

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR METRO HATTINDA ARAÇ KAPASİTESİNİN ARTIRILMASININ
ORTA GERİLİM VE CER SİSTEMLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zennure YENER

**Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı
Raylı Sistemler Mühendisliği Lisansüstü Programı**

OCAK 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ★LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR METRO HATTINDA ARAÇ KAPASİTESİNİN ARTIRILMASININ
ORTA GERİLİM VE CER SİSTEMLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zennure YENER
(526211007)**

**Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı
Raylı Sistemler Mühendisliği Lisansüstü Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ

OCAK 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 526211007 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Zennure YENER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİR METRO HATTINDA ARAÇ KAPASİTESİNİN ARTIRILMASININ ORTA GERİLİM VE CER SİSTEMLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Oktay Arıkan
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi: 04.11.2023

Savunma Tarihi: 23.01.2024





Eşime ve çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Mühendislik yolunda edinmiş olduğum 22 senelik tecrübemle çok severek çalıştığım raylı sistemler sektörü üzerine İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde yüksek lisansımı yapmış olmaktan dolayı gurur duyuyorum. Tez çalışmam sırasında bana desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eşim, annem ve babama, simülasyon çalışmalarında bana desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Süleyman AÇIKBAŞ ve Çağlar ERDEM'e, simülasyon çalışmalarımda kullanmak üzere hat verilerini benimle paylaşan Metro İstanbul yetkililerine çok teşekkür ederim.

Ocak 2024

Zennure YENER
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Literatür Araştırması	4
1.3. Hipotez	7
2. RAYLI SİSTEM EKİPMANLARI.....	9
2.1. İletim Sistemleri	9
2.1.1. Üçüncü ray sistemi	11
2.1.2. Rijit katener sistemi.....	12
2.1.3. Normal katener sistemi	13
2.1.4. Innorail/APS sistemi	15
2.2. Orta Gerilim Sistemi	15
2.2.1. Yardımcı servis trafoları	16
2.2.2. Orta gerilim hücreleri.....	17
2.2.3. Ana dağıtım sistemi	19
2.2.4. Acil durum jeneratör sistemi.....	20
2.2.5. UPS ve 110 V DC redresör	21
2.3. DC Sistemi	21
2.3.1. Cer trafoları ve doğrultucular.....	21
2.3.2. DC şalt hücreleri	23
2.4. Sinyalizasyon Sistemi.....	24
2.4.1. Sabit (fixed) blok sinyalizasyon sistemi	26
2.4.2. Hareketli blok sinyalizasyon sistemi.....	26
2.5. SCADA Sistemi ve Kumanda Merkezi	27
3. RAYLI ULAŞIMDA KULLANILAN ARAÇ TİPLERİ.....	31
3.1. Trenler	31
3.2. Hafif Metro	32
3.3. Metrolar	32
3.4. Füniküler	33
3.5. Tramvaylar	33
3.6. Monoray	33
3.7. Maglev (Manyetik Levitasyon) Trenleri	34
3.8. Hiperloop.....	35

4. RAYLI SİSTEM FORMULASYONLARI.....	37
4.1. Davis Formülasyonu.....	37
4.2. Tren Hareketi.....	39
4.2.1. Hızlanma	39
4.2.2. Seyir	39
4.2.3. Boşta gitme.....	40
4.2.4. Frenleme.....	40
5. DC RAYLI SİSTEMLERDE KAÇAK AKIM KONTROLÜ	41
6. REJENERATİF FRENLEME VE DEPOLAMA ŞEKİLLERİ.....	45
6.1. Bataryalar.....	47
6.2. Süperkapasitörler	49
6.3. Volanlar (Fly Wheel).....	49
6.4. Süper İletken Manyetik Depolama Sistemleri (SMES).....	50
7. SİMÜLASYON VERİLERİ.....	51
7.1. Simülasyon Yazılımı Hi-SimuX ve SimuX.....	52
7.2. Hat Bilgileri	54
7.2.1. Mevcut hat bilgileri	54
7.2.2. Entegre hat bilgileri	57
7.3. Mevcut Hat Orta Gerilim İşletme Senaryoları	60
7.3.1. Normal işletme senaryoları	60
7.3.2. Enerji kesilmesi işletme senaryoları.....	61
7.4. Kirazlı Halkalı Hattı Orta Gerilim İşletme Senaryoları.....	62
7.5. Mevcut Hat Trafo Merkezleri Fiziki Koşulları.....	63
7.6. Mevcut Hat Cer Gücü, Katener Sistemi ve Ray Verileri	66
7.7. Kirazlı Halkalı Hattı Cer Gücü, Katener Sistemi ve Ray Verileri.....	67
7.8. Kullanılan Standartlar	68
7.9. Simülasyonda Kullanılan Araç Verileri	71
7.10. Sefer Sıklığı (Headway).....	73
8. SİMÜLASYON SONUÇLARI	75
8.1. Mevcut İşletme Simülasyonu	76
8.2. Kapasite Artırılması Durumu Simülasyonları	77
8.2.1. Birinci grup simülasyonlar	77
8.2.2. İkinci grup simülasyonlar	78
8.2.3. Üçüncü grup simülasyonlar.....	79
9. SONUÇ.....	83
KAYNAKLAR.....	87
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

A	: Trenin ön alanı
AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
AG	: Alçak Gerilim (Low Voltage)
Be	: Elektrik fren kuvveti
Bf	: Sürtünme fren kuvveti
BS EN	: Avrupa Uyumlu İngiliz Standardı
Bt	: Toplam frenleme kuvveti
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
Duty	: Aşırı Yük Hizmet Sınıfı
EMO	: Elektrik Mühendisleri Odası
EN	: Avrupa Standardı (European Norm)
Fex	: Trene ters yönde etki eden direnimsel kuvveti
Fin	: Tren çekimsel kuvveti
Hz	: Hertz
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronic Engineers)
I_R	: Raydan geçen akım
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Standard Organization)
I_T	: Tren akımı
İUAŞ	: İstanbul Ulaşım A.Ş.
ke	: Ray genişliğine Bağlı Katsayısı
km	: Kilometre
kN	: Kilo Newton
m	: Metre
M	: Trenin kütlesi

mm	: Milimetre
mΩ	: Miliohm
Maglev	: Manyetik Levitasyon
n	: Aks sayısı
N	: Araç sayısı
ηB	: Rejeneratif sistemin verimi
OG	: Orta Gerilim
P	: Darbe sayısı
Pr	: Rejeneratif frenlemenin elektrik gücü
R_R	: Ray direnci
R_s	: Topraklama direnci,
SCADA	: Denetleme Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
SF₆	: Kükürt Hekzaflorür (Sulfur hexafluoride)
t	: Zaman
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
UIC	: Uluslararası Demiryolu Birliği (Union Internationale des Chemins de fer)
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterrupted Power Source)
U_{te}	: Ray Gerilimi Değeri
V	: Tren hızı
V_{do}	: Doğrultucu gerilimin ortalama değeri
V_m	: Şebeke gerilimi tepe değeri
V_{Touch}	: Dokunma gerilimidir.
W	: Watt

SEMBOLLER

Ω	: Ohm
α	: Eğim
β	: Açık hat veya tünele göre katsayı
Σ	: Toplam sembolü





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : EN 50163 ve IEC 60850 standartlarına göre izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri [8,9].	11
Çizelge 2.2 : AC ve DC kategorileri [12,13].	13
Çizelge 2.3 : Seyir Teli Yükseklikleri [12,13].	13
Çizelge 2.4 : İstasyon ekipman güçleri [19].	19
Çizelge 2.5 : Jeneratör ihtiyacı analizi [19].	20
Çizelge 2.6 : Darbe sayılarına göre ortalama gerilim değerinin, gerilimin tepe değerine oranı [16].	22
Çizelge 4.1 : Ray genişliğine bağlı ke katsayısı [29].	38
Çizelge 7.1 : İstasyon km bilgileri [23].	55
Çizelge 7.2 : Düşey eğim bilgileri [23].	55
Çizelge 7.3 : Trafo merkezleri konumları [23].	56
Çizelge 7.4 : Yatay kurp değerleri [23].	56
Çizelge 7.5 : Mevcut hatta ait hız limitleri [23].	57
Çizelge 7.6 : Düşey eğim verileri [23].	58
Çizelge 7.7 : Yatay kurp değerleri [23].	59
Çizelge 7.8 : Entegre hatta ait hız limitleri [23].	59
Çizelge 7.9 : M1A- M1B hattı doğrultucu bilgileri [44].	67
Çizelge 7.10 : Kirazlı Halkalı doğrultucu bilgileri.	67
Çizelge 7.11 : EN 50122-1'e göre zamana bağlı maksimum efektif temas gerilimi değerleri [46].	69
Çizelge 7.12 : Trafo aşırı yük hizmet (duty) sınıfları.	70
Çizelge 7.13 : α faktörü değerleri.	71
Çizelge 7.14 : Araç parametreleri.	72
Çizelge 8.1 : Trafo Merkezi.	75
Çizelge 8.2 : Normal durum için trafo yüklenmeleri.	77
Çizelge 8.3 : Trafo yüklenmeleri.	77
Çizelge 8.4 : Normal durum simülasyon sonuçları.	78
Çizelge 8.5 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri...	78
Çizelge 8.6 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları.	79
Çizelge 8.7 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri...	80
Çizelge 8.8 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları.	81
Çizelge 9.1 : Kilometre başına her bir araca ait enerji tüketimleri.	84



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Ülkelere göre enerji dağılımı [6].	10
Şekil 2.2: Ray sistemi çeşitleri [10].	12
Şekil 2.3: Rijit katener ve seyir teli [2].	13
Şekil 2.4: Katener sistemi bileşenleri [15].	14
Şekil 2.5: Innorail [16].	15
Şekil 2.6: Örnek tek hat şeması [17].	16
Şekil 2.7: Kuru tip trafo [18].	17
Şekil 2.8: Orta gerilim hücreleri [10].	18
Şekil 2.9: 6-darbeli tam dalga doğrultucu [10].	22
Şekil 2.10: 12-darbeli tam dalga doğrultucu [10].	22
Şekil 2.11: 24-darbeli tam dalga doğrultucu [20].	23
Şekil 2.12: D (+ 7.5) d0y11 & D (-7.5) d0y11 transformatörler kuplaj faz diyagramı [20].	23
Şekil 2.13: Örnek zaman çizelgesi [21].	25
Şekil 2.14: Sabit bloklı sinyalizasyon sistemi [22].	26
Şekil 2.15: Radyo bağlantısı üzerinden trenlerin merkez ile haberleşmesi [22].	27
Şekil 2.16: Sistem mimarisi [23].	28
Şekil 2.17: Mevcut kumanda merkezi.	29
Şekil 2.18: Entegre hat ile birlikte önerilen kumanda merkezi yerleşimi.	30
Şekil 3.1: Moskova monoray [17].	34
Şekil 3.2: Raylarda bulunan elektromıknatıslar [28].	35
Şekil 3.3: Hiperloop kapsülünün ana şeması [1].	36
Şekil 4.1: Hat üzerinde tren hareketi [29].	37
Şekil 4.2: Tren adımları [30].	39
Şekil 5.1: Kaçak akım ve dokunma gerilimi basitleştirilmiş modeli [34].	41
Şekil 5.2: Tam topraklanmış sistem [34].	43
Şekil 5.3: Yüzen topraklama sistemi [34].	43
Şekil 5.4: Diyot üzerinden topraklama sistemi [34].	44
Şekil 6.1: Frenleme enerjisi ve diğer tüketimleri [14].	45
Şekil 6.2: Rejeneratif frenlemede enerji depolama şematik gösterimi [39].	46
Şekil 6.3: Kurşun asit batarya iç yapısı [41].	47
Şekil 6.4: Lityum iyon bataryanın iç yapısı [41].	48
Şekil 6.5: Süperkapasitör iç yapısı [39].	49
Şekil 6.6: Volan iç yapısı [42].	50
Şekil 7.1: Temel tren hareketleri hesap algoritması [43].	53
Şekil 7.2: M1A- M1B hattı istasyonları [5].	54
Şekil 7.3: Kirazlı Halkalı Metro Hattı istasyonları	58
Şekil 7.4: Kirazlı Halkalı Metro orta gerilim normal işletme.	63
Şekil 7.5: Sağmalcılar trafo binası orta gerilim hücreleri.	64

Şekil 7.6: Sağmalcılar trafo merkezi cer trafoları.....	65
Şekil 7.7: Sağmalcılar trafo merkezi DC hücreler.....	65
Şekil 7.8: Sağmalcılar trafo merkezi ayırıcılar.....	66
Şekil 7.9: EN 50388'e göre katener hat gerilimize karşı tren akımının izin verilen çalışma aralıkları [48].....	71
Şekil 7.10: Araçlara ait gerilime bağlı akım (solda) ve cer gücü gerilim sınırlama (sağda) grafikleri.....	72
Şekil 7.11: Araçlara ait cer gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları.....	73
Şekil 7.12: Araçlara ait fren gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları.....	73
Şekil 7.13: Durmadan ilerleyen bir araç için sefer sıklığı (headway) şematığı [49].	74
Şekil 8.1: Yenikapı- Otogar hattı genel görünümü.....	75
Şekil 8.2: Yenikapı Otogar ilave 3 trafo merkezi genel şematik görünümü.....	79
Şekil 0.1: M1A -M1 B tek hat şeması.....	92
Şekil 0.2: Kirazlı Halkalı Tek Hat Şeması.....	93
Şekil 0.3: M1A SCADA ekranı.....	94



BİR METRO HATTINDA ARAÇ KAPASİTESİNİN ARTIRILMASININ ORTA GERİLİM VE CER SİSTEMLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Günümüzde, İstanbul gibi, büyük şehirlerde yaşayan bireylerin en büyük sorunlarından biri, trafik ve yolda geçen zaman kaybıdır. Bu durum iş ve sosyal hayatın kalitesini olumsuz etkilemektedir. Trafik sorununu çözmenin en etkili yöntemlerinden biri yüksek yolcu kapasiteli raylı sistemleridir. Raylı sistemlerin sunmuş olduğu düzenli seferleri, erişimi kolay istasyonları insanların günlük hayatlarını daha iyi planlamalarına yardımcı olmaktadır. Trafik problemlerini çözmeye yönelik yeni raylı sistem hatlarının yapılması kadar mevcut hatların kapasitelerinin artırılmasını da gündeme getirmektedir. Bir diğer önemli konu ise enerji verimliliğidir. Raylı sistemlerde enerji tasarrufu yapmaya yönelik hat eğimlerinin azaltılması, hat üzerinde paralelleme çalışmaları, efektif sürüş teknikleri gibi birçok çalışma yapılmaktadır. Yeni araç alımlarında idarelerin, araçların enerji tüketimlerinin simülasyon çalışmaları yapılarak karşılaştırılması, enerji tasarrufu için çok önemlidir. Bu tez kapsamında entegre olan bir metro hattının, hat kapasitesinin artırılması analizi, raylı sistemlerde en büyük tüketici olan trenlerin enerji tüketimlerini görmek amacıyla farklı üç tip aracın karşılaştırılmasıyla yapılmıştır.

Yatırım maliyetlerinin yüksek olması sebebi, fizibilite çalışmalarının yeterince yapılamaması, özellikle büyük şehirlerin nüfus yoğunluğunun sürekli artması yeni hatların yapılmasının yansırı daha önce yapılmış mevcut hatların da kapasitelerinin artırılmasını gerektirmektedir. Mevcut hatların kapasiteleri, tren sefer sıklıklarının artırılması, daha konforlu ve daha fazla yolcu kapasiteli araçlar kullanılması ile mümkün olmaktadır. Hem sefer sıklığı hem de yolcu kapasitesinin artırılması talebinin doğru bir şekilde analiz edilerek cer sisteminin doğru projelendirilmesi gerekmektedir.

Metro hatlarında cer trafo merkezleri istasyon teknik binaları içinde konumlandırılmaktadır ve bu nedenle ilk projelendirme ve olası kapasite artışlarının kolay planlanabilmesi için, istasyonlar arası mesafeye çok dikkat edilmesi gerekmektedir. İstasyon arası mesafelerin fazla olduğu mevcut hatların yolcu taşıma kapasitesinin artırılması, güzergâh boyunca yeni trafo merkezlerinin ilave edilmesini gerektirebilmektedir. Bu durum ilave kamulaştırma problemi getireceğinden yatırım maliyetlerinin artmasına, kamulaştırmadan dolayı proje süreçlerinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle metrolar planlanırken gelecekteki ihtiyaçları da düşünülerek olası entegre olacak hatların da rezervasyonları bırakılarak planlanması önemlidir.

