / 303 kapatıldı. | | | |
| **38** | S11 RFD / 304 kapatıldı. | | | |
| **39** | S07 RFD / 253 kapatıldı. | | | |
| **40** | SO6 RFD / 402 kapatıldı. | | | |
| **41** | Üsküdar İstasyonuna kadar olan H2'deki OG baralarında enerji görüldü. | | | |
| **42** | S16/ RCF / 351 kapatıldı. | | | |
| **43** | S16/ INC / 1-351 kapatıldı. | | | |
| **44** | S16/ LF / 1-351 kapatıldı. | | | |
| **45** | S16/ LF / 2-351 kapatıldı. | | | |
| **46** | S16/ LBS / 1-101 kapatıldı. | | | |
| **47** | S16/ LBS / 2-101 kapatıldı. | | | |
| **48** | S12 / RCF / 301 kapatıldı. | | | |
| **49** | S12 / RCF / 302 kapatıldı. | | | |
| **50** | S12/ INC / 1-301 kapatıldı. | | | |

Tablo 5.6. (Devam) M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **51** | S12 / INC / 2-301 kapatıldı. | | | |
| **52** | S12 / LF / 1-301 kapatıldı. | | | |
| **53** | S12 / LF / 2-301 kapatıldı. | | | |
| **54** | S12 / LF / 51-301 kapatıldı. | | | |
| **55** | S12 / LF / 52-301 kapatıldı. | | | |
| **56** | S12 / LBS / 1-101 kapatıldı. | | | |
| **57** | S12 / LBS / 2-101 kapatıldı. | | | |
| **58** | S12 / LBS / 51-101 kapatıldı. | | | |
| **59** | S12 / LBS / 52-101 kapatıldı. | | | |
| **60** | S08/ RCF / 301 kapatıldı. | | | |
| **61** | S08 / RCF / 302 kapatıldı. | | | |
| **62** | S08/ INC / 1-301 kapatıldı. | | | |
| **63** | S08/ INC / 2-301 kapatıldı. | | | |
| **64** | S08/ LF / 1-301 kapatıldı. | | | |
| **65** | S08/ LF / 2-301 kapatıldı. | | | |
| **66** | S08/ LF / 51-301 kapatıldı. | | | |
| **67** | S08/ LF / 52-301 kapatıldı. | | | |
| **68** | S08 / LBS / 1-101 kapatıldı. | | | |
| **69** | S08/ LBS / 2-101 kapatıldı. | | | |
| **70** | S08/ LBS / 51-101 kapatıldı. | | | |
| **71** | S08/ LBS / 52-101 kapatıldı. | | | |
| **72** | S06/LBS22/101 kapatıldı. | | | |

Tablo 5.6. (Devam) M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **73** | S06/LBS11/101 kapatıldı. | | | |
| **74** | S04/LBS22/101 kapatıldı. | | | |
| **75** | S04/LBS11/101 kapatıldı. | | | |
| **76** | S02 / RCF / 401 kapatıldı. | | | |
| **77** | S02 / RCF / 402 kapatıldı. | | | |
| **78** | S02 / INC / 1-401 kapatıldı. | | | |
| **79** | S02 / INC / 2-401 kapatıldı. | | | |
| **80** | S02 / LF / 1-401 kapatıldı. | | | |
| **81** | S02 / LF / 2-401 kapatıldı. | | | |
| **82** | S02 / LF / 51-401 kapatıldı. | | | |
| **83** | S02 / LF / 52-401 kapatıldı. | | | |
| **84** | S02 / LBS / 1-101 kapatıldı. | | | |
| **85** | S02/ LBS / 2-101 kapatıldı. | | | |
| **86** | S02 / LBS / 51-101 kapatıldı. | | | |
| **87** | S02/ LBS / 52-101 kapatıldı. | | | |
| **88** | İç ihtiyaç trafoları enerjilendirilmiştir. | | | |
| **89** | Çekmeköy istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 351 kapatıldı. | | | |
| **90** | Necip Fazıl istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 351 kapatıldı. | | | |
| **91** | Dudullu istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 551 kapatıldı. | | | |
| **92** | lmam hatip Lisesi istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 451 kapatıldı. | | | |
| **93** | Altınşehir istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 302 kapatıldı. | | | |
| **94** | Ihlamurkuyu istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 302 kapatıldı. | | | |

Tablo 5.6. (Devam) M5 Hattı Jeneratör Sistemi Yarı Otomatik Senaryo Adımları

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **95** | Çakmak istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 301 kapatıldı. | | | |
| **96** | Yamanevler istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 302 kapatıldı. | | | |
| **97** | Çarşı istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 301 kapatıldı. | | | |
| **98** | Ümraniye istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 252 kapatıldı. | | | |
| **99** | Bulgurlu istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 401 kapatıldı. | | | |
| **100** | Kısıklı istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 302 kapatıldı. | | | |
| **101** | Altunizade istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 301 kapatıldı. | | | |
| **102** | Bağlarbaşı istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 252 kapatıldı. | | | |
| **103** | Fıstıkağacı istasyonunun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 402 kapatıldı. | | | |
| **104** | Üsküdar istasyonun H2 kolundaki (Hat 2) STF / 2S2 kapatıldı. | | | |
| **105** | Tüm ihtiyaç trafoları beslendi. | | | |

⇒ SCADA sistemi üzerinden hattın enerji durumu sürekli izlenir.

⇒ Enerji kesintisi doğrulandıktan sonra, SCADA operatörü yarı otomatik senaryoyu başlatmak için onay verir.

⇒ Hattaki tüm TGP kesicileri fiziksel olarak kilitlenir. Kilitleme işlemi, bakım ekipleri ve diğer personelin güvenliğini sağlamak için yapılır.

⇒ Depo jeneratörleri SCADA üzerinden yarı otomatik modda devreye alınır. Jeneratörlere bağlı kesiciler otomatik olarak kapalı konuma geçer ve enerji hattına güvenli bir şekilde bağlanır.

⇒ OG ring hattı üzerinden enerji dağıtımı başlatılır. H2 hattındaki istasyonlar sırasıyla beslenir, ilgili kesiciler açılıp kapatılır. Kesicilerin açılma ve kapanma işlemleri, enerji akışını optimize edecek şekilde planlanır

⇒ Senaryo tamamlandıktan sonra sistem normale döner ve operasyon kesintisiz şekilde devam eder.

# 6. M5 HATTI JENERATÖRÜ MATLAB – SİMULİNK SİMÜLASYONU

## 6.1. Simülasyonun Amacı ve Kapsamı

Bu simülasyonun amacı, M5 metro hattında kullanılan jeneratör sisteminin gerçek saha verilerine dayalı bir modellemesini gerçekleştirmek ve bu model üzerinden farklı yük senaryolarında jeneratörlerin enerji üretim performansını risk analizi metodolojisi çerçevesinde değerlendirmektir. Çalışmada, sistemin risk tabanlı yük yönetim modeli oluşturulmuş ve her bir yükün aciliyet derecesi, enerji kesintilerine dayanıklılığı ve operasyonel önemi göz önünde bulundurularak sınıflandırılmıştır.

Risk analizi kapsamında yükler üç öncelik grubuna ayrılmıştır: Hayati sistemler (öncelik sırası: 1), orta öncelikli yükler (öncelik sırası: 2) ve düşük öncelikli yükler (öncelik sırası: 3). Bu sınıflandırmada, hayati sistemler grubuna tren yükleri ve temel güvenlik sistemleri dahil edilmiştir. Bu yükler, metro hattının temel güvenlik ve operasyonel süreçlerini sürdürebilmesi için kritik öneme sahiptir ve acil durumlarda ilk olarak devreye alınmaktadır. Orta öncelikli yükler grubunda, havalandırma yükleri ve pompa grubu gibi kısa süreli kesintilere dayanabilen, ancak konfor ve sistem güvenliği açısından önemli olan yükler yer almaktadır. Düşük öncelikli yükler sınıfında ise hafif yükler ve konfor amaçlı sistemler (örneğin, reklam panoları, bazı aydınlatma ve yardımcı tesisler) bulunmaktadır. Bu yükler, enerji kesintilerinden daha az etkilenirler ve sadece sistemin enerji yeterliliği sağlandığında devreye alınmıştır.

Simülasyon, her yükün sisteme olan etkilerinin analiz edilmesi, jeneratörlerin yük değişimlerine uygun çalışma yeteneklerinin değerlendirilmesi ve enerji yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her yükün sisteme dahil edilmesi veya çıkarılması durumunda jeneratörlerin enerji üretim kapasiteleri ve dinamik tepkileri detaylı olarak incelenmiştir. Jeneratörlerin farklı yük senaryolarında sağladığı tepkiler incelenmiş ve sistemin saha koşullarına uyumluluğu test edilmiştir. Risk tabanlı yük yönetimi sayesinde jeneratörlerin hangi yükleri hangi sırayla beslemesi gerektiği belirlenmiş ve jeneratörlerin adaptasyon hızı ile verimliliği artırılmıştır. Bu sistem, acil durumlarda operasyonel sürekliliği ve enerji yönetimini daha etkin bir şekilde sağlamak için tasarlanmıştır. Tüm bu kurgu Şekil 6.7.' de görülmektedir.

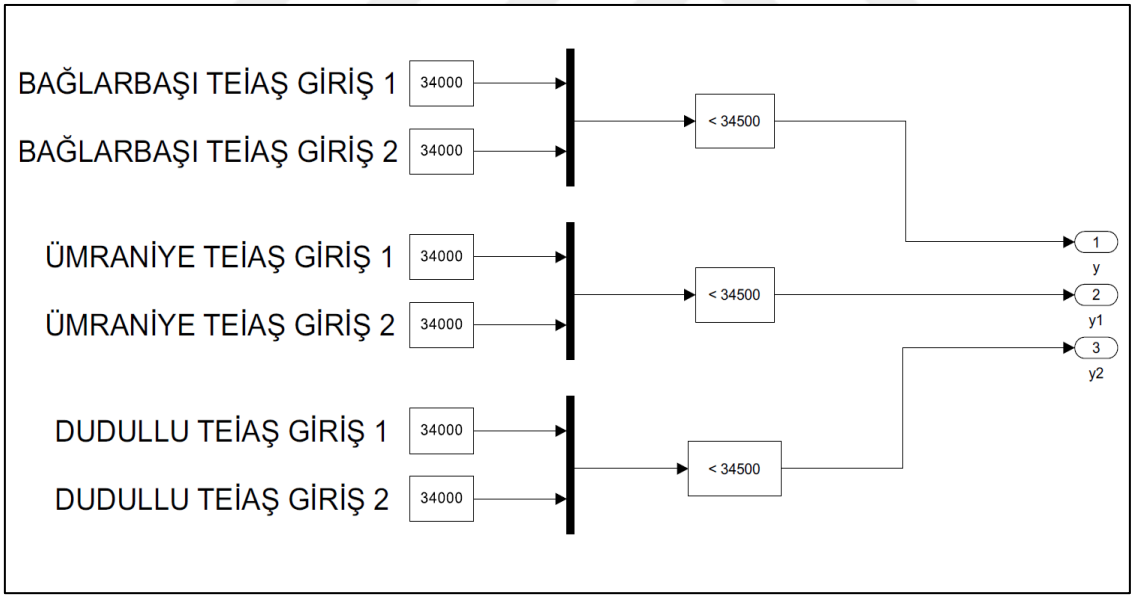
## 6.2. Simülasyon Sisteminin Modelleme Mantığı ve Tasarım Bileşenleri

Hattı 3 farklı koldan besleyen TEİAŞ giriş noktalarındaki enerji akışları, sistemin devamındaki mantık denetleyicisi tarafından sürekli olarak izlenmektedir. Hattı besleyen her üç koldaki enerjinin herhangi bir sebeple kesilmesi durumunda, bu durum sinyallerin "1" olarak algılanmasına yol açmakta ve jeneratör sisteminin devreye girmesi için kumanda merkezine yarı otomatik jeneratör senaryosu uyarısı gönderilmektedir. Bu süreç, enerji sürekliliğinin sağlanması ve olası kesintilerin minimize edilmesi için kritik bir mekanizma sunmaktadır. Bu simülasyon, birden fazla yükün (tren yükü, havalandırma yükleri, pompalar vb.) ayrı ayrı kontrol edilmesini ve jeneratörlerin toplam yük taleplerine uygun olarak çalışmasını sağlamayı hedefler. Her yük, kendi kontrol mekanizmasıyla devreye alınabilir veya devre dışı bırakılabilir. Yüklerin aktifliği, mantık sinyalleriyle (1 ve 0) belirlenir ve jeneratörlerin PM (güç yönetimi) sinyalini uygun şekilde şartlandırarak enerji üretimini optimize etmektedir. Sistemin başlangıcında, Kumanda Merkezi Yarı Otomatik Jeneratör Senaryosu Kontrolü, jeneratörlerin çalışma durumlarını belirleyen temel bir bileşen olarak devreye alınmıştır. Bu kontrol mekanizması, TEİAŞ hattı kontrol bloğundan gelen 1 sinyalini ilk olarak alır ve jeneratör senaryosunu aktif veya pasif hale getirir. Kumanda merkezi tarafından verilen kararlar sonucunda jeneratörler ya çalıştırılır ya da kapatılır. Ayrıca, sistemde alternatif bir çalışma modu olarak tasarlanan Yarı Otomatik Jeneratör Senaryosu Kontrol Yedek Oturumu, ihtiyaç halinde devreye alınabilir. Her yük için sabit bir PM değeri atanmış ve bu değerler, yüklerin enerji taleplerine göre belirlenmiştir. Her yükün aktiflik durumu, mantık kapıları (AND) ile jeneratör kontrol senaryolarına bağlanmıştır. Yüklerin aktif edilmesi veya devre dışı bırakılması, PM sinyallerini etkileyerek jeneratörlerin güç üretimini düzenler. Mantık bloğundan çıkan kararlar neticesinde, tüm yüklerden gelen PM değerleri bir toplama bloğu (SUM) ile birleştirilmiştir. Bu şekilde, jeneratörlere iletilen toplam PM sinyalleri sayesinde, üretilen yük ile tüketilen yük arasında bir optimizasyon sağlanmıştır. Simülasyon sürecinde, sistemdeki 3 Fazlı Analiz Kontrol Bloğu, hem yüklerin pozisyonlarını şartlandırmış hem de sisteme ait aktif ve reaktif güç değerlerini ölçmüştür. Bu ölçümler, sistemin performansını sürekli izlemek ve enerji üretim-tüketim dengesini sağlamak için kritik bir rol oynamıştır. Üretilen güç, mantık sinyalleriyle devreye alınan istenilen yükler arasında paylaştırılmış ve böylece sistemin enerji sürekliliği sağlanmıştır. Bu yapı, yüklerin bağımsız bir şekilde kontrol edilmesini

ve jeneratörlerin toplam sistem ihtiyaçlarına uygun şekilde çalışmasını mümkün kılmıştır. Sistem tasarımı, hem manuel hem de yarı otomatik kontrol senaryolarını destekleyerek, enerji yönetiminin dinamik bir şekilde optimize edilmesine olanak tanımıştır. Simülasyon boyunca, jeneratörlerin yük taleplerine verdiği tepkiler gözlemlenmiş ve sistemin tüm süreçleri başarıyla modellenmiştir.

### 6.2.1. TEİAŞ Giriş Noktaları

Sistemin ilk adımı, enerji akışının izlendiği üç farklı TEİAŞ giriş noktasıdır. Bu noktalar; Bağlarbaşı, Ümraniye ve Dudullu Teiaş Giriş Noktalarıdır. Şekil 6.1.' de görüldüğü üzere; hattı 3 farklı koldan besleyen bu giriş noktalarındaki enerji akışları, sistemin devamındaki mantık denetleyicisi tarafından sürekli izlenmektedir. Hattı besleyen her 3 koldaki enerjinin herhangi bir sebeple kesilmesi durumunda, sinyaller "0" olarak algılanmakta ve jeneratör sisteminin devreye girmesi için kumanda merkezine yarı otomatik jeneratör senaryosu uyarısı gelmektedir.

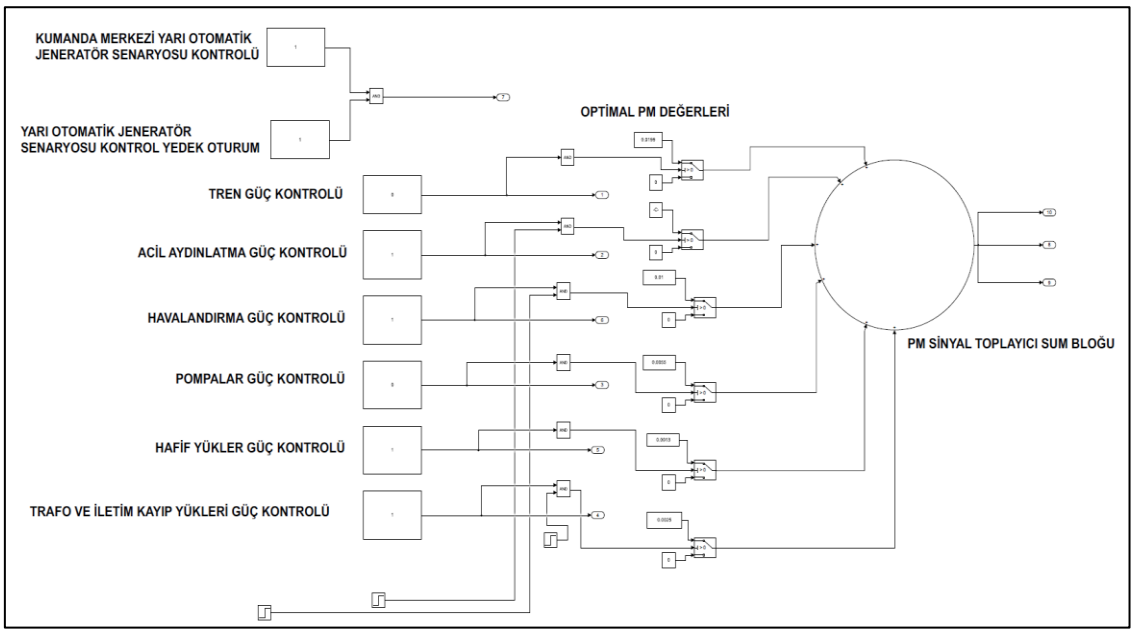



Şekil 6.1. M5 Metro Hattı Ana Hat Teiaş Bağlantı Hattı

### 6.2.2. M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Kontrol Bloğu

Şekil 6.2' de görülen M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Kontrol Bloğu, birden fazla yükün (tren yükü, havalandırma yükleri, pompalar vb.) ayrı ayrı kontrol edilmesini ve jeneratörlerin toplam yük taleplerine uygun olarak çalışmasını sağlamak için

tasarlanmıştır. Her bir yükün devreye alınması, mantık sinyalleriyle (1 ve 0) belirlenmektedir. Jeneratörlerin talep edilen yük miktarı kadar güç üretmesi, jeneratörlerin PM girişi ile sağlanmaktadır. Her bir yük için talep miktarına göre bir PM sinyali atanmıştır. Bu sinyallere ait değerler sistemin talep ettiği yük miktarına göre simülasyonda deneme yanılma yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu hesaplama sürecinde, tüm yükler bir Sum bloğu aracılığıyla birleştirilmekte ve jeneratörlerin PM girişine iletilmektedir. Böylece jeneratörlerin üreteceği toplam güç, aktif olan yüklerin toplamına göre dinamik olarak ayarlanmaktadır. Bu yöntem, sistemin enerji talebine göre optimal bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Sum bloğunun kullanılması, her bir yükün ayrı ayrı değerlendirilmesi yerine, toplam yük değerinin jeneratörlerin üretim kapasitesiyle doğrudan ilişkilendirilmesine olanak tanımıştır. Bu sayede jeneratörlerin güç üretimi, aktif olan yüklerin toplamına göre otomatik olarak ayarlanmakta ve sistemin dengeli bir şekilde çalışması sağlanmaktadır. Bu blokta yer alan kumanda merkezi yarı otomatik jeneratör senaryosu, mantık "1" sinyali aldığında genel sistem aktif edilmektedir veya mantık "0" sinyali ile simülasyon sonlandırılmaktadır. Bunun yanında, yarı otomatik jeneratör senaryosu kontrolü sistemde ayrıca yedeklenmiştir. Bu yedekleme sayesinde olası bir kontrol hatasında sistemin sürekliliği garanti altına alınmaktadır. Ayrıca, jeneratörlerin senaryoya uygun olarak devreye girip çıkması, enerji verimliliğini artırmakta ve kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır.




Şekil 6.2. M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Kontrol Bloğu

### 6.2.3. Jeneratörleri Kontrol Eden Mantık Bloğu

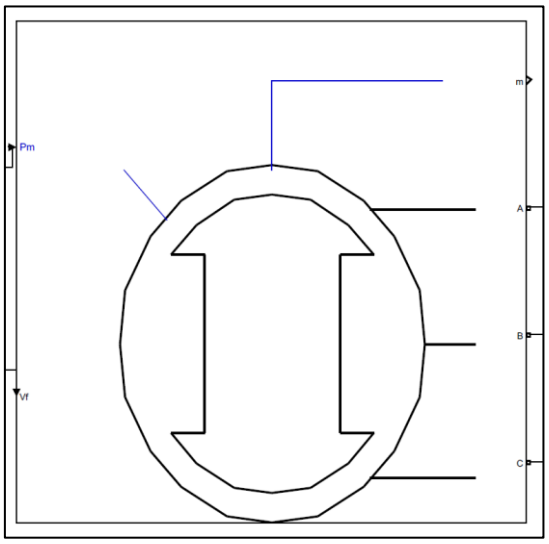
Bu blok içeriğinde, uyarım gerilim kapısı girişi, jeneratörlerin aktif veya pasif edilmesini kontrol etmektedir. Şekil.6.3.' de görüldüğü üzere; jeneratörlerin mekanik güç girişi, kontrol bloğundan gelen optimal PM (mekanik güç) değerleri ile şartlandırılarak yük taleplerine göre güç üretimini optimize etmektedir. Her yük, jeneratörden farklı bir güç talep ettiğinden, kontrol bloğu jeneratörlerin PM değerlerini dinamik olarak ayarlayarak talep edilen gücü hassas bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır.