Tez içerisinde raylı sistemlerin tarihsel gelişiminden kısaca bahsedildikten sonra, raylı sistem ekipmanları detaylı olarak tanıtılmış, sinyalizasyon ve SCADA sisteminden bahsedilmiştir. Raylı ulaşım araç tipleri, raylı sistemlerde formülasyonları, kullanılan standartlar, enerji depolama sistemleri, simülasyon verileri, simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Hatta ait istasyon kilometre bilgileri, trafo merkezlerine ait kilometre bilgileri, düşey eğim bilgileri, yatay kurp değerleri, hız limitleri, Metro İstanbul tarafından sağlanarak simülasyon çalışmalarında kullanılmasına izin verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan tüm bilgiler simülasyon verileri bölümünde

detaylı olarak belirtilmiştir. Katener sistemi ile ilgili detaylar ve kabul edilen direnç değerleri simülasyon verileri bölümünde belirtilmiştir.

İşletilmekte olan İstanbul'un en eski hatlarından 1989 yılında yapılan M1A Yeni kapı Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı Kirazlı hattının bir bölümünde, mevcutta 4'lü dizi 180 s sefer sıklığı aracın yapılan normal işletme durumu 90 s sefer sıklığı 4'lü ve 5'li dizilerdeki araçlar ile hat kapasitesi artırılarak analiz edilmiştir. Aynı zamanda cer trafo merkezlerinin arıza durumları ayrı ayrı simüle edilerek indirgenmiş senaryoları 120 s sefer sıklığına göre yapılmıştır. Bu analizler için Hi-SimuX ve SimuX yazılımları kullanılmıştır. Hi-SimuX hem tren hareketlerinin hem de demiryolu güç kaynağı şebekesinin aynı anda hesaplanmasına olanak sağlayan SimuX modülünü kullanmaktadır. Hi-SimuX ve SimuX yazılımları İTÜ Teknokent'te yerleşik HI-SIM Teknoloji Mühendislik firması tarafından geliştirilmiş EN 50641 standardı kapsamında sertifikalandırılmış yerli bir yazılımdır.

Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde EN 50329 standardına göre trafo yüklenmeleri, EN 50122-1 standardına göre ray toprak arası gerilim ve EN 50163 standardına göre minimum tren gerilimleri değerleri kontrol edilmiştir. EN 50329 standardına göre çalışma sınıfı VI olan trafoların % 150 yüke 2 saat, % 300 yüke 1 dakika sınıfı V olan trafoların ise % 150 yüke 2 saat, % 200 yüke 1 dakika sınır kapasiteleri belirtilmiştir. EN 50122-1 standardına göre ray geriliminin alabileceği değer 300 saniyenin üzerindeki değerler için 120 V, 1 saniye için ise 160 V olmaktadır. EN 50388'e göre tren akışı, araçların katener hattı gerilimine göre sınırlandırılmıştır. 750 V DC olan bu hat için bu değer 600 V DC ile sınır değeri alır ve minimum değer 500 V DC olmaktadır. EN 50163 standardına göre 750 V DC nominal gerilimde çalışmaktadır. Hattın en düşük kalıcı gerilimi U_{min1} : 500 V DC en yüksek kalıcı gerilimi U_{max1} : 900 V DC, en yüksek geçici gerilim (maksimum 5 dakika) U_{max2} : 1000 V DC aşırı gerilim (20 ms'den uzun) U_{max3} : 1270 V DC. Simülasyon sonuçlarında bulunan tüm veriler standartta belirtilen sınır değerlere göre kontrol edildi. Araçların EN 50388'e göre katener hat gerilimize karşı tren akımının sınırlandırıldığı kabul edilmiştir. Bu standartlara ait detaylı bilgiler simülasyon verileri bölümünde bulunmaktadır.

M1A-M1B hattında; 19 trafo merkezi ve 6 indirme merkezi bulunmaktadır. Entegre hat üzerinde 9 adet trafo merkezi ve 2 adet indirme merkezi bulunmaktadır. Mevcut hat orta gerilim çalışma senaryoları incelendiğinde belirli bölümlere ayrıldığı, gelen merkezlerden gelen enerjinin kesilmesi durumunda hattın diğer indirgeme merkezi üzerinden kesintisiz olarak istasyonları beslediği görülmektedir. Kirazlı Halkalı Metro hattında hattın başında (Kirazlı) ve sonunda (Halkalı) iki ayrı gelen merkez bulunmaktadır. Normal işletmede istasyonun bir kısmı Halkalı indirici merkezinden, diğer kısmı ise Kirazlı indirici merkezinden beslenmektedir. Gelen merkezlerden birinde arıza olması durumunda tüm istasyonlar tek kaynaktan beslenebilmektedir. Aynı zamanda mevcut hat ve Kirazlı istasyonundan da besleme yapılmaktadır. Ancak orta gerilim işletme senaryolarında mevcut hat ile bir işletme senaryosu planlanmamaktadır.

Orta gerilim sistemi ve cer sistemi SCADA sistemi üzerinden izlenmekte ve kumanda edilmektedir. Mevcut SCADA sistemi incelediğinde yeni entegre hat için ilave lisans gereklilikleri görülmüştür. Cer trafo merkezlerinin fiziki durumları yerinde kontrol edilmiş, cer ekipmanlarının değiştirilmesinin yansısı kapı, yükseltilmiş döşeme, havalandırma gibi birçok inşaat çalışmasının da yapılması gerektiği, ilave gelecek trafo merkezlerinin yerlerinin kamulaştırılması gereklilikleri ortaya çıkmıştır.

Tren hareketi dört aşamadan oluşur: hızlanma, seyir, yavaşlama ve frenleme. Hızlanma, trenin hareket etmeye başladığı andan itibaren en fazla çekiş ihtiyacı duyduğu aşamadır. Seyir aşamasında tren belli bir hıza ulaşır ve çektiği cer kuvveti sabit hale gelir. Seyir halinde hızlanma ve yavaşlamanın olmadığı aşamadır. Tren düz bir hat üzerinde seyrederken veya durmadan önce tam hızla hareket ederken, yavaşlama moduna geçer. Frenleme trenin yavaşlayıp durduğu aşamadır. Frenleme aşamasında tren jeneratör görevi görüyor ve hatta enerji veriyor.

Her bir araca ait senaryolar birinci grup senaryolar, ikinci grup senaryolar, üçüncü grup senaryolar olarak gruplandırılmıştır. Birinci grup senaryolarda beş adet trafo merkezinin hepsinin devrede olduğu, 90 s sefer sıklığına göre simülasyon çalışmaları yapılmış B treni ile C treninin minimum tren gerilimlerinin sınır değeri olan 500 V değerine çok yaklaştığı görülmüştür.

İkinci grup senaryolarda, indirgenmiş işletme için cer trafo merkezlerinin sırayla devre dışı olduğu durum 120 s sefer sıklığı ile simüle edilmiş trafo yüklenmelerinin çok yüksek olduğu ve bazı senaryolarda tanımlı sınır değerlerin aşıldığı görülmektedir.

Ray gerilimi değerlerinin istenen aralıkta olmasına rağmen, minimum tren gerilimi değerlerinin her üç araçta da 500 V gerilim seviyesinin altına düştüğü ve mevcut trafo merkezlerinin yeterli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle cer trafo merkezleri sekiz adede çıkarılarak simülasyon çalışmaları tekrarlanarak üçüncü grup senaryolarda verilmiştir. Araçlara ait km başına tüketim değerleri karşılaştırıldığında %50'ye varan oranlarda enerji tasarrufu yapılabileceği simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir.



THE EFFECTS OF INCREASING VEHICLE CAPACITY ON MEDIUM VOLTAGE AND TRACTION SYSTEMS IN A METRO LINE

SUMMARY

In today's world, one of the major problems faced by individuals living in large cities like Istanbul is traffic congestion and the resulting time loss on the roads. This situation negatively affects the quality of work and social life. One of the most effective methods of solving the traffic problem is rail systems with high passenger capacity. The regular services offered by rail systems and easy-to-access stations help people plan their daily lives better. It brings up the increase in the capacities of existing lines as well as the construction of new rail system lines to solve traffic problems. Another important issue in rail systems is energy efficiency. Many studies are carried out in rail systems such as reducing line slopes, paralleling studies on the line, effective driving techniques to save energy.

Trains are the largest consumers in rail systems. For this reason, the energy consumption of trains should also be analyzed well. In the procurement of new vehicles, it will be very beneficial for the administrations to compare the energy consumption of the vehicles by making simulation studies. Within the scope of this thesis, while investigating the effects of line capacity on medium voltage and traction power, the energy consumption of three different types of trains was also compared.

The reason for the high investment costs, the inability to carry out feasibility studies sufficiently, and the continuous increase in the population density of big cities, especially the construction of new lines, as well as the increase in the capacities of the existing lines that have been built before, necessitate the construction. The capacities of the existing lines are made possible by increasing the frequency of train services and using vehicles that are more comfortable and have a higher passenger capacity. Both the frequency of flights and the demand to increase the passenger capacity should be analyzed correctly and the traction system should be designed correctly. Traction substations on metro lines are located in the station technical buildings, and for this reason, it is necessary to pay close attention to the distance between stations in order to easily plan the initial project design and possible capacity increases. Increasing the passenger carrying capacity of existing lines with high distances between stations may require the addition of additional substations along the route. Since this situation will bring additional expropriation problems, it causes an increase in investment costs and prolongation of project processes due to expropriation. For this reason, while planning the subways, it is important to plan the lines that will be integrated by leaving reservations, considering their future needs.

After briefly mentioning the historical development of rail systems in the thesis, transmission systems, medium voltage system, DC system equipment, signaling and SCADA system are mentioned in the second part. In the third part, rail transportation vehicle types are explained in detail. In the fourth chapter, train motion and Davis formulation are explained in detail. In the fifth chapter, information about leakage current control and grounding system in rail systems is briefly explained. In the sixth chapter, regenerative braking and storage systems are described. In the seventh section,

the details of the software used, the station mileage information of the line, the mileage information of the substations, the vertical slope information, the horizontal curve values, the speed limits, the data of the real line, the standards used, the calculation of the frequency of the trip, the medium voltage operating scenarios, the physical conditions of the existing substation are shared. In the eighth chapter, the simulation results are shared in detail. The speed limits on the route with an operating speed of 80 km / h are given in a table. The speed of entry into the station was considered to be 40 km / h. The dwell time at the station is accepted as 25 s. It has been accepted that the trains will stop in the middle of the platform in the calculations.

Train movement consists of four stages: acceleration, cruising, coasting, and braking. Acceleration is the stage where the train needs the most traction from the moment it starts moving. During the cruising phase, the train reaches a certain speed and the traction force it draws becomes constant. It is the stage where there is no acceleration or deceleration in coasting. When the train is traveling on a straight line or moving at full speed before a stop, it goes into coasting mode. Braking is the stage when the train slows down and stops. During the braking phase, the train works as a generator and even energizes.

The tools used in the simulation are symbolically named. Train A is simulated as a series of 5, train B as a series of 5 and train C as a series of 4. One of the tools used in the simulation is operated on the existing line as a series of 4 with a frequency of 180 s. Each parameter and curve are given for a single tool. The auxiliary power system of the trains is considered in such a way that 50% is loaded at all times. According to the standards, the passenger carrying capacity of the vehicles is evaluated as AW0: vehicle without passengers, AW1: seated passenger and standing passenger 4 persons/m², AW2: seated passenger and standing passenger 6 persons/m², AW3: seated passenger and standing passenger 8 persons/m². For the simulation study, it was assumed that there were 1250 passengers weighing 70 kg in all trains. Voltage-dependent current (left) and traction power voltage limiting (right) graphs, traction power [kN]- speed [km/h] diagrams, braking power [kN]- speed [km/h] graphs of vehicles are given comparatively.

Many factors such as traction force acting on the train, resistance forces, speed of the train, slope, train weight, frequency of travel, acceleration and braking come into play. Various simulation tools are needed to calculate such variable parameters. Within the scope of this thesis, Hi-SimuX and SimuX softwares were used for analysis. Hi-SimuX uses the SimuX module, which allows simultaneous calculation of both train movements and the railway power supply network. Hi-SimuX and SimuX software is a domestic software certified within the scope of EN 50641 standard developed by HI-SIM Technology Engineering company located in ITU Technopolis. With this simulation program, train performance analysis, trip frequency, single line operation tests, traction power and substation sizing, determination of maximum, minimum and average voltage values in train pantograph, regenerative energy use, rail voltage and leakage current analysis, short circuit current calculations, testing of different supply scenarios, determination of energy consumption and losses are used in many analyzes.

On the M1A-M1B line; There are 19 substations and 6 lowering centers. On the integrated line, there are 9 transformer centers and 2 lowering centers. When the existing line medium voltage operating scenarios are examined, it is seen that it is divided into certain sections, and in case the energy coming from the incoming centers is cut off, the line feeds the stations through the other reducing center without

interruption. On the Kirazlı Halkalı Metro line, there are two separate incoming centers at the beginning (Kirazlı) and at the end (Halkalı) of the line. In normal operation, one part of the station is fed from the Halkalı incoming center, while the other part is fed through the Kirazlı lowering center. In the event of a malfunction in one of the incoming centers, all stations can be fed through a single source. At the same time, there is also a supply via the existing line and Kirazlı station. However, in medium voltage operating scenarios, an operating scenario is not planned with the existing line. It is seen that medium voltage operating scenarios are made as two different lines of both lines. The medium voltage system and traction system are monitored and controlled via the SCADA system. When the existing SCADA system was examined, additional license requirements were found for the new integrated line. The physical conditions of the traction substations were checked on site, and in addition to replacing the traction equipment, many constructions work such as doors, raised floors, ventilation should be carried out, and the requirements for the expropriation of the locations of additional future substations were revealed.

Within the scope of this thesis, in a part of the M1A Yenikapı Atatürk Airport and M1B Yenikapı Kirazlı line, which was built in 1989, one of the oldest lines in Istanbul, the current 4-series 180 s trip frequency, the normal operating status of the vehicle, the 90 s trip frequency, the line capacity of the vehicles in the 4 and 5 series were analyzed by increasing the line capacity. At the same time, the fault conditions of the traction substations were simulated separately, and the traction power needs of the traction substation failures were made according to the frequency of 120 s.

In the evaluation of the simulation results, transformer loads according to EN 50329 standard, rail-ground voltage according to EN 50122-1 standard, minimum train voltages according to EN 50163 standard and train currents according to EN 50388 were checked. It has been observed that overload service class (duty) V and VI transformers are used in the project. According to the EN 50329 standard, the limit capacities of transformers with operating class VI are specified for 2 hours for 150% load, 1 minute for 300% load, 2 hours for 150% load, and 1 minute for 200% load for transformers with class V. According to the EN 50122-1 standard, the value that the rail voltage can take is 120 V for values greater than 300 seconds and 160 V for 1 second. According to EN 50388, the train flow is limited against the catenary line voltage of the vehicles. For this line, which is 750 V DC, this value takes the limit value with 600 V DC and the minimum value is 500 V DC. Operate at a nominal voltage of 750 V DC according to EN 50163 standard Lowest permanent voltage of the line U_{nmin1} : Highest permanent voltage of 500 V DC U_{nmax1} : 900 V DC, highest transient voltage (maximum 5 minutes) U_{max2} : 1000 V DC overvoltage (longer than 20 ms) U_{max3} : 1270 V DC. All data found in the simulation results were checked according to the limit values specified in the standard.

There are both conventional catenary and rigid catenary systems on the existing line. The normal catenary system is 44.4 milliohms, and the S49 single line rail resistance is 20.5 milliohms per km. In addition, it was accepted that there was a parallel between the rails at 250 m, while there was no paralleling in the catenary line. The rectifier powers on the existing line are taken as 2x2100 kVA and the rectifier groups at the beginning and end of the line are accepted as a single line in order to make a real line model.