Şekil.6.3. Jeneratör Kontrol Bloğu

### 6.2.4. Jeneratörler

Senkron jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir ve alternatör olarak da adlandırılırlar. Çalışma prensipleri, Faraday'ın Elektromanyetik İndüksiyon Yasası'na dayanır. Bir türbin veya motor tarafından tahrik edilen ve üzerindeki sargılara DC gerilim uygulanan jeneratör rotoru, stator sargılarında alternatif gerilim indüklenmesini sağlar. M5 Metro hattında, Dudullu Yerleşke Jeneratör 1, Dudullu Yerleşke Jeneratör 2 ve Dudullu Yerleşke Jeneratör 3 olmak üzere üç adet jeneratör bulunmaktadır. Bu jeneratörler, enerji ihtiyacına göre tam senkronize şekilde eşzamanlı çalıştırılmaktadır. Senkronizasyon sürecinde, jeneratörlerin çıkış gerilimleri, frekansları ve faz açıları birbiriyle uyumlu hale getirilir. Jeneratörlerin enerji üretimi PM (Mechanical Power - Mekanik Güç Girişi) ve VF (Field Voltage - Alan Gerilimi Girişi) parametreleri üzerinden kontrol edilmektedir. PM (Mekanik Güç Girişi), jeneratöre uygulanan mekanik gücü ifade eder ve üretilen aktif gücü (P) belirler. Yük talebine göre jeneratörün çıkış gücü bu giriş üzerinden ayarlanır. VF (Alan Gerilimi Girişi) ise

jeneratörün uyarma gerilimini kontrol eder. VF değerinin dinamik olarak optimize edilmesi, jeneratörlerin yük değişimlerine hızlı yanıt vermesini sağlar ve sistemin enerji verimliliğini artırır. Jeneratörlerin çalıştırılması ve yönetimi, M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Kontrol Bloğu tarafından gerçekleştirilir. Sistemin çalışma mantığı şu şekildedir: Mantık 1 (ON) sinyali, kumanda merkezinde yarı otomatik jeneratör senaryosunu tetikler ve jeneratörler belirlenen kurallara göre devreye girer. Mantık 0 (OFF) sinyali ise simülasyonun sonlandırılmasını sağlar ve jeneratörler devreden çıkar. Bu kontrol mekanizması, gerektiğinde manuel müdahaleye izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece, jeneratörler talebe duyarlı, güvenilir ve verimli bir şekilde çalıştırılabilir. Ayrıca, sistemin sürekli izlenmesi ve yük yönetiminin optimize edilmesi gerekmektedir. Jeneratörlerin çalışma durumları ve çıkış verileri şu şekilde tanımlanmıştır: A, B, C çıkışları jeneratörlerin üç fazlı çıkış gerilimlerini ifade eder. Jeneratörlerin aşırı yüklenmesini önlemek için sistemde sürekli yük yönetimi yapılmaktadır. Jeneratörlere ait tasarım verileri, Tablo 6.1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Ayrıca, her jeneratörün üretim kapasitesi belirli bir eşik değerin üzerine çıktığında sistem, yüklerin öncelik sırasına göre yeniden yapılandırılmasını sağlamaktadır. Bu sayede, hem enerji verimliliği artırılmakta hem de jeneratör ömrünün uzatılması hedeflenmektedir. SCADA üzerinden gerçekleştirilen bu izleme ve kontrol süreçleri, operatörlerin anlık müdahale edebilmesini kolaylaştırmakta ve sistemin esnekliğini artırmaktadır.



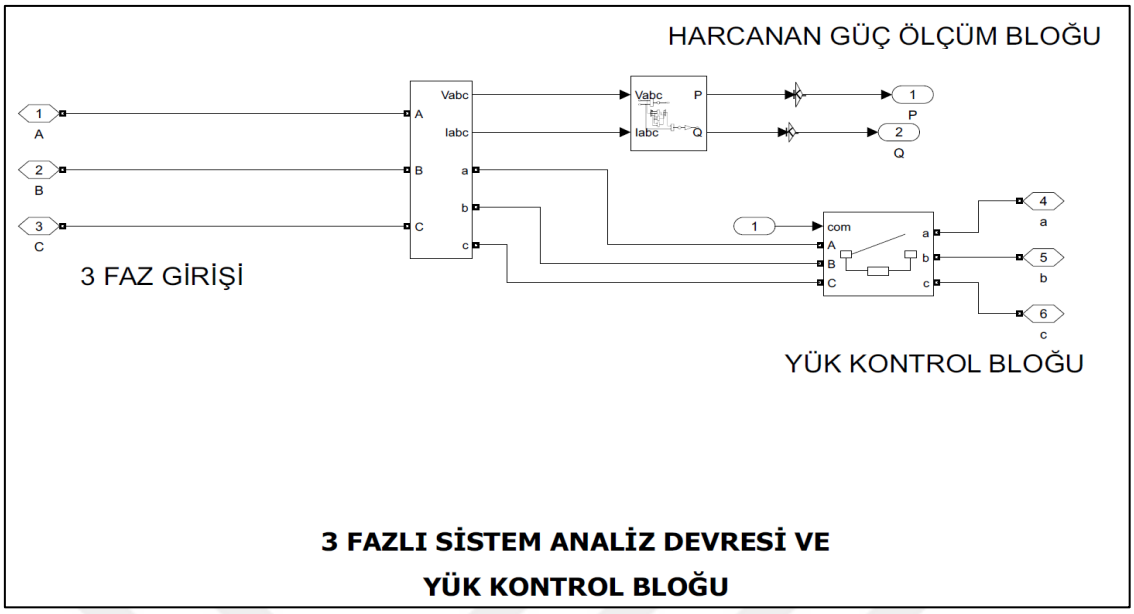

Şekil 6.4. Her Biri 2 MVA Görünür Güce Sahip Jeneratörler

Tablo 6.1. Simülasyon Jeneratör Parametreleri

| Parametre | Değer | Açıklama |
|---|---|---|
| **Nominal Güç (Pn)** | 2 MW (2000000 W) | Jeneratörün üretebileceği maksimum aktif güç. |
| **Nominal Gerilim (Vn)** | 10.000 V (Vrms) | Jeneratörün nominal gerilim değeri. |
| **Frekans (fn)** | 50 Hz | Jeneratörün şebeke ile uyumlu çalışma frekansı. |
| **Rotor Tipi** | Round (Silindirik) | Stabil çalışma için kullanılan rotor tipi. |
| **Mechanical Input** | Mechanical power (Pm) | Jeneratör mekanik gücü giriş olarak alır. |
| **Reaktanslar (Xd, Xd', Xd'', Xq, Xq', Xq'', Xl)** | 1.000, 0.003, 0.0023, 1.0076, 0.0065, 0.0025, 0.0015 | d ve q ekseni reaktans değerleri; manyetik devre tepkilerini temsil eder. Kaçak reaktans (Xl) da bu gruba dahildir. |
| **d Eksen Zaman Sabitleri (Td, Td', Td'')** | 1.3201 s, 0.0231 s, 0.3371 s | Jeneratörün kısa devre durumlarındaki d ekseni dinamik tepkileri. |
| **q Eksen Zaman Sabitleri (Tq, Tq')** | 0.3371 s, 0.0295 s | Jeneratörün kısa devre durumlarındaki q ekseni dinamik tepkileri. |
| **Stator Direnci (Rs)** | 0 (pu) | Stator sargısının direnci (ideal durum). |
| **Inertia Coefficient (H)** | 0.1028 | Jeneratörün rotor atalet katsayısı; enerji değişim dinamiklerini ifade eder. |
| **Friction Factor (F)** | 0.02056 | Rotor sürtünme katsayısı. |
| **Pole Pairs (p)** | 2 | Rotorun kutup çiftleri. |
| **Doygunluk Katsayıları (ifd, vt)** | [956, 1.082, 1.19, 1.316, 1.457; …; 1.151, 1.201] | Jeneratörün manyetik doygunluk seviyelerinde davranışını simüle etmek için kullanılan katsayılar. |
| **Yük Türü** | PV | Jeneratör, aktif güç ve gerilim büyüklüğünü kontrol eder. |
| **Üretilen Aktif Güç (P)** | 2 MW (2000000 W) | Şebekeye sağlanan aktif güç. |
| **Minimum Reaktif Güç (Qmin)** | Sınırsız (inf) | Minimum reaktif güç sınırı belirtilmemiştir. |
| **Maksimum Reaktif Güç (Qmax)** | Sınırsız (inf) | Maksimum reaktif güç sınırı belirtilmemiştir. |
| **Saturation (Doygunluk)** | Simülasyon dahil | Jeneratörün manyetik doygunluk etkisi simüle edilmiştir. |
| **Ölçüm Verisi (Measurement Bus)** | Devre dışı | Sinyal etiketleri kullanılmamıştır. |

### 6.2.5. Üç fazlı Sistem Aktif-Reaktif Güç Ölçüm Devresi ve Yük kontrol Bloğu

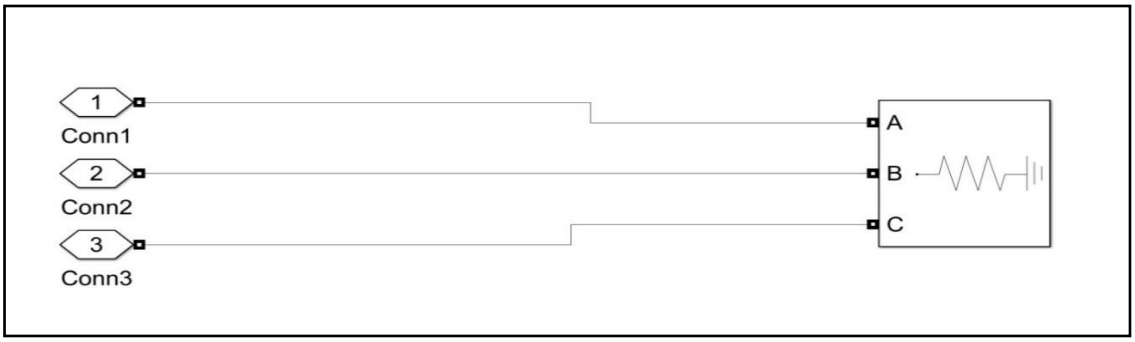
Şekil 6.5.' de yer alan bu blokta üç fazdan gelen enerji sinyalleri, sistemin anlık güç durumunu analiz edebilmek amacıyla harcanan güç ölçüm bloğuna yönlendirilir. Ölçüm bloğu, gelen sinyaller üzerinden aktif (P) ve reaktif (Q) güç değerlerini hesaplayarak, sistemin enerji tüketim profili hakkında gerçek zamanlı veri üretir. Bu veriler, sistemin genel enerji dengesi açısından kritik bir rol oynar. Ölçülen güç değerleri, yük kontrol bloğuna iletilerek burada yüklerin enerji talepleriyle karşılaştırılır ve sistemin mevcut üretim kapasitesiyle uyumlu olup olmadığı değerlendirilir. Yük kontrol bloğu, bu analiz sonucunda hangi yüklerin devreye alınacağına ya da devreden çıkarılacağına karar verir. Bu karar verme sürecinde ikili mantık sinyalleri (1 ve 0) kullanılır; "1" sinyali ilgili yükün aktif olduğunu, "0" ise pasif durumda olduğunu belirtir. Bu mantıksal yapı sayesinde yüklerin pozisyonları otomatik olarak şartlandırılır ve sistemin dinamik ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde güncellenir.



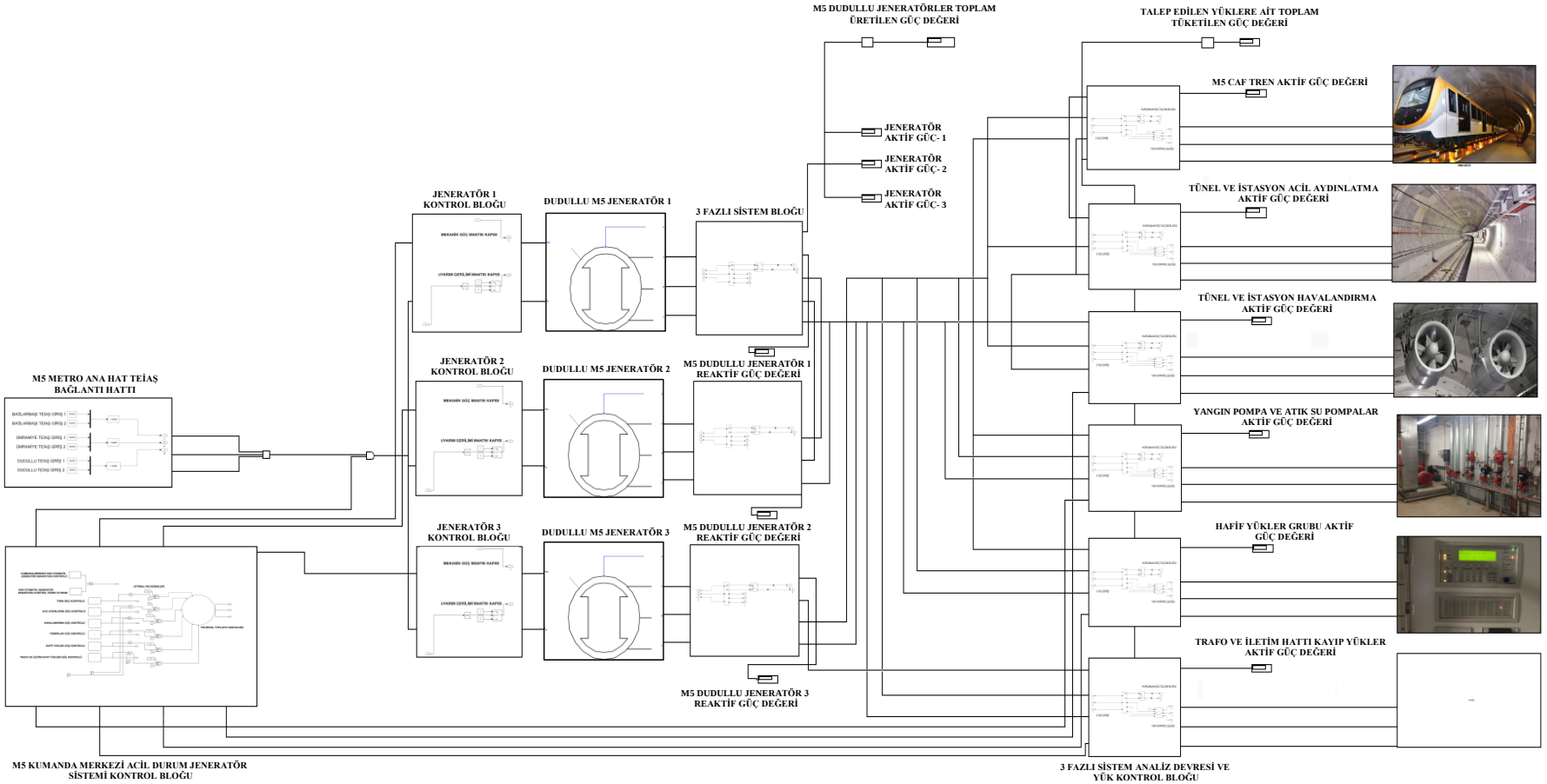

Şekil 6.5. Üç fazlı Sistem Analiz Devresi ve Yük Kontrol Bloğu

### 6.2.6. Yük kontrol Blokları

Simülasyonda her bir yük bileşeni için ayrı ayrı olarak Üç Fazlı Paralel RLC Yük bloğu kullanılmıştır. Şekil 6.6.' da yer alan bu blok, yüklerin gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlayarak sistemdeki aktif ve reaktif güç tüketimlerini simüle etmektedir. Jeneratörlerin bu yükleri nasıl beslediğini analiz etmek ve yüklerin dinamik değişimlerine göre sistemin davranışını incelemek için kritik bir bileşen olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, yüklerin elektriksel özelliklerini (rezistif, endüktif, kapasitif) temsil ederek, sistemde güç akışı ve denge analizi yapılmasına olanak tanır.




Şekil 6.6. Yük Blokları




Şekil.6.7. M5 Hattı Acil Durum Jeneratörleri Matlab-Simulink Simülasyonu

### 6.3. Enerji Dağıtımı ve Yük Profilleri Kurgusu

Jeneratörlerden sağlanan enerji, acil durum senaryolarında devreye alınması gereken sistemleri besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Yük profillerinin hepsi kontrol mekanizmasından gelen şartlandırılmış sinyaller doğrultusunda ayrı ayrı devreye alınmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, her yükün enerji gereksinimi ve önceliği bireysel olarak değerlendirilmiş, jeneratörlerin verimli ve dengeli bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Jeneratör modeli olarak her biri 2 MVA görünür güce sahip jeneratörler, yük taleplerine göre enerji üretimini optimize edecek şekilde modellenmiştir. Yük Kontrol Sistemleri olarak altı farklı yük (tren yükü, havalandırma yükleri, pompa grubu yükleri, aydınlatma yükleri, trafo ve iletim hattı kayıp yükleri ve hafif yükler) bağımsız olarak kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmıştır.

### 6.4. Giriş ve Çıkış Verilerinin Tanımlanması

Bu bölümde simülasyonda kullanılan giriş parametreleri, senaryolar ve sistem bileşenlerinin ilişkileri detaylandırılmaktadır. Aşağıdaki alt başlıklar altında, simülasyon kurgusuna özgü sayısal detaylar adım adım açıklanmıştır.

#### 6.4.1. Teiaş Giriş Verilerinin Sağlanması

Enerji kesintisi, sistemin üç ana TEİAŞ giriş noktasından (Bağlarbaşı, Ümraniye, Dudullu) enerji sağlanamadığı durumda tetiklenmektedir. Simülasyonda, TEİAŞ enerji kaynaklarının tamamen devre dışı bırakıldığı bir senaryo ele alınmıştır. Bu senaryo, enerji algılama sensörlerinden gelen sinyallerin hattı beslemesi gereken 34.500 Volt AC gerilim değerini sağlayamadığı durumda (algılama çıkış sensörleri hattın ihtiyacı olan 34.500 Volt AC değerine şartlandırılmıştır, simülasyonda kurgu gereğince ilk algılama sensörleri 34.000 Volt AC değerine ayarlanmıştır) düşmesi ile "1" sinyali değerine dönmesiyle başlar. Bu "1" değeri, sistemin enerji kaynağında bir kesinti olduğunu işaret eder ve jeneratör senaryosunun başlatılması için tetikleyici görev görür. TEİAŞ giriş noktalarından enerji kaybı, sistem kontrol bloğuna ulaşan sinyaller üzerinden sürekli izlenmekte ve bu sinyallerin analiziyle kesintinin süresi, frekansı ve şiddeti gibi parametreler de değerlendirmeye alınmaktadır.

### 6.4.2. Tren Enerjisi İhtiyacı

Sistem mimarisi, aynı anda yalnızca tek bir trenin hareketini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir tren setinde 16 adet motor bulunmakta olup, toplam enerji ihtiyacı 2.320 kW olarak belirlenmiştir. Ayrıca, her trende 2 adet yardımcı güç sistemi bulunmaktadır ve bu sistemlerin toplam enerji ihtiyacı 240 kW' dır. Her iki sistemin maksimum enerji tüketimi ise toplamda 2.56 MW olarak hesaplanmıştır, bu hesaplama Şekil 6.10.' da görülmektedir.

### 6.4.3. Havalandırma Sistemleri Enerji İhtiyacı

Bu yük, enerji kesintisi süresince kesintisiz çalışacak şekilde tanımlanmıştır. Havalandırma sistemleri, %70 performansta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Her iki istasyon arasında aktif olarak 8 adet TVF devreye alınacak olup, toplam enerji tüketimi 660 kW olarak hesaplanmıştır. Her istasyonda bir adet EXF devreye alınacak ve bu sistemin toplam enerji tüketimi 268 kW olacaktır. Ayrıca her istasyonda bir adet INF devrede olacak şekilde toplamda 16 INF için enerji tüketimi 201 kW olarak belirlenmiştir. Havalandırma sistemlerinin toplam enerji tüketimi ise 1.128 MW olarak hesaplanmıştır, bu hesaplama Şekil 6.10.' da görülmektedir.

### 6.4.4. Acil Aydınlatma Sistemleri Enerji İhtiyacı

Tünel ve istasyonlarda acil aydınlatma sistemlerini aktif tutmak için gereken enerji miktarı hesaplanmıştır. Toplamda 4.280 adet tünel acil armatürü için enerji tüketimi 59,920 kW, 7.080 adet istasyon armatürü için ise 39,648 kW olarak belirlenmiştir. Genel toplamda, acil aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimi 0,4565 MVA olarak hesaplanmıştır, bu hesaplama Şekil 6.10.' da görülmektedir.

### 6.4.5. Pompa Grupları Enerji İhtiyacı

Su tahliyesi ve yangın söndürme sistemlerinin ihtiyaçlarına göre aralıklı çalışan bir yük olarak hesaplanmıştır. Başlangıç akımı ve çalışma süreleri dikkate alınarak her istasyonda 1 adet yangın pompa grubu (416 kW) ve 1 adet atık su pompası (297 kW) bulunmaktadır. Bu sistemlerin toplam enerji tüketimi ise 0,7132 MW olarak hesaplanmıştır, bu hesaplama Şekil 6.10.' da görülmektedir.

### 6.4.6. Hafif Yükler Enerji İhtiyacı

Hafif Yükler, istasyon içi sistemlerin düşük seviyeli enerji tüketimini karşılayan yük grubudur. Bu grup, acil durum algılama ve ihbar sistemleri, sinyalizasyon sistemleri, istasyon amirliği oturumları, kumanda merkezi oturumları gibi sistemleri kapsar. Tüm bu sistemlerin toplam enerji tüketimi 0,155 MW olarak hesaplanmıştır, bu hesaplama Şekil 6.10.' da görülmektedir.