The scenarios of each vehicle are grouped into first group scenarios, second group scenarios, and third group scenarios. In the first group of scenarios, it was observed

that all five transformer substations were active, and the minimum train voltages of the B train and the C train, which were simulated according to the frequency of 90 s, were very close to the limit value of 500 V.

In the second group of scenarios, it is seen that the simulated transformer loads are very high with a frequency of 120 s and the defined limit values are exceeded in some scenarios when the traction substations are sequentially disabled for the reduced operation. Although the rail voltage values were within the desired range, it was observed that the minimum train voltage values fell below the 500 V voltage level in all three vehicles and the existing substations were not sufficient. For this reason, traction substations were increased to eight and simulation studies were repeated and given in the third group of scenarios. When the consumption values per km of the vehicles are compared, it has been shown by simulation studies that energy savings of up to 50% can be achieved. Although the B train has more traction, the energy requirement per km is lower than the C train because its regenerative braking is better. It shows that both traction and regenerative braking curves of vehicles should be evaluated together in traction design.



1. GİRİŞ

Dünyada ilk raylı sistemler 17. yüzyıllarda maden ocaklarından kömürleri taşımak amacıyla kullanılmaya başlanmış sonrasında insan taşımacılığı olarak devam etmiştir. İlk atlı tramvay New York'ta 1832 yılında Harlem-Manhattan arasında yaklaşık 25 kişi taşımaya başlamış ve Paris, Londra, St. Petersburg, Berlin, Viyana ve Budapeşte de atlı tramvay hatları açılmıştır. Atlar tarafından çekilen vagonlar, 18. yüzyıl ortalarında buhar makinesinin icadıyla hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır. Daha sonra 19. yüzyıllarda elektrik tahrik gücü ile çalışan sistemler haline gelmiştir [1].

1881 yılında Werner Von Siemens tarafından yapılan ilk elektrikli tramvay hattı Berlin'de işletmeye açılmıştır (Şekil 1.1). Dünyada ilk metro hattı ise Londra'da 1863 yılında 6 km uzunluğunda hizmete açılmıştır [2]. 150 V DC işletme gerilimi ile 3. raydan enerji sağlanan lokomotif 13 km/h hıza sahipti. 1883 yılında 4,5 km uzunluğunda çift havai hatla çalışan ilk raylı sistem ise Avusturya'da Mödling-Hinterbrühl tramvayı olmuştur. Amerika'da Frank Sprague havai hatta iyileştirmeler yaparak 1888 yılında Virginia Richmond şehrinde elektrikli tramvay ulaşımını başlatmıştır.

1890'lı yıllara gelindiğinde Londra, Newyork ve Paris gibi birçok büyük şehirde yeraltında elektrikli raylı sistemler çalışmaya başlamıştır. 19. yy. ile birlikte elektrikli treni geliştirmek için çalışmalar yapılmıştır. İlk yeraltı tüp hatlarında elektrikli bir adet lokomotif diğer vagonları çekilmiştir. Yirminci yüzyılın ortalarında Londra'da tüp hatlarında tek lokomotifli çekiş sistemi yerine tren boyunca çekici motoru olan, çekiş ve frenleme gücünün tüm tren boyunca yayılmasını ve trenin çabuk kalkabilmesini sağlayan araçlar kullanılmıştır. Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra trenlerde havai hat (AC) İsviçre'nin öncülüğünde kullanılmaya başlayarak 1930'lu yıllara kadar tüm Avrupa kıtasına yayılmıştır [1].

Dünyada şehirleşmelerin artması ile kent içi yolcu taşımacılığında raylı sistemler ön plana çıkmıştır. Ülkemizde demiryolu tarihi, ilk olarak 1856 yılında 130 km İzmir-Aydın demiryolu hattının açılmasıyla başlamıştır. 1869 yılında İstanbul'da Karaköy Tüneli olarak bilinen ilk tünel çalışması başlatılmıştır. Karaköy Tünelinden sonra 1989

yılında İstanbul hafif metro hattı ve 1992 yılında Konya hafif metro hatları hizmete başlamıştır [3].



Şekil 1.1: Werner Von Siemens tarafından 1879 yılında inşa edilen ilk elektrikli lokomotif [4].

Ülkemizde raylı sistemlerin en fazla ihtiyaç duyulduğu şehirler arasında yaklaşık 16 milyon nüfusu ile İstanbul gelmektedir. Trafik yoğunluğunun artması, karayolu taşımacılığına nazaran çevreye olan olumsuz etkileri dikkate alındığında güvenli ve hızlı bir ulaşım aracı olan raylı sistemlere olan ilgiyi artırmaktadır. İstanbul’da raylı taşımacılık oranı %41,9’leri bulmaktadır [5]. Raylı sistem yatırımları büyük bütçeler gerektirir. Bu nedenle yatırım planlanması öncesi fizibilite çalışmalarının doğru yapılması gerekmektedir.

Yeni yapılan yatırımların mevcut hatlar ile entegrasyonunu planlanmanın yansira gelecekte yapılması düşünülen hatlar için de rezervasyon ihtiyaçları analiz edilmelidir. Raylı sistemlerin tercih edilme oranının artması için, raylı sistemlere kolay ulaşılabilir olması aynı zamanda entegrasyon bölgelerinde uzun mesafelerin olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu entegrasyonlar planlanırken işletme parametreleri, araç parametreleri de değişebilmektedir. Raylı sistem yatırımları büyük bütçeler gerektirir bu nedenle yatırım planlanması öncesi fizibilite çalışmalarının doğru yapılması gerekmektedir. Yeni yapılan yatırımların mevcut hatlar ile entegrasyonunu planlanmanın yansira gelecekte yapılması düşünülen hatlar için de rezervasyon ihtiyaçları analiz edilmelidir. Enerjinin verimli kullanılması ve işletme sürekliliğinin sağlanması için yedekliliğinin sağlanması gerekmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Gelişen teknoloji ve artan kapasite ihtiyacı sebebiyle raylı ulaşım sistemleri hem daha ekonomik, daha hızlı, yüksek yolcu kapasiteli bir ulaşım şeklidir. Yakıt yerine elektrik ile çalıştığından çevre kirliliği ve gürültüsü gibi olumsuz etkileri de bulunmamaktadır. Aynı zamanda şehrin genel görüntüsüne katkı sağladığı gibi, trafik problemine de önemli katkılar sağlamakta yaşam kalitesini artırmaktadır. Raylı sistemlerin ulaşımına olan olumlu etkileri birlikte yeni yaşam ve ticaret alanlarının da oluşmasına katkı sağlamaktadır. Raylı sistem kullanımının artırılmasına yönelik yeni hatların yapılmasının yansısı mevcut hatların performansının artırılması daha da önem kazanmaktadır.

Yapılan bu tezin amacı işletme altında olan eski hatların kapasitelerinin artırılması amacıyla güç sistemlerinde yapılması gereken revizyonları anlatmaktır. Bu tez kapsamında İstanbul'un en eski hatlarından biri olan M1A Yeni kapı – Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı-Kirazlı hafif raylı hattının yeni yapılacak olan Kirazlı Halkalı Metro Hattı ile entegrasyonu ve yeni alınacak olan araç parametrelerine göre güç teminin belirlenmesi tez kapsamında örnek olarak incelenecektir. Entegre olan hatların işletme senaryoları incelenecektir. Mevcut hattın kumanda merkezi, trafo binaları incelenerek yapılacak revizyonlar belirlenecektir.

Üç farklı tip araç verileri ile yapılacak simülasyon sonuçlarına göre araçların enerji tüketimleri de karşılaştırılacaktır. Mevcut hattın değerlendirmeleri, parametreleri, sistem kısıtlamaları, mevcut trafo merkezlerinin yeni işletme güçlerine göre yenilenmesi, hat simülasyonlarından detaylı olarak söz edilecektir. Simülasyon çalışmalarında hem normal işletme durumları hem de trafo arızaları ayrı ayrı değerlendirilecek, yeni trafo merkezlerinin gerekmesi durumunda öngörülen trafo merkezi konumlarına göre simülasyon çalışmaları tekrar yapılacaktır.

Araçlara ait km verileri paylaşılarak enerji tasarrufu açısından araç seçiminin önemine değinilecektir. Bu tez kapsamında Simülasyon yazılımından yararlanılacaktır. Bu çalışma araç parametreleri değişecek veya kapasitesi artacak, tüm hatlarda planlanması gereken süreçlere referans olacaktır.

1.2. Literatür Araştırması

Literatürde Raylı sistemler ve cer gücü sistem modellemesi üzerine birçok akademik çalışma, makale, tez ve modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC), Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) gibi özel ve kamu kuruluşuna ait yayınlardan, Siemens, Eaton, Alstom, EM Elektrik gibi üretici firmaların kaynaklarından, ulusal ve uluslararası standartlardan yararlanılmıştır.

17. Yüzyıllarda maden taşımacılığı olarak başlayan raylı sistemlerin dünyada ve ülkemizdeki tarihsel gelişimi ve taşımacılıktaki önemi, raylı sistem elektrifikasyonu birçok tezde detaylı olarak ele alınmıştır [1-7]. Raylı sistemlerde izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri standartlar ile sınırlandırılmıştır [8, 9].

Ulaş Cihangir, “Çok İstasyonlu ve Çoklu Tren Setli Bir Metro Hattının Matematiksel Modellemesi ve İşletim Senaryolarının Karşılaştırılması” tezinde dört istasyonlu bir hattın farklı senaryolardaki kalkış karakteristiklerini ve toplam harmonik bozunumlarını MATLAB programında modelleyerek incelenmiştir [2].

İlyas Özmen, “750 V DC Cer Gücü Tedarik Sisteminin Bilgisayar Destekli Modellemesi, Benzetimi ve Analizi” tezinde Yenikapı-Taksim Hacıosman Metrosunun modellemesini gerçekleştirmiştir [10].

Uluslararası demiryolu sempozyumunda TS EN 50367 standardın ve enerji iletim sistemlerinin paylaşıldığı yayınlar incelenmiştir [11, 12].

Kiessling, F. ve arkadaşları tarafından yazılan “Contact Lines For Electric Railways: Planning, Design, Implementation And Maintenance” isimli kitapta elektrikli raylı sistemlerde kullanılan elektromekanik gereklilikler anlatılmıştır [13].

Süleyman Açıkbaş, “Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü” doktora tezinde; raylı taşıma sistemlerinde enerji tasarrufuna yönelik yöntemler ve kazanımlar simülasyon çalışmaları ile verilmiştir [14].

Yapımı tamamlanan Ankara-İstanbul Demiryolu hattı gibi projelerde kullanılan eğitim ve teknik raporlardan, konferans bildirgelerinden yararlanılmıştır [15-20].

Ertuğrul Ateş, “Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemleri için Emniyetli Fren Mesafesi Hesabı” tez çalışmasında tek hat üzerinde birbirini takip eden hafif raylı

sistemlerin fren mesafeleri incelenerek trafik akış hızının artırılmasına yönelik ön çalışma yapmıştır [21].

Yalçın Çetin, “Demiryollarında ATC ve ATO Sistemleri” tezinde hareketli blok sisteminin tasarımı ve uygulanması ile ilgili çalışma yapmıştır [22].

Metro İstanbul tarafından sağlanan veriler kullanılmıştır simülasyon çalışmaları için kullanılmıştır. [23].

İlhan Keskin, “Raylı Sistemlerde Yol Tasarımının Enerji Tüketimi Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi” yüksek lisans tezinde hat eğimlerini %1 eğimlerden %4 eğimlerin enerji tüketimine olan etkilerini araştırmıştır [25].

Raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan araç tipleri incelenmiştir [26, 27].

Turan Söylemez, raylı sistemler mühendisliği ders notlarında sızıntı akımlarına karşı yapılan topraklama sistemlerinden genel bilgi vermiştir [28].

Raylı sistemlerde kullanılan Davis formülasyonu ve elektrikli bir tren hareketinin benzetim ortamında modellenmesi çalışmaları incelenmiştir [29, 30]

Mehmet Taciddin Akçay, tarafından “Metro Hatlarındaki Ray Gerilimini EN 50122 Standardına Uygun Olarak Sınırlandırılmada Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması” makalesinde ray gerilimin düşürülmesine yönelik besleme gerilimi seviyeleri değiştirilerek ve trafo merkezi ilavesi çalışması yapılmıştır [31].

M. Niasati ve A. Gholami, “Overview of stray current control in DC railway systems” adlı makalelerinde DC Cer gücü sistemlerinde uygulanan kontrol şemaları ile ilgili genel bilgi vermiştir. [32].

P.J. Aylott, “Stray Current is for Life-Not Just for Christmas. Stray Current Corrosion Management Strategies for DC Traction Systems” makalesinde tasarım aşamasında kaçak akım ile alınabilecek önlemlerden bahsetmiştir [33].

Salman Aatif ve arkadaşları “Analysis of Rail Potential And Stray Current in MVDC Railway Electrification System” makalesinde topraklama sistem çeşitlerini detaylandırarak, ray potansiyeli ve kaçak akımlar ile ilgili yapmış oldukları simülasyon çalışmalarını paylaşmıştır [34].

Zhongbei Tian “System Energy Optimisation Strategies for Dc Railway Traction Power Networks” doktora tezinde sistem optimizasyonuna yönelik stratejileri anlatmıştır [35].

T. Albrecht, “Reducing Power Peaks and Energy Consumption in Rail Transit Systems by Simultaneous Train Running Time Control” adlı makalesinde enerji optimizasyonuna yönelik sefer sıklığının optimize edilmesi dinamik model ile açıklanmıştır [36].

Jyh-Cheng ve En-Fu Chang, “Models for Estimating Energy Consumption of Electric Trains” adlı makalesinde rejeneratif frenlemeyi formüle etmiştir [37].

Alfred Rufer ve arkadaşları, “Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks” adlı çalışmalarında hattın zayıf olduğu noktalarda süperkapasitörleri kullanılarak hem yedek bir kaynak olarak kullanılmış hem de gerilim seviyesi iyileştirilmiştir [38].

Yücel Özdemir, “Elektrikli Raylı Ulaşım Sistemlerinde Frenleme Enerjisinin Geri Kazanım Yöntemleri ve Kadıköy-Kartal Metro Hattı Üzerinde İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezinde rejeneratif frenleme enerjisinin geri kazanımına ve bu enerjinin depolanmasına yönelik sistemler incelenmiştir [39].

Saim Baran, “Şehir İçi Raylı Sistem İşletiminde Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Kullanımı ve Analizi” yüksek lisans tezinde rejeneratif enerjiye etki eden parametrelerin simülasyon yazılımı ile analizini gerçekleştirmiştir [40].

Batuhan Yavuz, “Enerji Depolama Sistemlerinin Modellenmesi ve Analizi” yüksek lisans tezinde enerji depolama sistemlerinin modellenmesini yaparak, performanslarını karşılaştırmıştır [41].

Modern enerji depolama sistemleri, orta gerilim besleme senaryoları, enerji kayıplarının karşılaştırılması, simülasyon çalışmaları için gerekli olan raylı sistemler standartları incelenmiştir [42-48].

Sinyalizasyon sistemi ve CBTC ile süre artışının enerji verimliliği üzerine stratejilerinin karşılaştırılması incelemeleri yapılmıştır [49, 50].

Huzeyfe Kara, “Enerji Tüketimi Bazlı AHP Yöntemi ile Raylı Sistem Güzergâh Seçimi ve Uygulaması” çalışmasında %10-15 arasında bir enerji tasarrufu yapıldığı sonucuna ulaşmıştır [51].

1.3. Hipotez

Enerji beslemesinin sürekliliğinin sağlanması raylı sistemlerde temel konulardan biridir. Bu nedenle bir raylı sistem hattının yedekli olarak beslenmesi, tek kaynak durumunda hattın tamamının beslenmesi, tüm kaynakların devre dışı kalma durumunda acil durum jeneratörü ve UPS'ler ile sistemin sinyalizasyon, haberleşme, acil durum aydınlatması vb. kritik sistemlerinin enerjisinin sürekliliği sağlanmaktadır. Mevcut hatların daha fazla dizili, daha konforlu araçlarla işletilmesi talep edildiğinde sistemin mevcut elektrik altyapısının yeni araçları işletip işletilmeyeceği iyi analiz edilmeli, yenileme öncesinde tüm altyapının değiştirilmiş olması gerekmektedir. Cer gücünü belirleyen en önemli etken araç olduğundan yapılacak simülasyon öncesi araç bilgilerinin netleştirilmiş olması gerekmektedir. Bu tez mevcut hattın bir bölümünde üç farklı araç tipinde yapılan incelemeler sunulacaktır.