### 6.4.7. Trafo ve İletim hattı kayıp yükleri

Kayıp Yükler, trafolar ve iletim hatlarında oluşan enerji kayıplarını temsil eder. Bu yük grubu, gerçek saha koşullarında aynı değerlerin sağlanabilmesi için trafo ve iletim kayıpları dikkate alınarak kurgulanmıştır. Ana hattı besleyecek 3 adet trafo aktif edilmiştir. Üsküdar CER Trafosu, Çarşı CER Trafosu ve Çekmeköy CER Trafosu. Her bir trafo 3,3 MVA yüke sahiptir ve her bir MVA kaybı 7,12 kW olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda, trafoların toplam kaybı 70,488 kW olarak belirlenmiştir. İstasyonları besleyecek servis trafolarının kaybı ise 220,008 kW'adır. Trafolara ait toplam kayıp yük miktarı, 220,008 kW + 70,488 kW = 0,2878 MW olarak hesaplanmıştır, bu hesaplama Şekil 6.10.' da görülmektedir.

## 6.5. Simülasyonun Uygulaması

Bu bölümde, çalışmanın 4.3. maddesinde detaylandırılan örnek deprem senaryosu esas alınarak geliştirilen simülasyon süreci kapsamlı bir biçimde açıklanmıştır. İstanbul genelinde meydana gelebilecek yüksek şiddetli bir depremin, enerji iletim hatlarına zarar vermesi sonucu M5 Metro Hattı'nın enerji kaybı yaşaması senaryosu üzerinden bir modelleme yapılmıştır. Simülasyon süreci; enerji kaybının tespiti, jeneratörlerin kontrollü biçimde devreye alınması, öncelikli yüklerin enerjilendirilmesi, yüklerin öncelik sırasına göre yönetilmesi ve tüm sistemin kararlı bir biçimde çalışmasının sağlanması adımlarını kapsamaktadır. Ayrıca, kumanda merkezi kontrol bloğu ile jeneratör kontrol blokları arasında kurulan mantık tabanlı karar mekanizması sayesinde, yüklerin ihtiyaçlara göre otomatik olarak devreye alınması ya da devreden çıkarılması senaryoya uygun şekilde yapılandırılmıştır. Tüm bu adımlar, MATLAB-Simulink ortamında modellenmiş, ve olası bir acil durum senaryosuna göre değerlendirilmiştir.

### 6.5.1. Hattın Enerji Kaybının Gerçekleşmesi

Öncelikli olarak, İstanbul genelinde yaşanması muhtemel bir deprem senaryosunda, şehrin enerji altyapısını sağlayan TEİAŞ tarafından enerjinin kesilmesi veya şehir içi enerji nakil hatlarının hasar görmesi durumunda, M5 Metro Hattı'nı besleyen üç ana enerji giriş noktasının devre dışı kalmasıyla süreç başlatılır. Bu senaryoda, şehrin genel enerji arzındaki kesintinin ardından, M5 hattının normal şartlarda ihtiyaç duyduğu 34.500 Volt AC enerjinin temin edilememesi üzerine, sistem hızlı bir şekilde yedek enerji protokollerini devreye alacaktır.

### 6.5.2. M5 Kumanda Merkezi Kontrol Bloğu Süreci

TEİAŞ hattından enerji kesintisi meydana gelir ve kontrol bloğuna bir "1" sinyali iletilir. Bu sinyal, enerji kaybının tespit edildiğini gösterir. Kontrol bloğu, bu durumu algıladıktan sonra yarı otomatik jeneratör senaryosunu devreye alır. Bu süreçte, mantık kapıları (AND ve SWITCH blokları) devreye alınacak olan yükler doğrultusunda ihtiyaca bağlı olarak aktif hale getirilir ve jeneratörlerin PM (güç yönetimi) değerleri belirlenir. Şartlandırma işlemi, sadece ihtiyaç duyulan yüklerin devreye alınmasını sağlar.

### 6.5.3. Jeneratörlerin Aktif Edilmesi Süreci

Kumanda merkezi kontrol bloğu tarafından verilen kararlar neticesinde oluşan sinyaller, her bir jeneratör için ayrı ayrı tasarlanan jeneratör kontrol bloğuna iletilmektedir. Bu kontrol bloğu, jeneratörlerin her iki giriş kapısı olan mekanik güç kapısını ve uyarım gerilimi kapısını eş zamanlı olarak kontrol etmektedir. Mekanik güç kapısına ulaşan sinyal, ilk olarak AND bloğuna yönlendirilir ve jeneratörün çalışması için gerekli olan ön koşulların sağlanması durumunda, jeneratörün optimal değerlerde çalışmasını sağlayan PM (Prime Mover) değerini aktifleştirir. Tersine düşünüldüğünde, AND bloğundan gelen “0” sinyali ile birlikte 0 kontağı tetiklenir ve jeneratör pasif konumda kalır; bu, jeneratörün enerji üretimine katılmamasını sağlar. Aynı işlem mantığı uyarım gerilimi (excitation voltage) girişi için de geçerlidir; yeterli şart sağlanmadıkça jeneratör uyarılmaz ve senkronizasyon gerçekleşmez. Simülasyondaki çıktı diyagramlarından da görüldüğü üzere, jeneratörler her yükte ilk birinci saniye içerisinde senkron duruma geçmiş ve Şekil 6.9’da görüldüğü gibi kararlı enerji üretme safhasına geçmiştir.

### 6.5.4. Yüklerin Enerjilendirilmesi Süreci

3 fazlı sistem bloklarından geçen stabil ihtiyaç enerjisi sistemin enerji ihtiyaçları doğrultusunda Tren yükü, Havalandırma yükü, Aydınlatma yükü, Pompa grubu yükü, Hafif yükler yükü ve Kayıp yükler yükü girişlerine ulaşmaktadır. Devamında her ihtiyaç noktası yine simülasyon çıktı diyagramlarından da görüldüğü üzere ilk birinci saniye içerisinde stabil enerji tüketimi değerlerine ulaşmakta ve stabil değerler aralığında enerji tüketimine başlamaktadır.

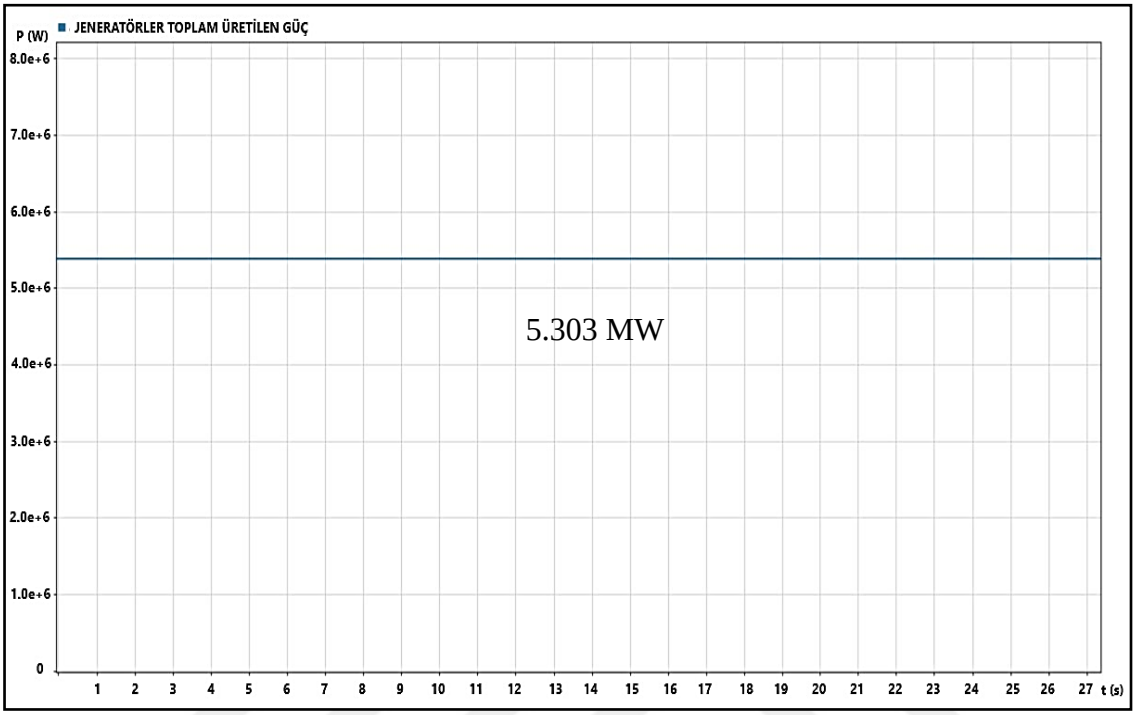
### 6.5.5. Simülasyonun Sonlandırılması Süreci

Jeneratörlerden elde edilen stabil enerji miktarı ile talep edilen güç değerleri miktarının birbirini karşıladığı ve her bir yük grubu için ayrı ayrı sistemin istenilen değerleri verdiği görülmüştür. Devamında Acil Durum Jeneratör sisteminin durdurulması aşamasında ilk şart olan Teiaş tarafından sağlanan enerjinin geri gelmesi ile başlanılmıştır. Hattın ihtiyacı olan 34500 V AC akım değerinin Teiaş baraları ile denetleyici sinyal üzerine düşen değer ile Mantık 0 sinyali M5 Kumanda Merkezi Acil Durum Jeneratör Sistemi Kontrol Bloğuna düşmektedir. Buradan da kumanda merkezi oturum sahipleri vasıtasıyla simülasyon sonlandırılmıştır. Tüm bu süreçlerin tamamlanması ile Jeneratörler dur pozisyonuna geçerek simülasyon sonlandırılmıştır.

## 6.6. Üretilen ve Harcanan Güç Verileri

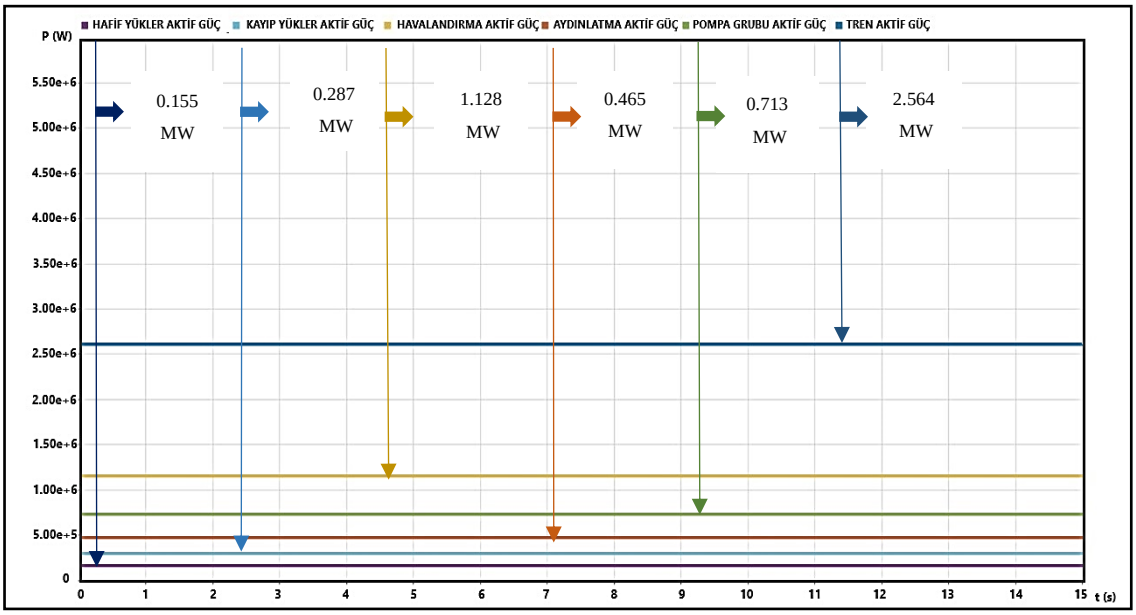
Jeneratörlerin nominal güç kapasitesi ve gerilim değerleri, sistemin her bir bileşenine nasıl enerji sağlayacağını belirler. Örneğin, jeneratörlerin enerji üretme kapasitesi, yüklerin sürekli ve ani değişimlerine adapte olabilme yeteneği ile doğrudan ilişkilidir. Bu, özellikle trenler, havalandırma sistemleri ve acil aydınlatma gibi kritik yüklerin beslenmesinde büyük rol oynamaktadır. Bu tür jeneratörler, genellikle değişken yük senaryolarında da sorunsuz bir şekilde çalışarak, sistemin stabilitesini korumaktadır. M5 Hattı için tesis edilen acil durum jeneratör sistem grupları 3 ayrı jeneratör şeklinde tesis edilmiştir. Her bir jeneratör 2 MVA enerji üretmektedir ve toplamda 6 MVA lık bir görünen güç üretimi söz konusudur. Simülasyonda kurulu jeneratörlere ait parametreler Tablo 6.4’ de verilmiştir. Kurgulanan simülasyonda tüm yükler devrede iken jeneratörler, reaktif yükler hariç toplamda 5.303 MW aktif enerji ürettiği görülmektedir. Şekil 6.8’ de

yer alan güç zaman grafiklerini incelediğimizde, jeneratörlerin her üçünün birbiri ile aynı zaman aralığında aynı miktarda güç ürettiği görülmektedir.




Şekil 6.8. Jeneratörlerin Ürettiği Aktif Güç Zaman Grafiği

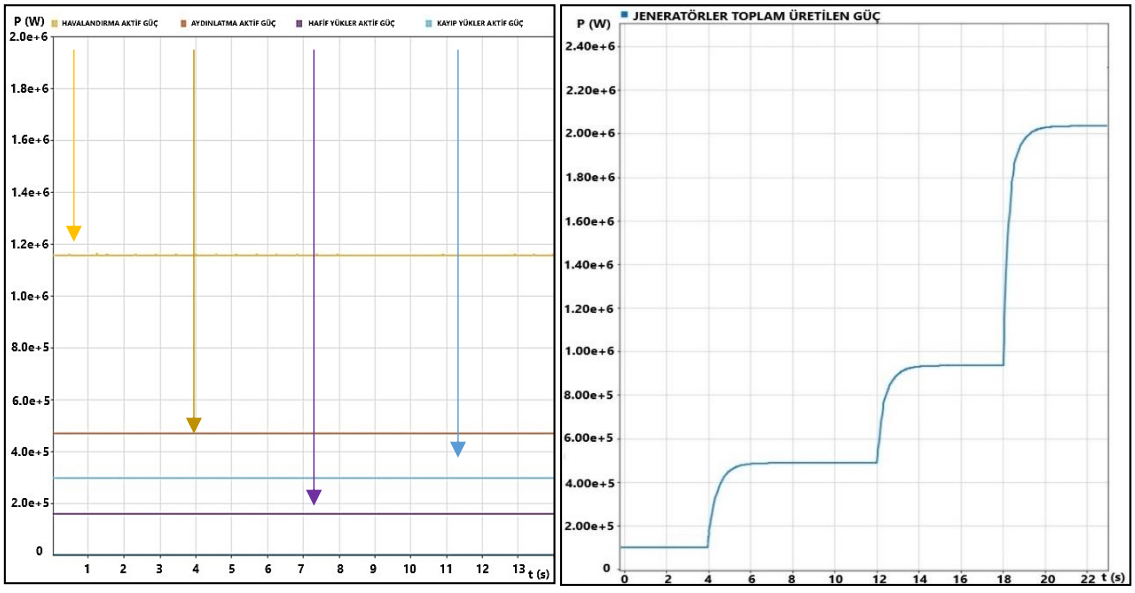
Şekil 6.9.' da her bir yük grubunun jeneratörlerden çektiği güç miktarları görülmektedir.




Şekil 6.9. Harcanan Aktif Güç Zaman Grafiği

## 6.7. Yüklerin Ayrı Ayrı Devreye Alınması ve Güç Değişimi

Simülasyon kurgusuna göre, her bir yük ayrı ayrı devreye alınabilmekte ve jeneratörler, talep edilen yük miktarına göre güç üretmektedir. Hazırlanan risk analizine göre, yük yönetimi belirli bir öncelik sırasına göre gerçekleştirilmiştir. Bu risk analizi kurgusuna göre ilk olarak hayati sistemler olarak değerlendirdiğimiz öncelik grubu bir olan sistemler devreye alınmıştır. Bu doğrultuda; sinyalizasyon, haberleşme ve SCADA gibi kritik sistemlerin çalışmasını sağlamak amacıyla hafif yükler devreye alınmıştır. Bunu takiben, trafo ve iletim hatlarındaki kayıp yükler sisteme dahil edilmiştir. Daha sonra, istasyon içi aydınlatma yükleri devreye alınmış ve son olarak havalandırma sistemi aktif hale getirilmiştir. Bu süreç sonucunda jeneratörlerin, toplamda 2.035 MW talep edilen yüke karşılık gelen güç ürettiği gözlemlenmiştir. Bunların dışında diğer talep yüklerinin devreye alındığı durumda 5.303 MW güç üreten jeneratörlerin, burada yalnızca 2.035 MW güç üretmesi, güç üretiminin talep miktarına bağlı olarak değiştiği Şekil 6.10.'da görülmektedir. Bu durum, sistemin esnek bir yük yönetimi algoritmasına sahip olduğunu ve yüklerin önceliklendirilmesine göre enerji üretiminin kademeli olarak şekillendiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, düşük yük senaryolarında jeneratörlerin daha az çalıştırılması, enerji tasarrufuna ve sistem bileşenlerinin daha az yıpranmasına olanak tanımaktadır. Simülasyon çıktıları ile saha verileri karşılaştırıldığında, yük-temelli üretim kontrol mekanizmasının sahada uygulanabilirliğinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır.




Şekil 6.10. İlk Talep Edilen Yükler Güç Zaman Grafiği

### 6.8. Saha ve Simülasyondaki Jeneratör Verilerinin Karşılaştırılması ve Analizi

Sahadaki jeneratörlere ait veriler incelendiğinde her bir jeneratörün aktif gücünün yaklaşık 1.768 MW olduğu, sistemin toplam aktif gücünün ise yaklaşık 5.304 MW olduğu görülmüştür. Simulink'te ise her bir jeneratörün nominal gücü 2 MVA olarak tanımlanmış ve modelleme sonuçlarına göre çıkış gücü yaklaşık 1.768 MW olarak ölçülmüştür. Bu durum saha ve simülasyon ortamında belirli kayıpların varlığını ve aynı çalışma koşullarının sınırlandırılmış olduğunu göstermektedir. Normal şartlarda jeneratörlerin güvenlik, uzun ömür ve aşırı yüklenmeden kaçınmak için %75-90 aralığında çalıştırılmaktadır. Aktif güç üretimi 1.768 MW ile nominal değer (2 MVA) arasında bir fark oluşturarak, jeneratörlerin tasarım gerekliliklerini yansıtmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre jeneratörlerin çıkış gücü 1.768 MW olarak hesaplanmıştır. Gerçek sahadaki tüm kayıplar Madde: 6.4.2.6 ve Şekil 6.10' da görüldüğü üzere, hesaba katılıp simülasyona eklenmiştir.

Saha parametreleri ile 6.1., 6.2., 6.3. ve 6.4. ' de yer alan formüller ile hesaplanmıştır.

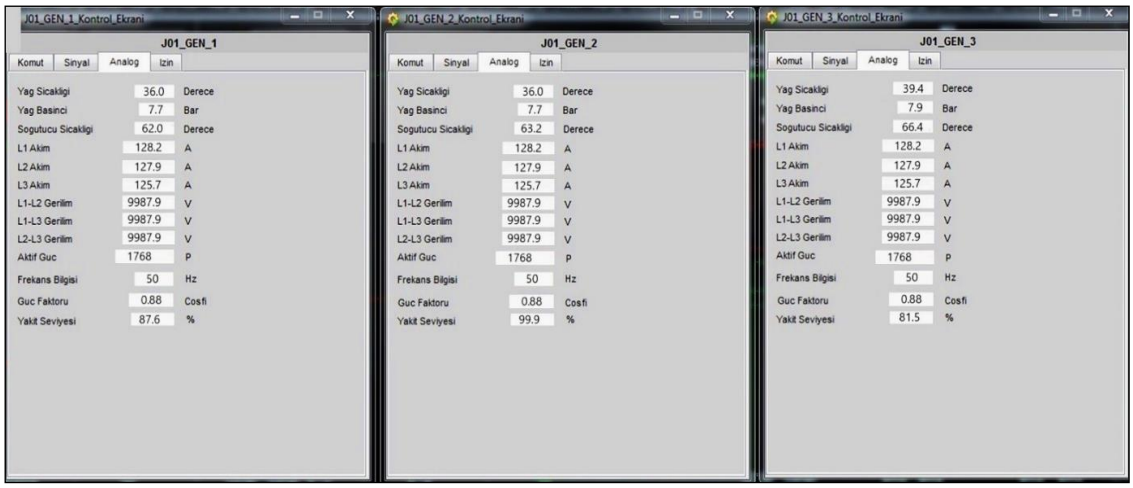
$$I = P / \sqrt{3}\, V\ (\cos\phi) \tag{6.1}$$