Mevcut cer trafolarının araç kapasitesi artışı ile birlikte yeterli olup olmadığı değerlendirilerek cer trafo merkezi ilave ihtiyaçları belirlenecektir. Cer trafo merkezlerinin arıza durumları da ayrıca analiz edilerek durumları kontrol edilecektir. Hat gerilimi, ray gerilimi, minimum tren gerilimi ve trafo yüklenmeleri standartlarda verilen sınır değerlerde olup olmadığı kontrol edilecektir. Enerji verimliliği üzerine üç farklı araca ait verilerin karşılaştırılması yapılacaktır. İki hattın entegrasyonu için gereklilikler belirlenecektir.



2. RAYLI SİSTEM EKİPMANLARI

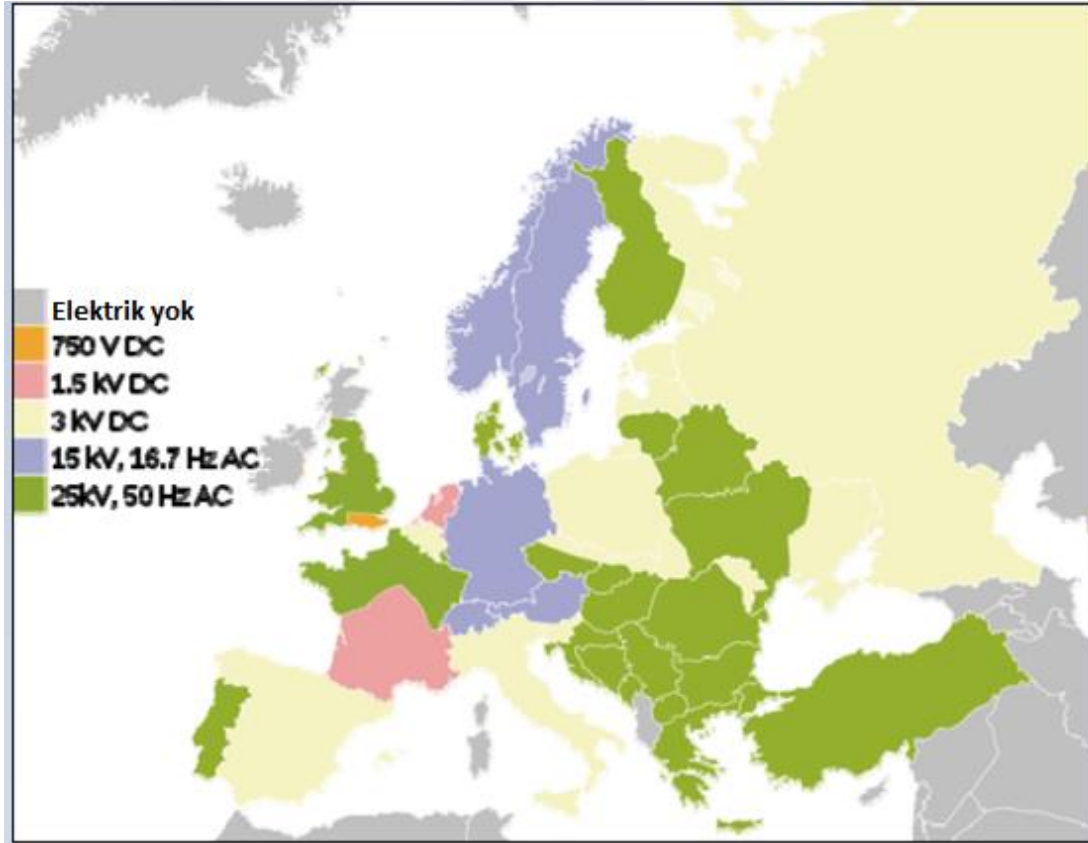
2.1. İletim Sistemleri

Hata Raylı sistemlerin türü, ihtiyaca ve araç motor karakteristiğine göre belirlenmektedir. Raylı sistemlerin en temel konusu tren hareketini sağlamaktır. Elektrik enerjisi yerel şebekeden indirici trafo merkezi tarafından gerilim seviyesi ihtiyacına göre ayarlanmaktadır. Daha sonra bir ring şebeke yapısıyla trenin elektrik ihtiyacı kurulan Cer Gücü Trafo Merkezleri ile sağlanmaktadır.

Raylı sistemlerin tarihi boyunca Cer motorlarındaki teknolojik gelişmeler ile farklı gerilim seviyelerinde ve frekanslarda enerji sistemleri kullanılmıştır. 15 kV AC 16 2/3 Hz İsviçre ve Almanya'da, 25 kV AC 50 Hz hızlı tren hatlarında, 2 x 25 kV AC 50 Hz Fransa'da kullanılmıştır. Metrolarda genelde 750 VDC, 1500 VDC gerilim seviyeleri daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte Almanya, İngiltere, Fransa, Tokyo gibi ülkelerde 600 VDC, Moskova'da 825 VDC gibi farklı gerilim seviyeleri de kullanılmaktadır. Bununla birlikte Belçika, İtalya, İspanya, Polonya, Kuzey Çek Cumhuriyeti, Slovenya, Batı Hırvatistan, Güney Afrika ve Eski Sovyetler Birliği ülkelerinde 3000 V DC gerilim seviyesi kullanılmaktadır [6].

Hattın kapasitesi ve sefer sıklığı (headway) sürelerine bağlı olarak enerji sisteminin gerilim seviyesine karar verilmektedir. Bu kısımda enerji sistemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajlarına değinilmiştir. DC sistemlerde trafo merkezleri arasındaki mesafe gerilim seviyesine bağlı olarak 1-5 km arasında değişirken, AC sistemlerde 40 km mesafelerine kadar değişmektedir. Dolayısıyla DC sistemlerin yatırım, işletme ve bakım maliyetleri AC sistemlere oranla daha fazladır. Aynı zamanda AC sistemlerde katener maliyeti DC sistemlere göre daha ekonomiktir. DC sistemde hata algılama için daha kompleks sistemler kullanılırken AC sistemlerde daha basit devreler kullanılmaktadır. DC sistemde katenerde yalıtım (izolasyon) mesafeleri daha kısa, şehir içi ve tünellerde montajı daha kolaydır, AC sistemde ise yalıtım mesafeleri daha uzun şehir için ve tünellerde montajı daha zordur. DC sistemde AC sisteme göre gerilim düşümü ve reaktif güç akışı söz konusu değildir. DC sistemde

düşük gerilim seviyesi nedeni ile (%14-16) [7] kayıplar söz konusu iken AC sistemde gerilim seviyesinin yüksek olması sebebi ile kayıplar daha az olmaktadır. DC sistemde yüksek akım seviyeleri nedeni ile katener maliyeti AC sisteme göre daha fazla olmaktadır. Buna karşın DC sistemde araçlar AC sisteme göre daha yavaş hareket etmektedir. DC sistemde katenere iki adet bağlantı kablosu bulunmaktadır, buna karşın AC sistemde katenere bir adet kontak kablosu bulunmaktadır. DC sistemde yüksek akımlardan dolayı geri dönüş akımı yüksek olmakta ve yüksek korozyon riski taşımaktadır. DC sistemde ise geri dönüş akımı düşüktür ve korozyon riski de akımla orantılı şekilde daha düşüktür. Kablo kesitleri olarak değerlendirildiğinde DC sistemlerde kablo kesitleri AC sistemlere göre daha büyük kesitli seçilmektedir. AC sistemin DC sisteme göre olumsuz manyetik alan etkisi de bulunmaktadır. Ükelere göre enerji dağılımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Ükelere göre enerji dağılımı [6].

Ülkemizde yeni yapılan hatlarda besleme gerilimi ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılması sebebiyle 1500 VDC olarak seçilmektedir. Ancak eski hatlar M1A- M1B hatlarında olduğu gibi 750 VDC olarak tasarlanmıştır. EN 50163 ve IEC 60850

standartlarına göre maksimum ve minimum gerilim değerleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : EN 50163 ve IEC 60850 standartlarına göre izin verilen maksimum ve minimum hat gerilimleri [8,9].

	U_n (V)	U_{nmin2} (V)	U_{nmin1} (V)	U_{max1} (V)	U_{max2} (V)	U_{max3} (V)
DC 600 V	600	-	400	720	800	1015
DC 750 V	750	-	500	900	1000	1270
DC 1,5 kV	1500	-	1000	1800	1950	2540
DC 3,0 kV	3000	-	2000	3600	3900	5075
AC 15 kV 16,7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24300
AC 25 kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38759

U_n : Anma (nominal) gerilim

U_{nmin1} : En düşük kalıcı gerilim

U_{nmax1} : En yüksek kalıcı gerilim

U_{min2} : En düşük geçici gerilim (maksimum 2 dakika)

U_{max2} : En yüksek geçici gerilim (maksimum 5 dakika)

U_{max3} : Aşırı gerilim (20 ms’den uzun)

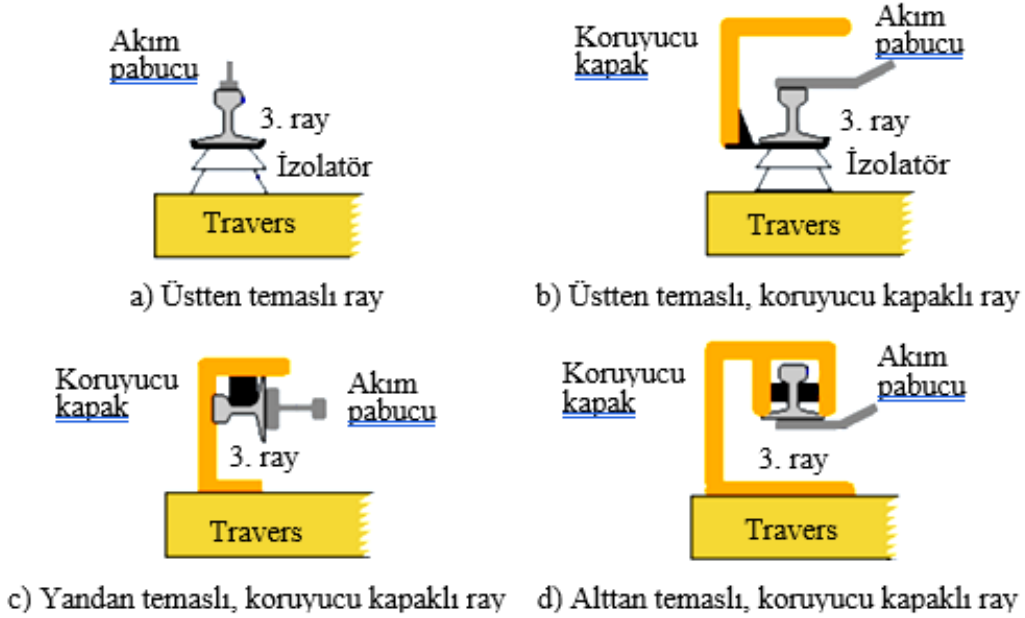
Enerji iletiminde katener sistemleri, 3. ray sistemi ve rijit katener sistemleri kullanılmaktadır. Metrolarda tünel kesitlerinin küçük olması sebebi ile 3. ray sistemi veya rijit katener sistemleri tercih edilmiştir.

2.1.1. Üçüncü ray sistemi

1200 VDC seviyesi, 100 km/h hızlara kadar 3. ray sistemi kullanılmaktadır. Katener sistemine göre daha ekonomik ve kompakt yapıda olan 3. ray sistemi daha küçük tünel kesitlerinde özellikle tercih edilmektedir. Taşıyıcı raylara paralel 20 cm yükseklikte monte edilen 3. ray sistemi platform altına veya platforma uzak olan taşıyıcı rayın altına monte edilmektedir. Tren enerjisini, trenin bojisi üzerinde bulunan kollektör pabucu vasıtasıyla 3. raydan almaktadır.

3. ray sistemi plastik koruyucu kapaksız ve üstten temaslı, koruyucu plastik kapaklı üstten temaslı, yandan temaslı ve alttan temaslı olmak üzere 4 çeşit olup, çelik ve Al kompozit (Al-MgSi) tasarlanmaktadır. Üsten temaslı diğerlerine göre daha az güvenlidir, çünkü ray üzerinde insan yürüdüğünde temas edebilir bu nedenle başlıklı

olarak kullanılmaktadır. 3. ray uygulamalarında can güvenliğinin sağlanabilmesi için NFPA 130 standardında Acil Durum Enerji Kesme sistemin kurulması gerektiği belirtilmektedir. 4. ray (-) geri dönüş iletkeni olarak kullanılan, 3. ray haricinde benzer sistemler eski hatlarda kullanılmıştır. Ray sistemi çeşitleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Ray sistemi çeşitleri [10].

2.1.2. Rijit katener sistemi

Üçüncü raya göre daha güvenilir bir sistem olan rijit katener sistemi günümüzde daha fazla tünellerde kullanılan bir sistemdir (Şekil 2.3). Bakımı daha kolay ve yüksek iletkenliğe sahip olan rijit katener sistemleri Al kompozit bir profil ve bu profile bağlı bir kontak telinden oluşmaktadır. Normal katener sistemine göre rijit katener sistemi montajı daha kolaydır ve daha küçük tünel kesiti gerektirmeyerek inşaat maliyetinin de daha az olmasını sağlamaktır.

Normal katener sistemi gibi seyir teli kopma problem bulunmamaktadır. Yüksek kısa devre dayanımına sahip rijit katener sistemi ile 3500 A akım taşıma kapasitesi ile 250 km/h hızlara işletme yapabilmek mümkündür [11]. Rijit katenere ve seyir teli Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Rijit katener ve seyir teli [2].

2.1.3. Normal katener sistemi

Ana demiryollarında ve yüksek hızlı tren hatlarında kullanılmaktadır. 15 kV AC veya 25 kVAC gerilim seviyeleri kullanılır ve yüksek hızlardaki işletme için uygundur. TS EN 50367 standardına göre AC ve DC hatlar Çizelge 2.2'deki gibi kategorilere ayrılmaktadır [12].

Çizelge 2.2 : AC ve DC kategorileri [12,13].

AC Hat İşletme Hızı (km/s)	$V \leq 160$	$160 \leq V \leq 220$	$220 < V < 250$	$V \geq 250$
AC Hat Kategorisi	AC1	AC2	AC3	AC4
DC Hat İşletme Hızı (km/s)	$V \leq 160$	$160 < V \leq 220$	$220 < V \leq 250$	-
DC Hat Kategorisi	DC1	DC2	DC3	-

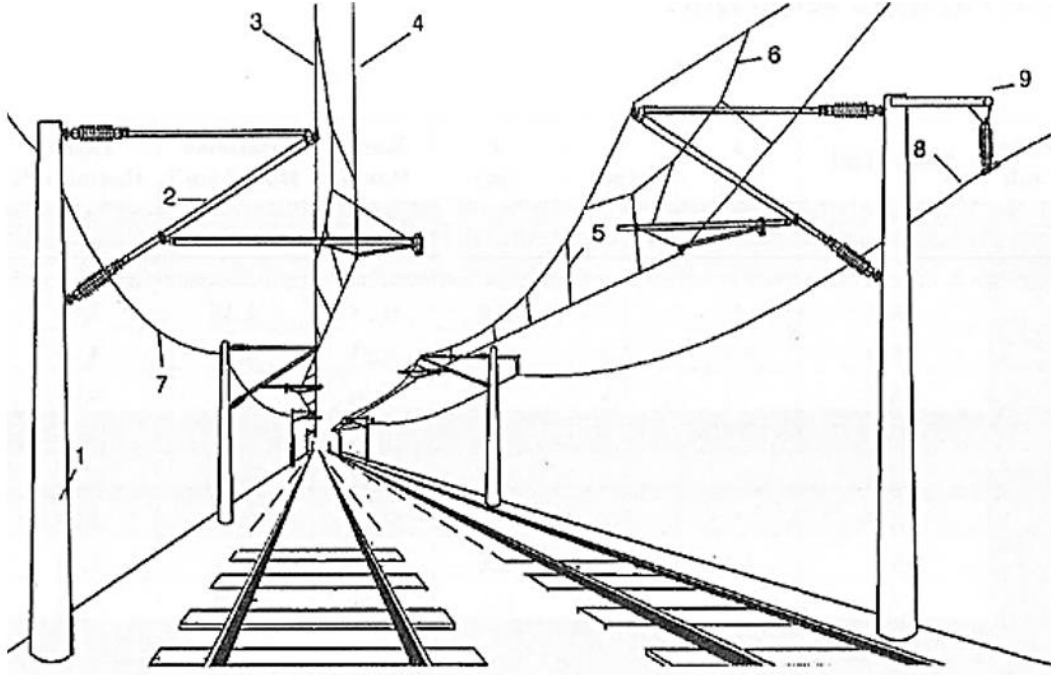
Seyir teli yüksekliği belirlenirken hattın işletme hızına göre karar verilmektedir. Seyir telinde, Ag veya Mn katkılı kontak teli ve 107 mm², 120 mm² veya 150 mm² kesitleri kullanılmaktadır [14]. Çizelge 2.3'te TS EN 50367 göre seyir yükseklikleri belirtilmiştir. Türkiye'de yüksek hızlı demiryollarında seyir teli yüksekliği 5,3 m olarak uygulanmaktadır.