$$(\cos\phi) = P / S \tag{6.2}$$

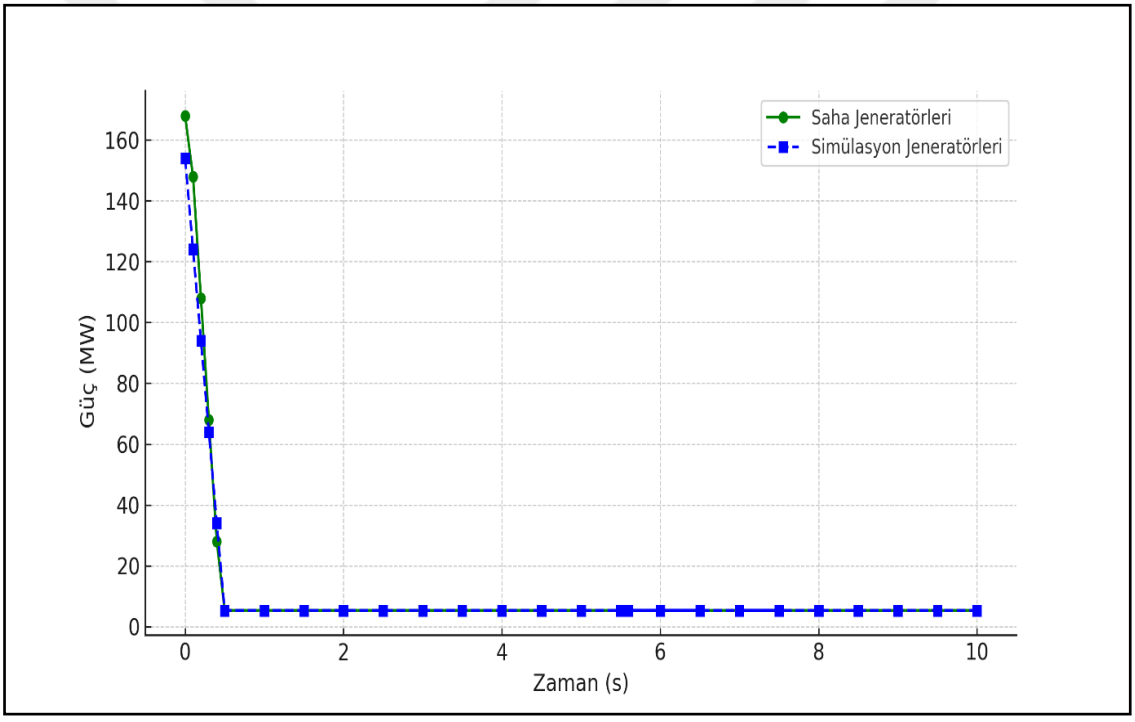
$$P = S\ (\cos\phi) = \sqrt{3}\, V\, I\ (\cos\phi) \tag{6.3}$$

$$(S) = \sqrt{3}\, V\, I \tag{6.4}$$

Bu doğrultuda Akım değeri denklem 6.1. kullanılarak 2.897 A, Cosϕ değeri denklem 6.2. kullanılarak 0.88, Gerçek güç değeri denklem 6.3. kullanılarak 1.768 MW ve Görünür güç değeri denklem 6.4 kullanılarak, 2 MWA olarak hesaplanmıştır. Sahadaki gerçek jeneratörler ve simülasyondaki jeneratörlerin sonuçlarının benzer olması, kullanılan modelin doğruluğunu ve sahadaki gerçek verilerin temsil yeteneğini oluşturduğu görülmektedir. Gerçek jeneratörlerin nominal gücünden daha düşük aktif güç üretmesinin temel sebebi, sistemin sürekli güvenli çalışma sınırları içinde kalması için jeneratörlerin tam yükte çalıştırılmaması ve bununla beraber hat üzerinde, iletim ekipman ve ağlarında oluşan kayıp güçlerdir. Simülasyonda ise sabit yük tanımları ve nominal değerler üzerinden yapılan benzetme ve modelleme sonucunda, sahadaki değerlere oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.




Şekil 6.11. Saha Jeneratörlerine Ait Çalışma Parametreleri




Şekil 6.12. Saha Jeneratörleri ve Simülasyon Jeneratörleri Güç Zaman Eğrisi

Şekil 6.12.'de Saha Jeneratörleri ve Simülasyon Jeneratörleri için güç değerlerinin zamanla değişimi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Saha Jeneratörleri başlangıçta 168 MW seviyesinde çalışmaya başlarken, Simülasyon Jeneratörleri 154 MW ile başlamaktadır. Zaman ilerledikçe, her iki sistemin güç değerleri düşüş göstermektedir. Örneğin, 0.1 saniyede Saha Jeneratörleri gücü 148 MW' ya, Simülasyon Jeneratörleri ise 124 MW' ya gerilemektedir. Bu trend her iki sistemde de benzer şekilde devam ederken, 0.5 saniyeye gelindiğinde her iki jeneratör sistemi de yaklaşık 5.303 MW seviyesine

düşmekte ve bu noktadan itibaren sabit bir şekilde bu güç değerinde kalmaktadır. Bu durum, jeneratörlerin başlangıçta yüksek enerji talebini karşılamak için tam kapasiteye yakın çalıştığını, ardından sistemin standart güç değerlerine ulaştığını, daha düşük bir güç seviyesine geçtiğini ve sabit bir yükte çalışmaya devam ettiğini göstermektedir. Özellikle, ilk üretim hızına oranla 5.303 MW gibi düşük bir seviyeye stabil bir şekilde ulaşılması, jeneratörlerin talep yanıtına uygun bir operasyonel strateji uygulandığını ifade etmektedir. Bu, simülasyon jeneratörlerinin saha jeneratörlerine yakın bir performansı temsil ettiğini, ancak başlama değerlerinde bir miktar fark bulunduğunu işaret etmektedir. Grafikte, simülasyon ortamında geliştirilen jeneratör modelinin ve saha verilerinden elde edilen gerçek sistem tepkisinin dinamik yük değişimlerine karşı verdikleri yanıtlar açıkça karşılaştırılmaktadır. Bu iki farklı kaynaktan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, eğilimlerin büyük ölçüde örtüştüğü ve özellikle yük geçişleri, dengeleme süresi ile tepki hızı gibi kritik parametrelerde paralellik gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu yüksek uyum seviyesi, geliştirilen modelin hem teorik altyapısının hem de pratik yansımalarının güçlü olduğunu ve gerçek sistem davranışlarını başarıyla temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Böylece, söz konusu modelin ilerleyen dönemlerde yapılacak analizlerde, sistem performansının tahmin edilmesi ve olası senaryoların değerlendirilmesi açısından güvenilir bir karar destek aracı olarak kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Özellikle ani yük artışları veya düşüşleri gibi olağan dışı durumlarda, sistemin verdiği tepkilerin doğrulukla öngörülebilmesi, hem işletme sürekliliği hem de enerji güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, modelin gerçek zamanlı sistem yönetim stratejilerine entegre edilebilir olması, kriz anlarında operasyonel verimliliği artıracaktır. Buna ek olarak, hem simülasyon hem de saha verilerinde gözlemlenen geçici salınım (transient) davranışları, jeneratörlerin ani yük geçişlerine karşı sergilediği adaptasyon sürecini yansıtmaktadır. Bu geçici tepkilerin süresi, genliği ve sönümleme oranları bakımından her iki sistemin de büyük oranda benzerlik göstermesi, modelin sadece steady-state (kararlı durum) değil, aynı zamanda dynamic-response (dinamik tepki) kriterlerine göre de optimize edildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, geliştirilen simülasyon yapısının gerçek jeneratörlerin frekans-kararlılık sınırları ve tepki eşiği doğrultusunda başarıyla modellendiğini ve yük karakteristiklerine uygun şekilde yanıt verdiğini göstermektedir.

# 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, metro sistemlerinde enerji sürekliliğinin sağlanmasında jeneratörlerin oynadığı kritik rol detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Metro hatları, afet ve acil durum senaryolarında yüksek kapasiteli yolcu taşıma sistemleri olmaları nedeniyle enerji sürekliliğine büyük ölçüde bağımlıdır. Yapılan analizler, jeneratörlerin enerji sürekliliği açısından önemli bir unsur olduğunu ve doğru bir yük yönetim stratejisi uygulandığında, acil durum sistemlerinin desteklenmesinin yanı sıra yolcu tahliye süreçlerinin de güvenli bir şekilde yürütülebileceğini göstermektedir. Bu noktada, önceden hazırlanan bir risk analizine dayalı yük yönetim stratejileri büyük önem taşımaktadır.

Jeneratörlerin sağladığı enerji, afet senaryoları dikkate alınarak sistemin ihtiyaçlarına göre dinamik bir şekilde yönetilmiştir. Bu kapsamda, her yük grubunun öncelik sırasına göre devreye alınması sağlanmıştır. Ani yük değişimlerine karşı jeneratörlerin hızlı yanıt verme kabiliyeti, operasyonel stabilitenin korunmasında ve enerji sürekliliğinin sağlanmasında kritik bir faktör olarak öne çıkmıştır. Afet senaryoları çerçevesinde yapılan simülasyonlarda, hayati önem taşıyan sistemler öncelikli olarak devreye alınmıştır. Bunlar arasında Acil Durum Aydınlatma, Acil Durum Havalandırma, Haberleşme, İhbar ve Anons Sistemleri ile Sinyalizasyon Sistemleri yer almaktadır. Bu sistemlerin devreye alınmasının ardından Yangın Söndürme ve Su Tahliye gibi operasyonel sistemler aktif hale getirilmiştir. Son aşamada ise tünel tahliye sistemleri devreye sokularak, trenlerin en yakın istasyona ulaştırılması ve yolcuların güvenli tahliyesi sağlanmıştır. Bu süreçte, öncelik sırası düşük olan yardımcı ve konfor amaçlı sistemler (örneğin, tünel ve istasyon içi iklimlendirme sistemleri) devre dışı bırakılarak jeneratör kapasitesinin kritik öneme sahip sistemlere yönlendirilmesi hedeflenmiştir.

Gerçek saha verileri ile simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, modelin gerçek dünya koşullarını temsil etme kabiliyetinin yüksek olduğu görülmüştür. Gerçek jeneratörlerin aktif gücünün 1.768 MW olduğu ve toplam sistemin 5.304 MW aktif güç ürettiği tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları da benzer değerler vermiş, bu da modelleme yaklaşımının kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğunu desteklemiştir. Ancak, saha verileri ile simülasyon sonuçları arasındaki küçük farklar, jeneratörlerin gerçek çalışma sınırları, ortam koşulları ve anlık yük değişimlerine adaptasyon farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, modelin gerçek saha koşullarına daha fazla yaklaşması

için ileri düzey hesaplamalar, dinamik yük değişim analizleri ve daha detaylı senaryoların ele alınması önerilmektedi**r.** Yapılan analizler, enerji sürekliliği sağlamak için jeneratörlerin yük yönetim stratejilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Her bir yük grubunun enerji talebi ve öncelik sırası, olası afet ve acil durumlar için önceden hazırlanmış risk analizlerine göre belirlenmiştir. Bu risk analizleri, enerji talebinin en kritik olduğu durumlarda jeneratörlerin hangi yükleri önce devreye alacağına dair karar süreçlerini kolaylaştırmıştır. Ayrıca, risk analizine dayalı olarak geliştirilen aksiyon planları sayesinde enerji sürekliliği ve sistem güvenilirliği artırılmıştır. Geleceğe dönük olarak, her bir afet ve acil durum senaryosu için ayrı risk analizleri hazırlanarak bu analizlere dayalı aksiyon planlarının daha detaylı hale getirilmesi önerilmektedir. Bu planlar, yapay zeka destekli kontrol senaryoları ile entegre edilerek her senaryoya uygun dinamik bir yük yönetimi yapılmasını mümkün kılacaktır. Yapay zeka tabanlı kontrol sistemleri, enerji tüketim profillerini sürekli izleyerek jeneratörlerin verimli ve dengeli bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu sistemler, anormal durumları erken tespit edebilme yetenekleri sayesinde enerji kesintilerinin önüne geçerken, sistem güvenliğini de önemli ölçüde artırır. Özellikle afet ve acil durum senaryolarında, enerji talebinde yaşanan dalgalanmalara ve ani yük değişikliklerine karşı daha esnek ve uyarlanabilir bir yük yönetimi imkanı sunar.