Çizelge 2.3 : Seyir Teli Yükseklikleri [12,13].

Kategori	AC1	AC2	AC3	AC4
Anma Seyir Teli Yüksekliği (m)	5,0–5,75	5,0-5,5	5,08-5,30	
Minimum Seyir Teli Yüksekliği (m)	4,95	4,95	-	
Maksimum Seyir Teli Yüksekliği (m)	6,20	6,00	-	

Portör teli, seyir telinin belirli aralıklarla askıya alınarak taşındığı teldir. Mekanik dayanıklılık ve esneklik açısından seyir teli gibi tek, dolu iletken olmayıp 19 telden oluşan örgülü iletkenidir. Seyir teli, portör teli, y halatı, pandül gibi katener bileşenlerini taşıyan, istenilen seviyede ve ekseninde tutulmasını sağlayan donanıma Konsol – Hoban donanımı denir.

Hattın esnekliğinin azaldığı askı noktalarında seyir teli doğrudan portör teline bağlanmaz, takılan y halatı ile bir tür süspansiyon görevi görür. Taşıyıcı direkler arasındaki mesafe güzergahın duruma göre 60 m'lere kadar çıkmaktadır. Kontak telinin çok esnek veya çok gergin olmaması ve pantograf güzergâh boyunca kesintisiz devam etmelidir. Kontak teli ömrü yaklaşık 30 yıldır. UIC standartlarına göre kontak telinin %20'sinin aşınması durumunda değiştirilmesi tavsiye edilmektedir. Şekil 2.4'te katener sistemi bileşenleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Katener sistemi bileşenleri [15].

- 1: Direk; 2: Konsol-hoban donanımı; 3: Portör teli; 4: Seyir teli; 5: Pandül;
6: Y halatı; 7: Geri dönüş iletkeni; 8: Fider iletkeni; 9: Fider iletkeni konsolu

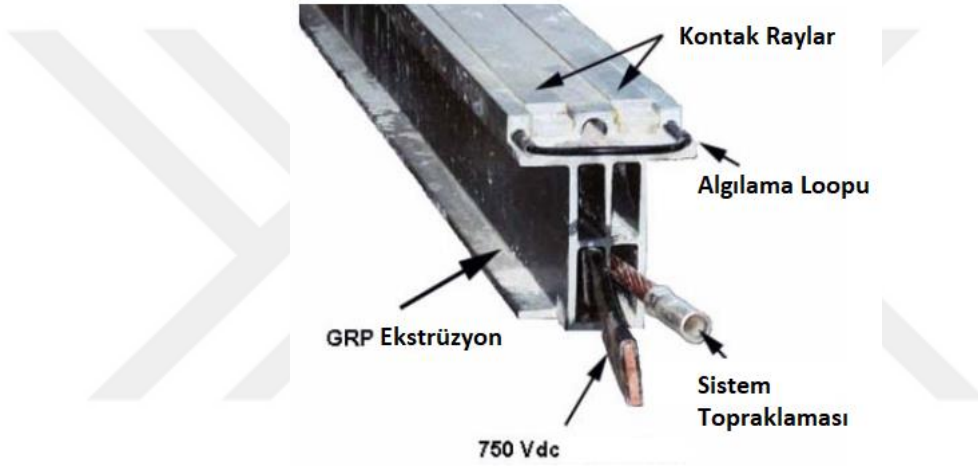
Havai katener sistemi enerji bakımından bölgelere ayrılmaktadır, bu bölgelere seksiyonman bölgeler adı verilmektedir. Bu bölgelerde kullanılan izolatörler her iki yönde kesintisiz akım sağlar. Enerji kesintisi durumunda bir ayırıcı vasıtasıyla bu ayrılmış bölümler birleştirilebilir.

Trenin hızı ve gerilim seviyelerine göre farklı tip katener sistemleri bulunmaktadır. Konvansiyonel katener sistemi bir veya daha fazla asılı iletkenden oluşabilir. Basit askı sadece seyir telinden oluşmaktadır. Bu sistemde işletme hızı düşüktür bu nedenle tramvay hatlarında, park alanlarında, depolarda bölgelerinden tercih edilmektedir. Daha yüksek hızlarda pandül ve taşıyıcı telin olduğu katener tipi tercih edilmektedir.

Hızlı trenlerde ise standart katener tipi yerine Y tipli katenerler kullanılmakta ve direk açıklıkları azalmaktadır.

2.1.4. Innorail/APS sistemi

Sadece araç üzerindeki bölgeyi enerjilendiren bu sistem özellikle görüntü kirliliği istenmeyen şehir içi merkezleri ve tarihi turistik alanlarda kullanılan bir çeşit enerji iletimi sistemidir. İki ray arasında zemine monte edilir ve birçok bölgeye anahtarlarla ayrılmakta ve her bölüm birbiri ile elektriksel olarak yalıtılmaktadır. 11 m uzunluğundaki iletkenin 8 metresi iletken, 3 metresi ise yalıtkandır. Şekil 2.5'te innorail yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Innorail [16].

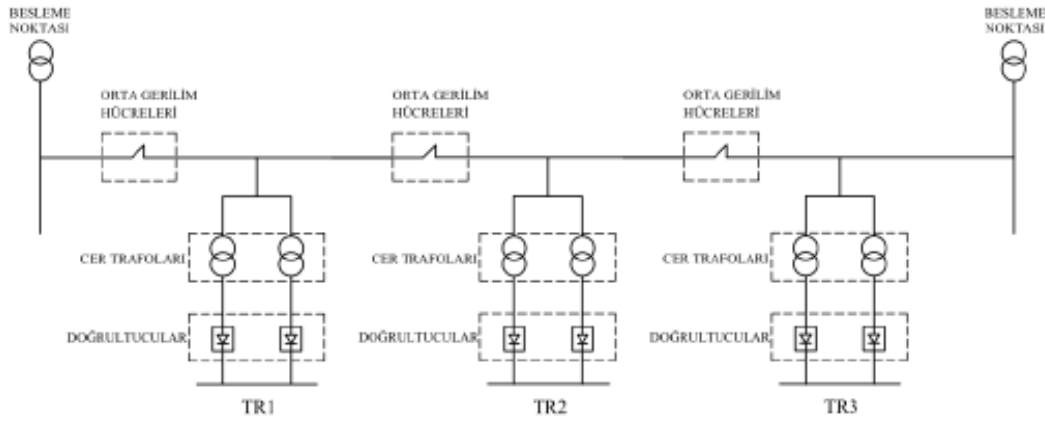
2.2. Orta Gerilim Sistemi

Raylı sistemlerde tren hareketinin beslenmesi cer gücü ile sağlanmaktadır. Metro sistemlerinde orta gerilim sistemi hem güvenli hem de verimli bir şekilde çalışması için tasarlanmıştır. Bu sistemde, elektrik enerjisi trenlerin hareketi için kullanılırken, aynı zamanda istasyonda bulunan aydınlatma, havalandırma, haberleşme sistemleri gibi yükleri de beslemektedir. İstasyonlar ring şebeke sistemi ile birbirine bağlanmakta ve ring şebekesi gidiş-dönüş tek hat veya çift hat olarak tasarlanabilmektedir.

Enerji kaynaklarından birinin arızalanması durumu için her bir enerji kaynağı tüm hattı besleyecek şekilde projelendirilmektedir. İstasyonlarda 34.5/0.4kV iç ihtiyaç trafoları, trenleri beslemek için gerekli olan cer gücü ise 34.5/0.59 cer trafosu ve doğrultucu üniteleri üzerinden sağlanmaktadır.

Orta gerilim sistemi istasyonunun aydınlatma, havalandırma, haberleşme sistemleri gibi iç ihtiyaçlarını beslemektedir. Orta gerilim sistemi ekipmanları yardımcı servis trafoları, orta gerilim hücreleri, ana dağıtım sistemi, acil durum jeneratör sistemi, UPS, redresör ekipmanlarından oluşmaktadır.

Yedekliliğin sağlanması amacıyla bir raylı sistem hattının indirici merkezden gelen en az iki enerji kaynağı bulunmaktadır ve ring şebeke beslemesi bölümlere ayrılmaktadır. Şekil 2.6’da raylı sistemlerde kullanılan örnek bir tek hat şeması verilmektedir.



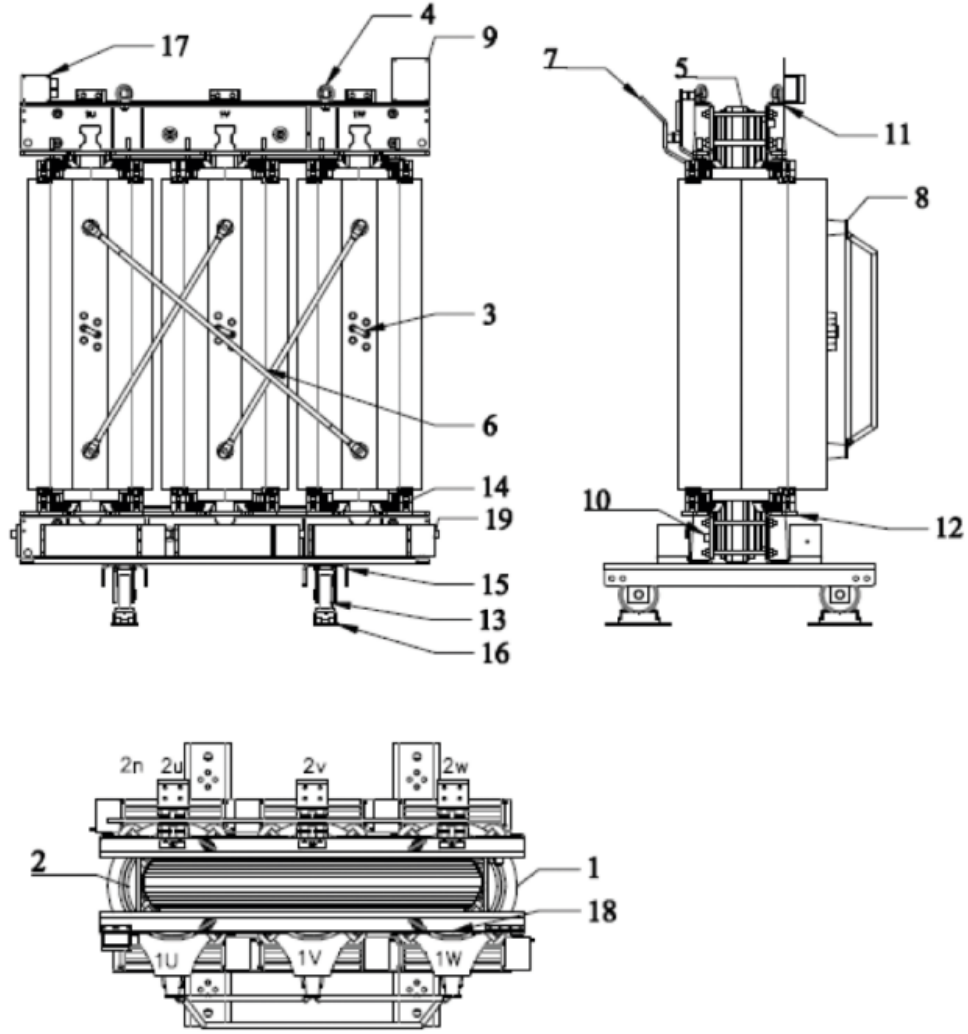
Şekil 2.6: Örnek tek hat şeması [17].

2.2.1. Yardımcı servis trafoları

34,5/0,4 kV iç ihtiyaç trafoları raylı sistemlerde aydınlatma ve priz, sinyalizasyon, haberleşme sistemleri, havalandırma, yürüyen merdiven, asansör, yangın tesisatı, drenaj sistemi, pisu sistemi ve UPS sistemlerini beslemektedir. Bu trafolar dökme reçine ve kuru tip trafo olarak seçilmektedir.

Her bir trafo normal işletme durumunda istasyonun yarı yükünü beslemektedir. Ancak trafolardan birinin arızalı olma durumunda istasyon yükünün tamamını besleyecek şekilde projelendirilmektedir. Bazı projelerde ana dağıtım panosu üzerinde kritik yükler ve kritik olmayan yükler olarak istasyon yükleri gruplandırılmaktadır. Bu durumda trafo arızasında istasyonda bulunan kritik yükleri besleyecek şekilde seçilmektedir.

Kuru tip trafolar bakım gerektirmemesi ve güvenlik sebebiyle metrolarda tercih edilmektedir. Trafo sargıları bakır veya alüminyum olarak seçilebilmektedir. Kuru tip trafo şematik gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir



Şekil 2.7: Kuru tip trafo [18].

- 1- YG Sargısı 2- AG Sargısı, 3- Kademe Değişirme Klemensi, 4-Kaldırma Kulakları 5- Nüve, 6- Üçgem Bağlantı İletkeni, 7- AG Terminali, 8- YG Terminali, 9- İşaret Plakası, 10- Topraklama Terminali, 11- Üst Boyunduruk Demiri, 12- Alt Boyunduruk Demiri, 13- Tekerlek, 14- Sıkıştırma Takozları, 15- Taşıyıcı, 16- Anit Titreşim Padi, 17- Klemens Kutusui 18- PT100, 19- Fan.

2.2.2. Orta gerilim hücreleri

OG ring sisteminde istasyonlarda istasyon yapısına bağlı olarak yedekli orta gerilim hücreleri bulunmaktadır. Orta gerilim hücre grubu içinde ring giriş çıkış, yardımcı servis, cer gücü kesicileri olmak üzere gruplandırılabilir. Kesiciler SF6 gazlı veya vakumlu tiplerde olmakta ve arıza durumlarında devreyi açmaktadır. Tüm kesiciler SCADA sistemi üzerinden izlenmekte ve kumanda edilmektedir. İstasyonlarda Orta gerilim sistemi ring hücreleri, yardımcı güç trafo hücreleri, cer trafosu çıkış hücreleri

olmak üzere 6 adettir. Bedaş enerji girişinin olduğu istasyonda ayrıca l hücreleri de bulunmaktadır.



şekil 2.8: Orta gerilim hücreleri [10].

Ring Hücreleri, istasyonların birbirine ring sistemi ile bağlanmasını sağlayan ilk ve son hücrelerdir. Birbirleri arasında diferansiyel korumaları bulunmaktadır. Enerjinin kesilmesi durumunda istasyonların enerjisiz kalmaması bu hücrelerin yönetilmesi ile mümkündür. Hücreler arasında faz çakışmasının önlenebilmesi için elektriksel kilitlemeler de mevcuttur.

Yardıma güç trafosu çıkış hücresi, istasyonda bulunan alçak gerilim sistemini besleyen trafolarla enerji sağlar. Genellikle metro istasyonlarında iki adet yardımcı güç trafosu çıkış hücresi bulunmaktadır. Bu şekilde istasyonun glerinin beslemesinin yedekli olması sağlanmaktadır.

Cer trafosu çıkış hücresi, tren hareketini sağlayan trafoları beslenmesi bu hücrelerle sağlanmaktadır. Genellikle metro istasyonlarında iki adet cer trafosu çıkış hücresi bulunmaktadır.

l hücresi, orta gerilim sistemi üzerinden tktimin ölçüldüğü hücredir. Bedaş enerji teminin yapıldığı istasyonlarda bulunmaktadır.

2.2.3. Ana dağıtım sistemi

Genel olarak istasyondaki ekipmanlar yedekli bir sistem üzerinden beslenmektedir. İstasyon yapıları iki parçaya ayrılarak çözülmektedir. Her kullanılan ekipman yedekli olarak seçilmektedir. Kritik ekipmanların beslemeleri de ana dağıtım panosunda yedekli besleme olacak şekilde ayrılmaktadır. Ana dağıtım panoları ayrı servis trafolarından beslenmekte ve aralarında kuplaj şalteri bulunmaktadır. Normal işletme durumunda bu şalter açık konumdadır. Trafolardan birinin arızalı olma durumunda arada bulunan kuplaj şalteri kapalı konuma geçerek kritik olan yükler tek bir trafo üzerinden beslenmektedir. Ana dağıtım panosunda bu işlemler kendi üzerinde bulunan PLC benzeri cihazlarla otomatik olarak sağlanmaktadır.

İstasyon talep gücünü etkileyen en önemli ekipman tünel havalandırma fanlarıdır. İstanbul metrolarında 12-14 MW tren yangın yükü hesaba katılmaktadır. Tünel havalandırma sistemleri acil durum haricinde tünelin havalandırması için de kullanılmaktadır. İstasyon aydınlatması, istasyon havalandırma, egzoz fanları, yangın pompaları, yürüyen merdiven, asansörler diğer önemli güç tüketen sistemler olmaktadır. İstasyonda bulunan ekipmanlara ait ortalama güç değerleri Çizelge 2.4'te verilmektedir.

Çizelge 2.4 : İstasyon ekipman güçleri [19].

Sistem Adı	Adet	Talep Gücü
Tünel Havalandırma Fanı	4	250
Temiz Hava Fanı	2	45
Kirli Hava Fanı	2	30
Asansör	2	15
Yürüyen Merdiven	26	30
Drenaj Pompası	2	60
Yangın Pompa Panosu	2	90
Jokey Pompa	1	1,5
Atık Su Pompası	2	15
Güç Ups'i	1	150
Haberleşme UPS'i	1	60
Sinyal UPS'i	1	30
Redresör	1	5
Tünel Aydınlatma Panosu	1	30
Aydınlatma, Priz	1	110

2.2.4. Acil durum jeneratör sistemi

Acil durum jeneratörü enerji kesintisi durumunda hat üzerinde bulunan araçların istasyonlara çekilmesi ve yolcu tahliyesi sırasında aydınlatma, havalandırma, güvenlik ve haberleşme sistemlerinin çalıştırılabilmesi için enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Acil durum jeneratör sistemi enerji kesintilerinde indirgenmiş modda, özellikle yangın gibi acil bir durum varsa, yolcunun güvenli bir şekilde tahliyesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Enerjinin kesilmesi durumunda hatta kalan trenler ikişerli olarak istasyona çekilmektedir. Jeneratör kapasitesinin belirlenirken indirgenmiş işletme dikkate alınır. İndirgenmiş modda tren hızları 20- 30 km hızlardadır. Jeneratör çıkış gerilimi 6.3/34.5 kV çevirme oranına sahiptir. Enerji kesildiğinde ring kesicileri üzerinden orta gerilim sistemini enerjilendirir. Acil bir durumda işletmenin enerjisiz kalması durumunda hatta bulunan trenleri ikişer ikişer çekilmesinin yansıra istasyonun tünel havalandırma fanları, yangın pompaları, acil aydınlatma, haberleşme, sinyal sistemleri gibi kritik sistemlerinin de çalışacağı hesaba katılmaktadır.

Kirazlı Halkalı metrosunun acil durum jeneratör ihtiyacının belirlenmesi için aşağıda bir hesaplama verilmektedir. Yirmi bir aracın olduğu bir işletme senaryosunda yangının Barbaros Malazgirt arasında çıktığı kabul edilmiştir. İki istasyon arasında yangın durumunda tüm yüklerin devrede olduğu, diğer istasyonlarda ise kritik yüklerinde devrede olduğu kabul edilmiştir. Analizdeki güçler ortalama olarak seçilmiştir. Bir istasyonda jeneratör ihtiyacını hesaplamak için gerekli olan güçler Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Jeneratör ihtiyacı analizi [19].

Talepler	Birim	Talep Güç (kW)	Toplam Talep Güç (kW)	Jeneratör İhtiyacı (kVA)
Tren hareketleri	2 araç	1584	3168	3960
Araç iç ihtiyaç güçleri	19 araç	150	2850	3562,5
Barbaros Malazgirt Yangın Yüğü	2 istasyon	1500	3000	3750
Mimarsinan- Halkalı Arası	7 istasyon	900	6300	7875
Toplam				19147,5

Yangın durumu dikkate alındığında jeneratör boyutları 20 MVA civarında seçilmesi gerektiği görülmektedir.

2.2.5. UPS ve 110 V DC redresör

İstasyonda enerji sistemlerinde arıza olması ve hassas sistemlerin enerji dalgalanmalarından etkilenmemesi için kesintisiz güç kaynaklarından (UPS) yararlanılmaktadır. Trafo merkezlerinde kumanda gerilimi olarak 110 V DC sağlanması amacıyla redresör bulunmaktadır.

Acil aydınlatma, haberleşme sistemleri ve sinyal UPS'leri olmak üzere üç adet UPS bulunmaktadır. Genellikle Acil aydınlatma UPS'i 2 saat sistemi kesintisiz beslerken, haberleşme ve sinyal UPS'lerinin 3-4 saat sistemi kesintisiz beslemesi planlanmaktadır.

110 V DC gerilim sistemi orta gerilim sisteminin kumandasında, ana dağıtım panolarında, DC sistemde kullanılmaktadır. UPS sistemleri özellikle haberleşme ekipmanlarını enerji dalgalanmalarından, enerji kesintilerinden kaynaklı oluşabilecek darbe gerilimlerine karşı korumaktadır. UPS gruplarının ayrı odalarda akü grupları yer almaktadır. Akü gruplarında 6 V veya 12 V aküler bulunmaktadır.

2.3. DC Sistemi

2.3.1. Cer trafoları ve doğrultucular

Cer Trafosu orta gerilimi düşük gerilime düşürerek doğrultucu ünitesini beslemektedir. 750 V DC bir sistemde Cer trafoları çıkışında 2 adet 590 V AC, kuru tip, D0d0yn11 vektör grubuna sahiptir. Cer trafoları İstanbul metrosunda genelde 3,3 MVA olarak kullanılmaktadır. Çift sekonderli trafolar, harmonikleri azaltmakta ve birbirini yedekleyebilmektedir. DC sistemlerde 6 darbeli, 12 darbeli ve 24 darbeli doğrultucular kullanılmaktadır. Günümüzde yeni yapılmakta olan metrolarda daha çok 24 darbeli doğrultucular özellikle harmonik akımlarının daha azaltılmış olması sebebiyle tercih edilmektedir.

Doğrultucudan elde edilen gerilimin ortalama değeri V_{do} denklem (5.1)'de belirtilmektedir.

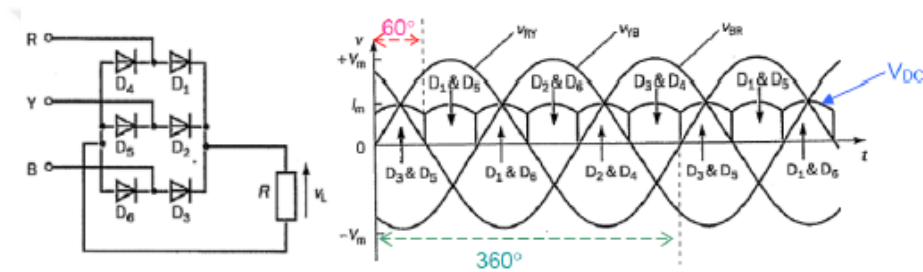
$$V_{do} = \frac{V_m \times P}{\pi \cdot \sin \pi/P} \quad (5.1)$$

Bu denklemdeki P darbe sayısı, V_m ise şebeke gerilimi tepe değeridir. Çizelge 2.6'da görüleceği üzere darbe sayısı arttıkça V_{do}/V_m oranının bire yaklaştığı görülmektedir.

Çizelge 2.6 : Darbe sayılarına göre ortalama gerilim değerinin, gerilimin tepe değerine oranı [16].

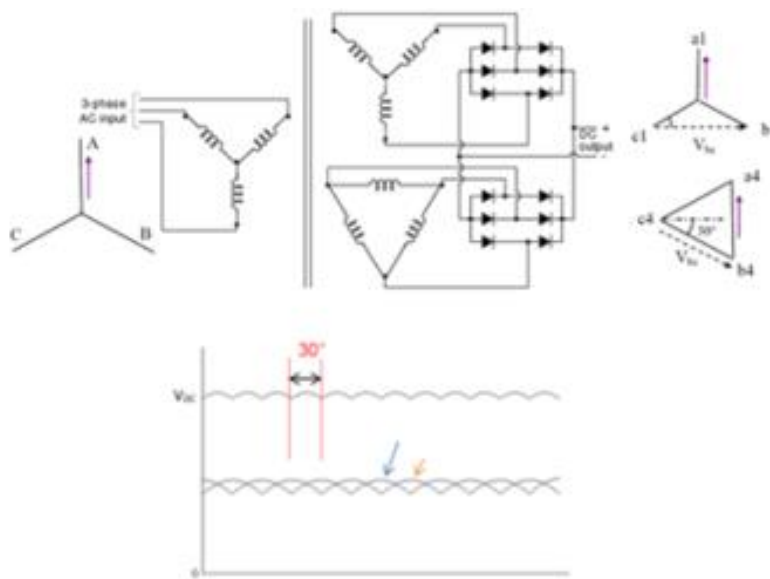
Darbe Sayısı (P)	P=2	P=3	P=6	P=12
Vdo/Wm	0,637	0,827	0,955	0,989

Doğrultucular AC ve DC gerilimize dönüştürmek için kullandıkları anahtar eleman tipine yarı iletken malzeme olan diyotlu veya tristörlü olmaktadır. Diyotlu olanlar kontrolsüz, tristörlü olanlar ise kontrollü olarak sınıflandırılmaktadır. 6 darbeli doğrultucular metrolarda çok sık karşımıza çıkmamaktadır. Genellikle daha az harmonik üreten 12 darbeli doğrultucular kullanılmaktadır. 6 darbeli doğrultucuların fazları arasında Şekil 2.9’da görüldüğü gibi 600 faz farkı oluşmaktadır.



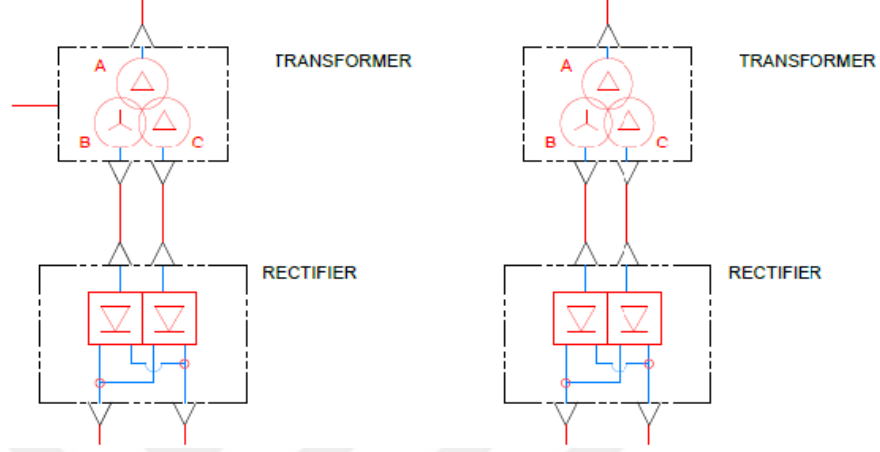
Şekil 2.9: 6-darbeli tam dalga doğrultucu [10].

12 darbeleri doğrultuların cer trafosunun üçgen ve yıldız sekonder çıkışlarına bağlantısı Şekil 2.10'da görülmektedir. 12 darbeleri doğrultucuda fazlar arası 30^0 faz farkı oluşmaktadır.

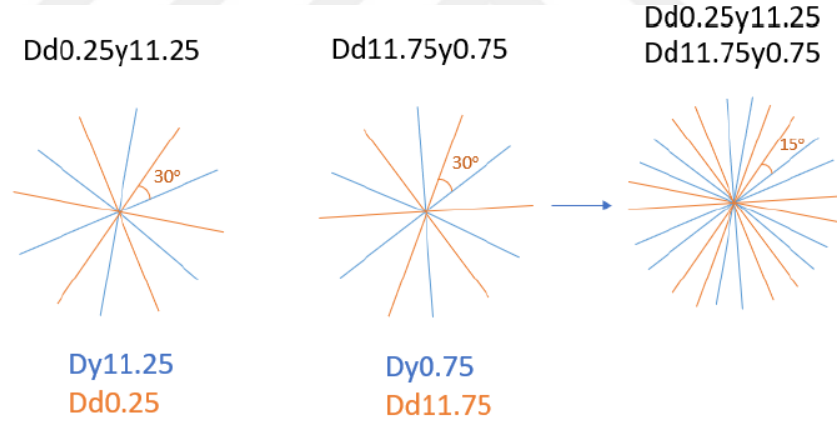


Şekil 2.10: 12-darbeli tam dalga doğrultucu [10].

24 darbeli doğrultucularda 2 adet cer trafosunun cer sargıları $-7,5^0$ ve $+7,5^0$ derece olarak ayarlanmaktadır. Şekil 1.8’de 24 darbeli tam dalga doğrultucuya ait örnek şematik bağlantısı verilmektedir. 24 darbeli doğrultucuda fazlar arası 15^0 faz farkı oluşması gerekmektedir, bu da 12 darbeli doğrultucuların basamaklandırılması ile oluşur (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12).



Şekil 2.11: 24-darbeli tam dalga doğrultucu [20].



Şekil 2.12: D (+ 7.5) d0y11 & D (-7.5) d0y11 transformatörler kuplaj faz diyagramı [20].

2.3.2. DC şalt hücreleri

DC şalt hücreleri giriş panosu, çıkış panosu, dönüş hattı panosu, bara kuplaj panosundan oluşmaktadır. Hücreler, yüksek hızlı DC kesiciler, kontrol, izleme ve koruma ekipmanları gibi donanımları içerir. Yüksek hızlı DC kesiciler, hızlı bir şekilde cer gücünün kesilmesini sağlayarak güvenlik sağlar. Kontrol ve koruma ekipmanları ise cer gücünün izlenmesi, kontrol edilmesi ve aşırı akım, aşırı gerilim gibi durumlarda koruma sağlar.

Bu hücre tipleri, redresör trafosu-redresör ünitesinden cer gücü şebekesine giriş donanımının farklı fonksiyonlarını yerine getirir. Her bir hücre, cer gücünün güvenli ve düzenli bir şekilde dağıtımını sağlar ve enerji akışının yönetimini gerçekleştirir

Giriş panosu, redresörün (+) çıkışından cer gücü trafo merkezindeki cer gücü şebekesinin (+) barasını besler. Bu hücre, cer gücünün ana şebekeye giriş noktasıdır. Giriş panosunda yüksek hızlı DC kesiciler, kontrol, izleme ve koruma ekipmanları bulunur. Bu ekipmanlar, cer gücünün güvenli bir şekilde ana şebekeye bağlanmasını sağlar.

Çıkış panosu, cer gücünün dağıtımını sağlamak için kullanılır. Her bir cer trafosunda iki adet çıkış panosu bulunur ve bunlar 3. ray bölgelerini besler. Çıkış panosu da yüksek hızlı DC kesiciler, kontrol ve koruma donanımlarını içerir. Bu panolar, cer gücünün dağıtım hattına yönlendirilmesini sağlar.