Yapay zeka destekli senaryolar, jeneratör sistemlerinin her türlü kriz koşuluna göre optimize edilmesini mümkün kılarak, enerji kaynaklarının en verimli biçimde kullanılmasını sağlar. Bu sayede jeneratörler, aşırı yüklenme durumlarında kendilerini koruma moduna alabilir, önceden tanımlanmış stratejilere uygun şekilde yük atma işlemlerini gerçekleştirebilir ve kritik sistemlerin enerji ihtiyacını önceliklendirerek karşılayabilir. Tüm bu süreçler, minimum insan müdahalesiyle otomatik olarak yürütülebilir. Metro sistemlerine entegre edilen bu tür yapay zeka tabanlı kontrol mekanizmaları, hem günlük operasyonların sürdürülebilirliğini artırmakta hem de afet anlarında sistemin kararlılığını koruyarak enerji sürekliliğini güvence altına almaktadır. Sonuç olarak, jeneratör sistemlerinin modern kontrol teknolojileriyle desteklenmesi, metro hatlarının performansını yükseltmekte ve olağanüstü durumlarda dahi güvenli bir ulaşım altyapısı sunulmasına olanak tanıyacaktır.

## KAYNAKLAR


Akçay, T., Ersoy, A. (2017). 1500 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Hattında Yıldırım ve Anahtarlama Darbelerinin Hat Gerilimine Etkisinin Analizi ve Çözüm Önerileri, *Transist Uluslararası Istanbul Ulasım Kongresi ve Fuarı,* İstanbul, Türkiye, 29-30 Kasım 2017.

Alberto, Y., Masahide, O., Hiroyuki, K., Takashi K., Ikuo, T. (2018). Reconnaissance of the 2017 Puebla, Mexico earthquake, *Soils and foundations,* Peubla, Meksika, 14-15 October 2018.

Belay, A. (2016). Design and simulation of traction power supply system case study of Modjo Hawassa line, *Master Thesis, The Addis Ababa University,* Addis Ababa, Ethiopia, *10.13140, 2.2,* 188-210.

Dong, H., Ning, B., Cai, B., Hou, Z. (2010). Automatic train control system development and simulation for high-speed railway, *IEEE Circuits Syst.* Mag, *6.18,* 123-150.

Ekici, Ü., Akay, M., (2024). Türkiye'de Tam Otomatik Sürücüsüz Anahat Treni Çalıştırılmasında Olası Fırsatlar ve Tehditler, *Demiryolu Mühendisliği, 19,* 109-120.

Fazilet, R. (2015). Metrolarda Yangın Güvenlik Önlemleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 38185.

Gao, J. (2024). Failure analysis and deformation characteristics of shield tunnel obliquely crossing ground fissure under earthquake, *Engineering Failure Analysis, 108990,* 08-24.

Gomba, P., Isabela, B. (2015). Critical systems and processes affecting the resilience of subway systems to terrorism risks, *Communications-Scientific Letters of the University of Zilina, 17.1,* 22-27.

Güzeller, E., Akcay, M., Bulut, B., Kocaarslan, İ. (2017). 1500 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Hattı Trafo Yerleşiminin Optimizasyonu ve Sultangazi-Arnavuyköy Hattına Uygulaması, *Uluslararası İstanbul Ulaşım Kongresi ve Fuarı (Transist 2017),* İstanbul, Türkiye, 2 - 04 Kasım 2017.

Huang, Z., Xingmian, D., Chong, L., Yixin, C., Chenlong, Z. (2024). Probabilistic Seismic Risk Assessment of Metro Tunnels in Soft Soils, *Sustainability, 8218,* 16-18.

Hou, B., Yang, C., Dongye, L., Shuzhi, Z. (2020). Transit-based evacuation for urban rail transit line emergency, *Sustainability, 12.9,* 19-39.

Hassannayebi, E., Mehrdad, M., Soheil, M., Masoud, S., Iman, B., Shervin, E. (2020). A hybrid simulation model of passenger emergency evacuation under disruption

scenarios, A case study of a large transfer railway station, *Journal of Simulation, 14.3,* 204-228.

İştahlı, N. (2013). Metro afet ve acil durum eylem planı ilkeleri: İstanbul uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 341284.

İstanbul Büyük Şehir Belediyesi, Metro İstanbul A.Ş, (2022). *Metro İstanbul Acil Durum Yönetim Sistemi El Kitabı* (EK181), İstanbul.

Anastasios, K., Konstantinos, S., Dimitrios, K. (2017). Fire impacts in metro railway tunnel, a mathematical approach. *Int J Eng Sci, 6.8,* 39-51.

Karakuş, F., Yumurtacı, R. (2018). Raylı sistemlerde orta gerilim elektrifikasyon sisteminin modellenmesi ve besleme senaryolarının belirlenmesi, *EMO Bilimsel Dergi, 8.1.*, 41-48.

Karakulak, E., Eyigün, Y. (2022). Kent İçi Raylı Sistemlerde ve Ana Hat Demiryollarında Acil Durumda Yolcu Tahliyesi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi 4.2,* 157-172.

Karataş, M., Erçetin, R. (2018). Dizel Jeneratörle SCADA Uygulamaları, *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi, 10.4,* 113-126.

Keskin, İ. (2013). Raylı sistemlerde yol tasarımının enerji tüketimi üzerine etkilerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 343067.

Koshimura, S., Satomi, H., Hideomi, G. (2013). Lessons from the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster, *Journal of Disaster Research, 8.4,* 549-560.

Kutlay, Ö. (2014). Açık Hat Demiryolu ve Metro Projelerinde Elektromekanik Sistemler, *Demiryolu Mühendisliği, 1*, 36-37.

Lai, S., Tim, C., William, X. (2016). Use of Fire Suppression Systems in Underground Stations and Metro Tunnels, *International Railway Safety Council, Use of Fire Suppression System in Underground Stations and Metro Tunnels, China Region WSP (Asia), 8.4,* 1-12.

Liu, Q., Kai, G., Xianguo, W., Zhonghua, X., Limao, Z. (2024). Simulation-based rescue plan modeling and performance assessment towards resilient metro systems under emergency, *Reliability Engineering & System Safety, 24- 109642,* 2-15.

Liu, W., Yang, H. (2018). Reliability based assigment method for railway networks heterogeneous passengers, *Transport Research Part, 93,* 501-524.

Liu, X., Dapeng, Z., Sanzhong, Li. (2014). Seismic attenuation tomography of the Northeast Japan arc, İnsight into the 2011 Tohoku earthquake and subduction dynamics, *Journal of Geophysical Research Solid Earth, 119.2,* 1094-1118.

Lu, Y., Shuqi, S. (2020). Scenario based allocation of emergency resources in metro emergencies, *A model development and a case study of Nanjing Metro Sustainability, 12.16,* 188-215.

Maden, D., Erkan, A. (2017). Yer Altı Metro İstasyonlarında Mekan Tasarımı Üzerine Bir Araştırma, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 18.1,* 1-16.

Mayoral, M., Kevin, F., Tara, H. (2019). The September 19, 2017 Mw 7.1 Puebla Mexico city earthquake: Important findings from the field Overview of Special Edition, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 123.1,* 520-524.

Mutlu, G. (2013). Kent içi raylı sistemler (İstanbul ulaşım) elektrik tesisler uygulamaları ve ekonomik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 365638.

Miyatake, M., Ko, H. (2010). Optimization of train speed profile for minimum energy consumption, *IEEJ Trans, Electr, Electron, Eng, 5.3,* 263–269.

Ozawa, S. (2012). Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 117.B7,* 112-134.

Ozan, İ. (2016). Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro – Mekanik İşler Proje Raporu, İst*anbul Büyükşehir Belediyesi,* 041, 08-62.

Ölmez, T., Kılıç, B. (2020). Metro AC CER güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellenmesi, *Demiryolu Mühendisliği, 12,* 22-33.

Özmen, İ. (2014). 750 V DC CER Gücü Tedarik Sisteminin Bilgisayar Destekli Modellemesi, Benzetimi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 363569.

Öztürk, A., Mustafa, G. (2018). Raylı Sistemlerde Sürücüsüz Metro Sistemleri, *4rd International Symposium on Railway Systems Engineering,* Karabük, Türkiye, 13-15 Ekim 2018.

Özdemir, Y. (2021). M5 Hattı Jeneratör Acil Durum Senaryoları Sistem Mühendisliği Raporu, *İstanbul Büyük Şehir Belediyesi,* Z-92307155.604.S.21 Resmi Yazı Ek - 1, 01-14.

Premadasa, P., Silva, C. (2021). An optimal configuration of diesel generator and battery storage system for off-grid residential applications, *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC),* Toronto, Canada, 29-30, December, 2021.

Roeslin, S., Hugon, G., K, J, Elwood., Rajesh, P., Alonso, G. (2020). The September 19th, 2017 Puebla, Mexico earthquake: final report of the New Zealand reconnaissance team, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, New Zealand, 01-09, Nowember, 2020.

Su, S., Tang, T., Wang, T. (2016). Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model, *Authors Published by Oxford University Press on behalf of Central South University Press, 48.2,* 99-127.

Sağlar, B. (2016). Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy İnşaatı ve Elektro - Mekanik İşler Proje Raporu, *İstanbul Büyük Şehir Belediyesi,12*, 01-36.

Tan, M., Qizhou, Hu., Yikai, W., Juanjuan, L., Xin, F. (2024). Decision-making method for high speed rail early warning system in complex earthquake situations, *Transportation Safety and Environment, 98.9,* 150-172.

Tsinidis, G. (2022). Developments in seismic vulnerability assessment of tunnels and underground structures, *Geotechnics, 64.2,* 209-249.

Wang, J., Joshua, C., Andrey, B. (2024). Real Time Optimal Power Flow-Based Distributed Energy Resource Management System (DERMS), *National Renewable Energy Laboratory,* NREL/TP-5D00-87767, 48-61.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Armağan, O**., Karakaş, E. (2024). Metro Hatlarında Afet ve Acil Durumlarda Enerji Sürekliliğinin Sağlanması, Örnek Bir Acil Durum İncelemesi, *Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi - Imascon 2024 Sprıng,* Kocaeli, Türkiye, 29-30 Kasım 2024.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini memleketi olan Rize'de tamamlamıştır. İlk Lisans öğrenimini İstanbul Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Enerji Öğretmenliği bölümünde tamamlamıştır. İkinci lisans öğrenimini ise Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Halen Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. İlk lisans öğreniminden sonra 2 yıl süre ile bir mühendislik firmasında bina mekanik proje çizimi çalışmaları yapmıştır. Devamında 1 yıl süre ile M.E.B' de öğretmenlik yapmıştır. 2014 yılında İ.B.B. Metro İstanbul AŞ'de işe başlamış olup sırasıyla M1A Yenikapı-Atatürk Havalimanı Metro Hattı, T1 Bağcılar-Kabataş Tramvay hattı ve M5 Üsküdar-Çekmeköy Metro hatlarında İş Güvenliği Uzmanı ve Uzman Sistem Emniyet Mühendisi olarak görev yapmıştır. Halen M5 Üsküdar-Çekmeköy-Sancaktepe ve M8 Dudullu-Bostancı Metro hatlarında Sistem Emniyet Mühendisi olarak görev yapmaktadır.