Dönüş hattı panosu, cer gücünün dönüş akımı kablolarının bağlandığı (-) barayı içerir. Bu panoda dönüş akımı kablolarının terminasyonu yapılır. Dönüş hattı panosu genellikle diğer panoların yakınında bulunur ve cer gücünün dönüş yolunu sağlar.

Bara kuplaj panosu, farklı hücreler arasındaki baraların birleştirildiği bir panodur. Bu panoda baraların kuplajı ve bağlantıları gerçekleştirilir. Böylece, cer gücü trafo merkezi içindeki farklı panolar arasında enerji akışı sağlanır.

2.4. Sinyalizasyon Sistemi

Metrolarda yolcu kapasitesinin artırılması ve güvenli bir tren işletilmesinin yapılabilmesi amacıyla sinyalizasyon sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Demiryolunun ilk gelişmeye başladığı yıllarda trenlerin hızı çok düşük olduğu için kontrol daha kolay olmaktaydı. Yaşanılan kazaların önlenmesine yönelik güzergâh üzerinde işaretçiler konulmaya başlanmıştır. Bu işaretçiler, trenleri belirli aralıklarla durdurmak ve yolcuların güvenliği için kullanılmıştır. Trenlerin hızları, araç ve vagon sayılarının artması, makinistlerin görüş mesafesi içinde trenlerin durdurulamaması gibi nedenlerle işaretçilerin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

1840'lı yılların sonralarına doğru zaman tabloları ile işletmeler yapılmaya başlanmıştır. Bu zaman tabloları trafik akışını düzenli hale getirerek trenlerin çarpışması riskini daha aza indirmiştir. Zaman çizelgesi işletmeciliğinde trenlerin

gerçek konumları dair bilgiler sınırlı olmaktadır. Şekil 2.13'te örnek bir zaman çizelgesi verilmiştir.

41001 Erzurum Ekspresi Azami Hız 110 km/s							
İSTASYONLAR	Azami Hız	Asgari Müddet	Tabii Müddet	Varış	Kalkış	Buluşma	Öne Geçme
Sivas				(6.28)	6.43	$\frac{43049}{44822} \times$	
Km.602+000	55						
Yapı	75	6	6		6.49		
Km.595+300	75						
Km.590+500	90						
Km.586+500	70						
Km.579+100	80						
Kalın	70	13	13		7.02		
Karalıköy	60	13	14		7.16		

Şekil 2.13: Örnek zaman çizelgesi [21].

19. yüzyılın ilerleyen dönemlerinde zaman çizelgesine göre daha güvenli ve etkili demiryolu trafiğini düzenlemek, çarpışma riskini azaltmak ve rotalar arasında güvenli iletişimi sağlamak için jetonlu sinyal sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistem, makinistlerin belirli bir güzergâh üzerinde seyahat etmesi için fiziksel olarak bir jeton taşınmasını gerektiriyordu. Jeton, bir rota veya bölgeye özgü olan fiziksel bir nesneydi ve sadece bir trenin o bölgeye girmesi için veriliyordu. Bu sayede, aynı hatta birden fazla trenin aynı anda bulunmasının önüne geçilmiş oluyordu.

Jetonlu sinyal sistemleri, zaman çizelgesine dayalı yöntemlere göre daha güvenli kabul edildi çünkü fiziksel bir nesne olan jeton, gerçek zamanlı ve somut bir kontrol sağlamıştı. Ancak arka arkaya gelen trenlerin aynı yönde çalışması gerektiğinde jeton sistemi de tek başına yetersiz kalmıştır. Bunun yerine personel ve bilet sistemi kullanılmaya başlanmıştır.

Hatta giren ilk makiniste tek hatlı bölüme giriş yetkisi verilirdi. Bu yetki, "bilet" adı verilen yazılı bir belge ile sağlanırdı. Bu bilet, trenin belirli bir hatta girebilmesi için verilen resmi izni ifade ediyordu. İkinci tren belirli bir bekleme süresinin sonunda ikinci tren hatta alınıyordu.

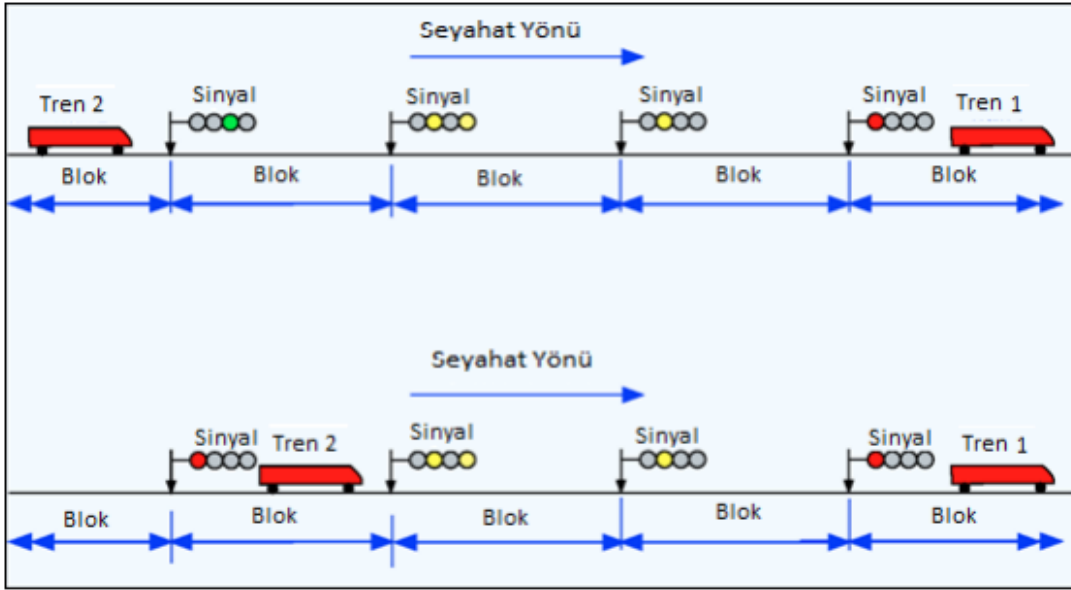
İletişim teknolojilerindeki gelişmeler sonra elektrikli sinyalizasyon sistemlerine 20. yüzyılın başlarına doğru geçilmiştir. Trenlerin konumu, hızları gerçek zamanlı olarak izlenmeye başlanmıştır. 20 yüzyılın sonlarına doğru haberleşme tabanlı tren kontrolü (CBTC) gibi daha karmaşık sosyalizasyon sistemleri geliştirilmiştir.

Metrolarda kullanılan sinyalizasyon blok sistemini iki grupta toplayabiliriz.

2.4.1. Sabit (fixed) blok sinyalizasyon sistemi

Sabit bloklu sinyalizasyon sistemlerinde trenin izleyeceği yol bloklara bölünmektedir. Her blokta bulunan ray devreleri tren hareketine göre meşgul olup işgal edip etmediği tespit edilmekte ve her bir blok sinyaller ile korunmaktadır.

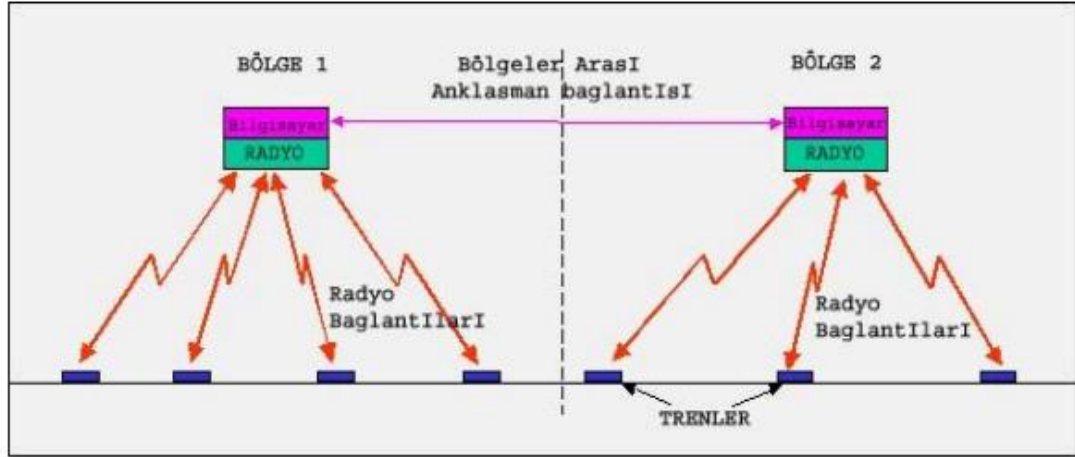
Sabit bloklu sinyalizasyon sistemine çalışma mantığı Şekil 2.14'te verilmektedir. Trenin meşgul olduğu bloktaki sinyal kırmızı, onun arkasındaki blok sarı yanmaktadır. Sarı yanan sinyalin arkaasında bulunan ray devresi meşgul değilse yeşil yanar.



Şekil 2.14: Sabit bloklu sinyalizasyon sistemi [22].

2.4.2. Hareketli blok sinyalizasyon sistemi

Hareketli blok sisteminde ray devresine gereksinim bulunmamaktadır. Trenler radyo iletişim sistemi aracılığı ile kontrol merkezi üzerinden birbiriyle haberleşmektedir. Her tren konumunu, hızını ve yön bilgisini kontrol merkezine bildirir. Kontrol merkezinde bulunan bilgisayarda bu bilgiler değerlendirilerek gerekli sürüş mesafesi ve hız hesaplanarak trene bu bilgiler gönderilir. Radyo bağlantısı üzerinden trenlerin haberleşmesi ile ilgili çalışma mantığı Şekil 2.15'te verilmiştir.



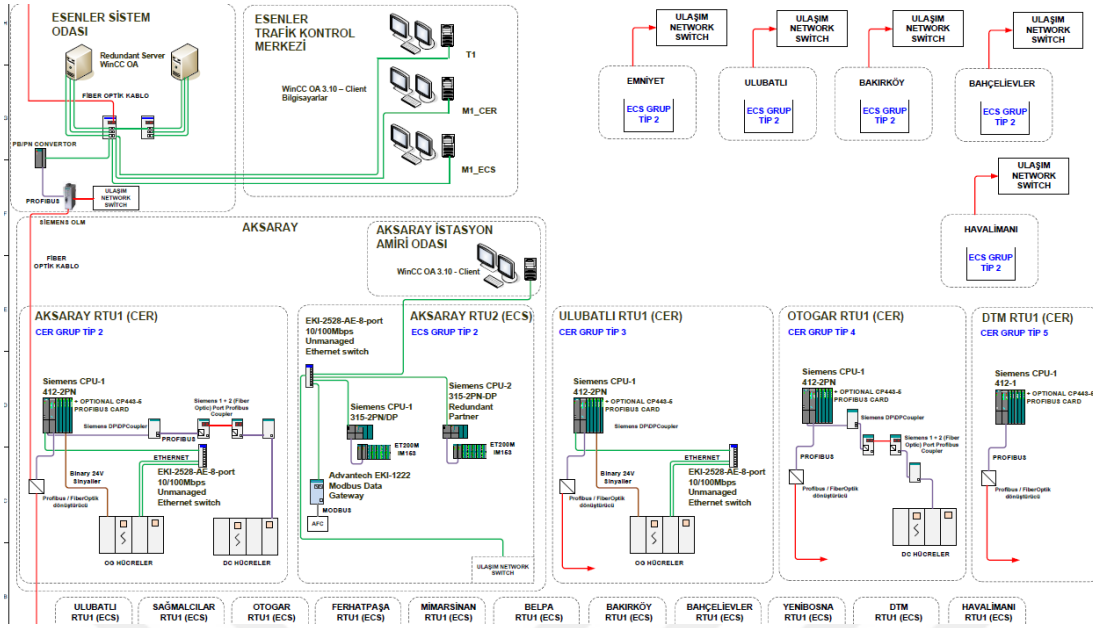
Şekil 2.15: Radyo bağlantısı üzerinden trenlerin merkez ile haberleşmesi [22].

2.5. SCADA Sistemi ve Kumanda Merkezi

SCADA terimi Supervisory Control and Data Acquisition (Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi) kelimelerinin ilk harfleri ile oluşturulan bir kısaltmadır. 1970 başlarında SCADA teriminin kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Esenler kumanda merkezinde yeni entegre hattın ilave iş istasyonları için yeterli alanı bulunmamaktadır. Bu nedenle kumanda odasının inşai olarak yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Mevcut hatların büyütülmesinde kumanda merkezlerinde birçok sistemin arayüzünün de çözülmesi gerekmektedir.

Orta gerilim sistemi, cer gücü sistemi, acil durum jeneratör sistemi, alçak gerilim sistemi, UPS, Redresörler gibi güç sistemi ekipmanları SCADA sistemi üzerinden izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Sistemde bulunan tüm arızalar SCADA ekranına düşerek teknik personelin zamanında ve doğru bir şekilde sisteme müdahale edilmesi sağlanmaktadır. Normal işletme ve acil durum işletmelerine göre belirlenen senaryolara uygun olarak SCADA sistemi güç sistemini yönetmektedir.

SCADA sistemi mimarisi, RTU panoları, Lokal sunucular ve iş istasyonlarından oluşmaktadır. Esenler kumanda merkezine ait örnek SCADA sistem mimarisi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



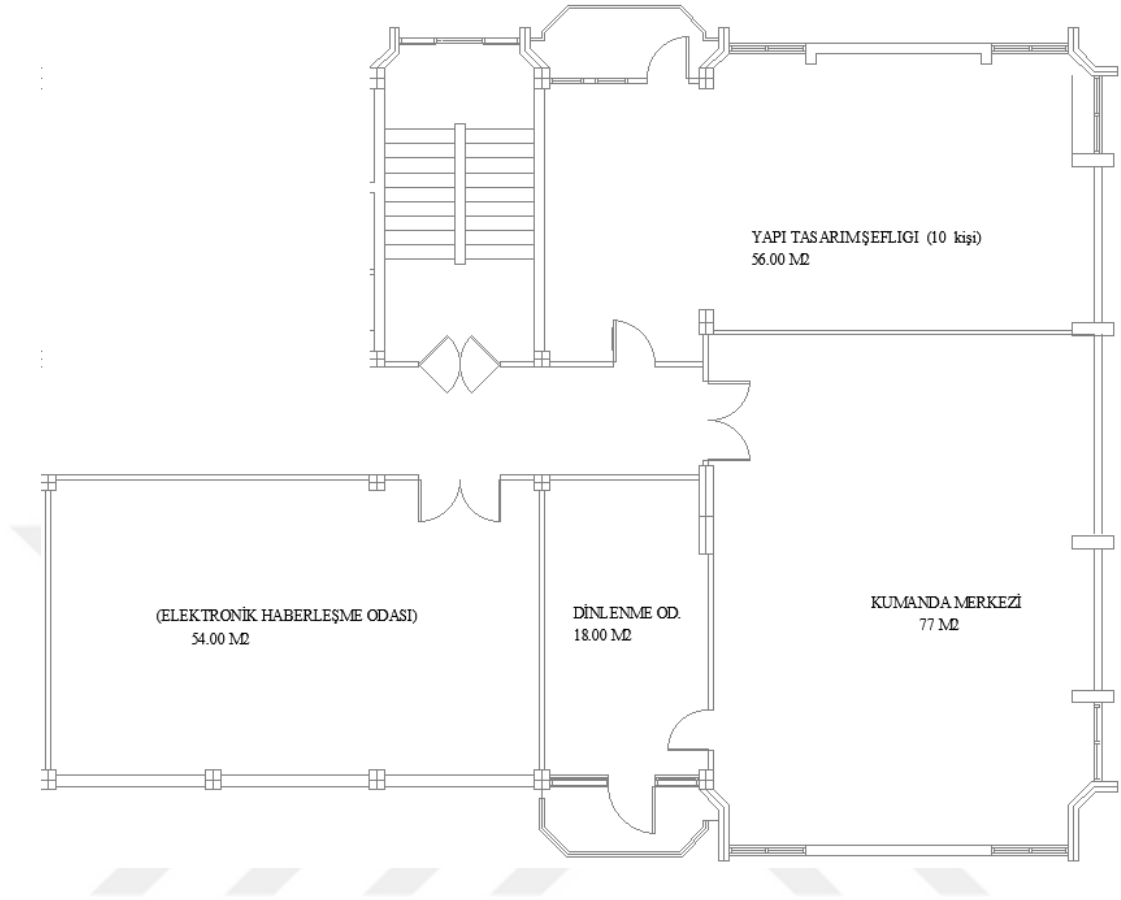
Şekil 2.16: Sistem mimarisi [23].

Mevcut SCADA sistemi incelendiğinde SCADA lisanslarının yeni hatta ait orta gerilim ve cer gücü ekipmanlarının eklenmesini desteklemediği ve ilave lisans gerektirdiği tespit edilmiştir. Mevcut kumanda merkezinde büyük ekranlar yerine 55” ekranların bulunduğu entegrasyonla birlikte 70” büyük ekranlara geçilmesi Kirazlı Halkalı projesi kapsamında planlanmıştır. Aynı zamanda bu hat için yeni bir kumanda merkezinin yapılması da görülmektedir.

Kumanda merkezinin genişletilmesi çalışmalarında geçici olarak işletilmekte olan kumanda merkezinin taşınması gerekmektedir. İşletme altında çalışma oldukça zor bir çalışmadır. Mevcut iş istasyonların çalışmaya devam etmesi ve mevcut sistemler ile yeni sistemlerin entegre edilmesi planlanmaktadır.

Kumanda merkezinin yeniden düzenlenmesine yönelik yapı tasarım şefliği odası ile kumanda merkezi odası birleştirilerek daha geniş bir kumanda merkezi yapılması çalışması yapılmıştır. Yeni kumanda merkezinde 22 adet 70” videowall, 40 adet 23” monitör (çift sıra) konumlandırılmıştır. Alanın dar olması sebebiyle ekranlar çift sıra olarak planlanmıştır.

Mevcut kumanda merkezine ait yerleşim mimarisi Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17: Mevcut kumanda merkezi.

Mevcut kumanda merkezi yapı tasarım şefliği odası ile genişletilerek ihtiyaç çözülebilir. Ancak Enregre hat merkezi ekipmanlara ait ilave kabinet, UPS ihtiyaçları için mevcut elektronik haberleşme odası yeterli olmamaktadır. Entegre hat için ortalama 20 m2, sinyalizasyon ve haberleşme ekipmanları için planlanan UPS aküleri için de yaklaşık 40 m2 ilave alana ihtiyaç bulunmaktadır. Mevcut bina içinde bu alanlar için alternatif çözümler gerekmektedir.

Entegre hat ihtiyaçları ile kumanda merkezinin genişletilmesine ait örnek yerleşim mimarisi Şekil 2.18’de verilmiştir. Mevcut kumanda merkezine ilave olarak toplantı odası ve arşiv odası oluşturulmuştur.



Şekil 2.18: Entegre hat ile birlikte önerilen kumanda merkezi yerleşimi.

3. RAYLI ULAŞIMDA KULLANILAN ARAÇ TİPLERİ

Raylı ulaşım sistemleri, demiryolları üzerinde çalışan ve yolcuları veya yükleri taşıyan araçlardır. Bu sistemler, şehir içi ulaşımı kolaylaştırmak, yoğunluğu azaltmak ve hızlı, güvenli bir taşıma sağlamak amacıyla kullanılır.

Enerji türlerine göre buharlı, dizel ve elektrikli olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Buharlı lokomotiflerde enerji kaynağı olarak taş kömürü, linyit kömürü ve akaryakıtın yanmasıyla sudan buhar enerjisi sağlanmaktadır. Su ihtiyacının karşılanabilmesi için güzergâh boyunca su ikmal tesisleri yapılmaktadır.

Dizel Lokomotif: Yakıt olarak motorin kullanılmaktadır. Buharlı lokomotiflere kıyasla çalışma parkurları buharlı lokomotiflere göre daha uzundur. 10 yolcu vagonluk bir treni 600-700 km mesafeye taşıyabilmektedir

Elektrikli Lokomotif: Yakıt ikmali bulunmamaktadır. Buharlı ve dizel lokomotiflere göre daha yüksek güçler uygulanabildiği için trafik yoğunluğunun fazla olduğu hatlarda daha ekonomik lokomotiflerdir.

Kullanım şekillerine göre üç gruba ayrılmaktadır [1].

- Ünite şeklinde üretilen raylı sistemler, (EMU, DEMU, Raybüs)
- Hafif raylı sistemler, ağır raylı sistemler
- Hızlı tren sistemleri

Raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan bazı araç tipleri şunlardır:

3.1. Trenler

Trenler, raylı ulaşımın en yaygın ve bilinen araçlarıdır. Yolcu taşıma trenleri, şehir içi ve şehirler arası yolculuklar için kullanılır. Yolcu trenleri, farklı hızlarda çalışabilen ve farklı seviyelerde konfor sunan farklı tiplerde olabilir. Hızlı trenler, yüksek hızlara ulaşabilen ve uzak mesafelerde hızlı taşıma imkânı sağlayan trenlerdir.

Bir tren genellikle birden fazla vagon veya araçtan oluşmaktadır. Tren setleri, yolcu veya yük taşımacılığına göre farklılık gösterebilmektedir. Yolcu tren setleri, oturma

düzenine ve hizmetlere bağlı olarak farklı sınıflara veya seviyelere sahip olabilmektedir. Yük trenleri ise genellikle konteynerler veya platformlar üzerinde yük taşımaktadır.

Trenler, yolcu veya yükleri taşıdıkları istasyonlarda durur. İstasyonlar, trenlerin yolcuları veya yükleri alıp bırakabileceği noktalardır. İstasyonlar genellikle şehir merkezlerinde veya önemli noktalarda bulunmaktadır.

Trenler, yolcu ve yük güvenliğini önemseyen önlemlere sahiptir. Trenlerde acil durum sistemleri, yangın söndürme ekipmanları ve güvenlik kameraları gibi önlemler bulunur. Ayrıca, trenlerdeki hız ve işletme kuralları, güvenli seyahat sağlamak için sıkı bir şekilde uygulanır.

Hızlı trenler, yüksek hızlara ulaşabilen trenlerdir. Bu trenler, özel olarak tasarlanmış hatlarda ve altyapıda çalışır. Hızlı trenler, kıtalararası veya uzun mesafeli seyahatlerde zaman tasarrufu sağlayan hızlı ve konforlu bir seçenek olarak tercih edilir.

3.2. Hafif Metro

Hafif Metro sistemleri yolcu potansiyelinin fazla olduğu güzergâhlarda tramvaydan daha fazla yolcu kapasitesine sahiptir. Metrolar ile entegre olarak çalışabilmektedir. Enerjisini üçüncü raydan ya da katenerden enerji alan, sinyalizasyon sistemli 600–1000 metre aralıklarla özel istasyonlarda yolcu indiren bu sistem ile yaklaşık 10.000-20.000 yolcu taşınabilmektedir [24].

3.3. Metrolar

Metrolar, şehir içi ulaşımında yaygın olarak kullanılan raylı ulaşım araçlarıdır. Genellikle yer altında veya yüksek hızlı hatlarda çalışırlar. Metrolar, elektrikli olarak çalışan ve genellikle raylar üzerinde oturan vagonlardan oluşur. Yolcuları hızlı bir şekilde taşıyabilen metrolar, şehir merkezlerindeki yoğunluğu azaltmaya yardımcı olur.

Metrolar, yüksek kapasiteli yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Bir metronun taşıma kapasitesi, tren setlerinin boyutuna, vagon sayısına ve hizmet verdiği hatta bağlı olarak değişmekle birlikte tek yönde saatte 60.000-70.000 olabilmektedir [25]. Genellikle yoğun şehir bölgelerinde büyük yolcu akışını yönetmek için kullanılırlar

Metrolar, belirli noktalarda yer alan istasyonlarda durarak yolcuları alır ve bırakır. İstasyonlar, genellikle şehir merkezlerinde, yoğun nüfuslu bölgelerde veya önemli noktalarda bulunur. İstasyonlar arasındaki mesafe, hatta ve şehre bağlı olarak değişebilir.

3.4. Füniküler

Bir kablonu iki ucuna bağlı bir aracın motorların kabloya güç sağlayarak çekildiği özellikle arazi koşullarının zor olduğu dik eğimlerde ve yamaçlarda kullanılan bir sistemdir. Hong Kong, Pittsburgh, Salzburg gibi birçok şehirde kullanılmaktadır [26]. İstanbul'da Taksim-Kabataş hattı füniküler sistem bulunmaktadır.

3.5. Tramvaylar

Tramvaylar, şehir içi ulaşım için kullanılan raylı araçlardır. Genellikle yol ortasında veya ayrılmış raylarda seyahat etmektedirler. Tramvaylar, elektrikli olarak çalışan ve genellikle kısa mesafelerde yolcu taşımacılığı yapabilen araçlardır. Şehir içi alanlarda kullanıldıklarından, trafik sıkışıklığından ve yol paylaşımından etkilenirler. Saatte 30-50 km/saat hızla ilerleyen tramvayların istasyonları arasındaki mesafe 300-500 m arasında değişmektedir [27].

Tramvaylar, şehir içi ulaşımın önemli bir parçası olarak dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şehirlerin ulaşım sistemlerini çeşitlendirmek ve toplu taşımayı desteklemek için etkili bir çözüm sunarlar.

3.6. Monoray

Monoray, tek bir ray üzerinde seyahat eden bir raylı ulaşım aracıdır. Bu sistemde araçlar, bir tek ray üzerinde dengelenir ve hareket eder. Monoraylar, bazen eğlence parkları veya turistik alanlarda kullanılırken, bazı şehirlerde de toplu taşıma amacıyla kullanılmaktadır.,

Monoray sistemleri, farklı teknik yapılarla uygulanabilir. Bazı monoray sistemleri, rayın üzerindeki tekerleklerle hareket ederken, bazıları manyetik levitasyon veya hava yastığı gibi teknolojileri kullanır. Bu farklı teknikler, aracın yükseklik kontrolünü sağlar ve sürtünmeyi minimize ederek daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek hızlar elde edilmesini sağlar.

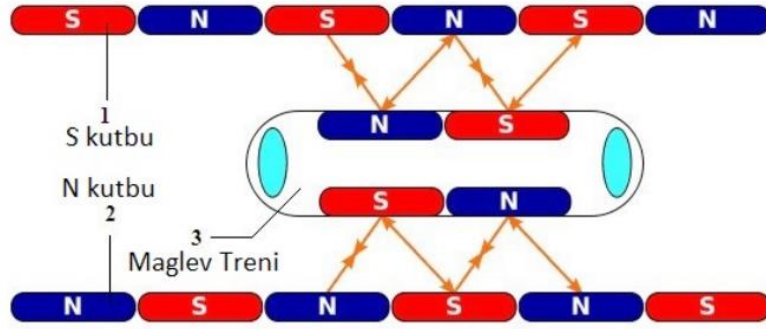
Monoraylar, geleneksel tren hatlarına göre daha az yer kaplar. Rayın tek bir hatta olması, arazi kullanımında tasarruf sağlar. Tek bir ray üzerinde seyahat etmek, sürtünmeyi azaltır ve daha düşük enerji tüketimiyle daha hızlı seyahat sağlar. Aynı zamanda monoraylar, daha az gürültü ve titreşimle çalışır. Monoraylar, yolculara genellikle panoramik bir manzara sunar. Yolcular, tek bir ray üzerinde seyahat etmenin keyfini çıkarırken çevredeki güzellikleri gözlemleyebilir. Moskova’da bulunan monoray örneği Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Moskova monoray [17].

3.7. Maglev (manyetik levitasyon) Trenleri

Maglev trenleri, manyetik kuvvetlerin etkileşimiyle yükselir ve hareket eder. Bu trenlerin altında bulunan raylar, elektromanyetik bobinlerle donatılmıştır. Raylar üzerindeki manyetik alan, trenin altındaki manyetik levitasyon sistemiyle etkileşime girer ve treni 1-10 mm yükselterek yerden kaldırır [27]. Bu sayede tren, sürtünmeyle bağlantılı olmadan hızlı ve düzgün bir şekilde hareket eder. Akımın yönü değiştirildiğinde tren yavaşlamakta, akım kesildiğinde ise tren durmaktadır. Raylarda bulunan elektromıknatıs çalışması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Raylarda bulunan elektromıknatıslar [28].

Maglev trenleri, geleneksel tren sistemlerinden çok daha yüksek hızlara ulaşabilmektedir. Hızları, ulaşım sistemine ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişiklik gösterir.

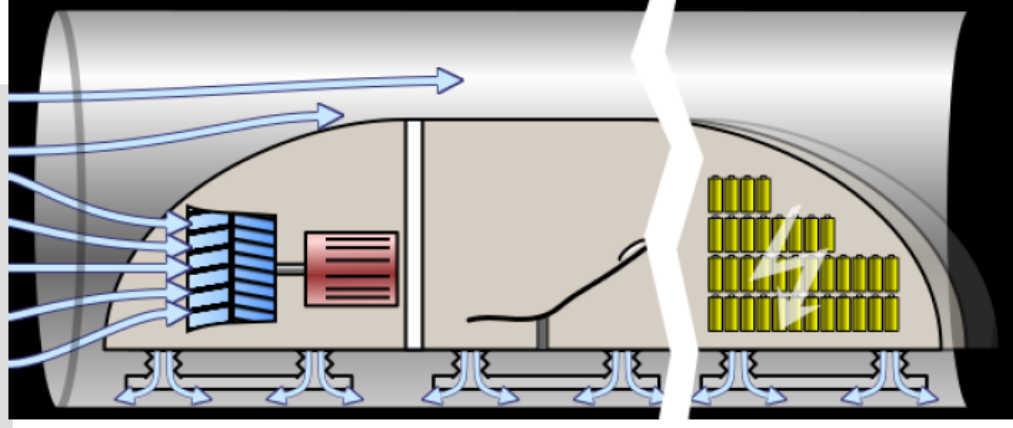
Maglev trenlerinin levitasyon prensibi sayesinde raylarla doğrudan temas etmemeleri, sürtünme kaybını büyük ölçüde azaltır. Bu da trenlerin daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek hızlara ulaşabilme kabiliyeti sağlar. Düşük sürtünme aynı zamanda daha sessiz ve pürüzsüz bir seyahat deneyimi sunar. Maglev trenleri çoğunlukla uzun mesafeli ulaşım için tercih edilir. Şehirler arası ve hatta ülkeler arası yolculuklarda kullanılmaktadır. Örneğin, Japonya'da Yamanashi Maglev Hattı, saatte 603 km hıza ulaşarak dünyanın en hızlı maglev tren hattıdır.

3.8. Hiperloop

İlk olarak Elon Musk tarafından 2013 yılında ortaya atılan bu fikir, geleneksel taşıma sistemlerine kıyasla daha hızlı ve verimli bir ulaşım sağlamayı hedefler. Hiperloop, büyük ölçüde vakum içinde yer alan tüplerde çalışır. Vakum, hava sürtünmesini azaltır ve böylece yüksek hızlara ulaşılmasına imkân tanır. Tüpler, düz veya dairesel hatlar boyunca yerleştirilir ve içerisinde yolcu veya kargo kapsülleri hareket eder. Hiperloop sistemlerinde kullanılan kapsüller, yolcuları veya yükleri taşıyan kabinlerdir. Bu kapsüller, manyetik levitasyon veya hava yastığı gibi teknolojileri kullanarak sürtünmeyi minimize eder ve sürtünmesiz bir ortamda ilerler. Kapsüller, aerodinamik olarak tasarlanır ve yüksek hızlarda seyahat edebilecek şekilde optimize edilir.

Hiperloop, çok büyük hızlara ulaşabilmektedir. Elon Musk'ın önerdiği hedef hızı, saatte 1.200 km'ye (750 mil) kadar çıkmaktadır. Hiperloop, enerji verimliliği açısından da avantajlı olduğu görülmektedir. Vakum içinde hareket etmesi, sürtünmeyi azaltarak enerji tüketimini düşürür. Hiperloop konsepti hala geliştirme aşamasındadır. Şekil

1.8’de bir hiperloop kapsülü ana şeması görülmektedir. Önde hava baskılayıcısı, ortada yolcu bölümü, arkada şarj ünitesi ve altta taşıyıcı hava kızakları bulunmaktadır [1]. Hiperloop kapsülünün ana şeması Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3: Hiperloop kapsülünün ana şeması [1].

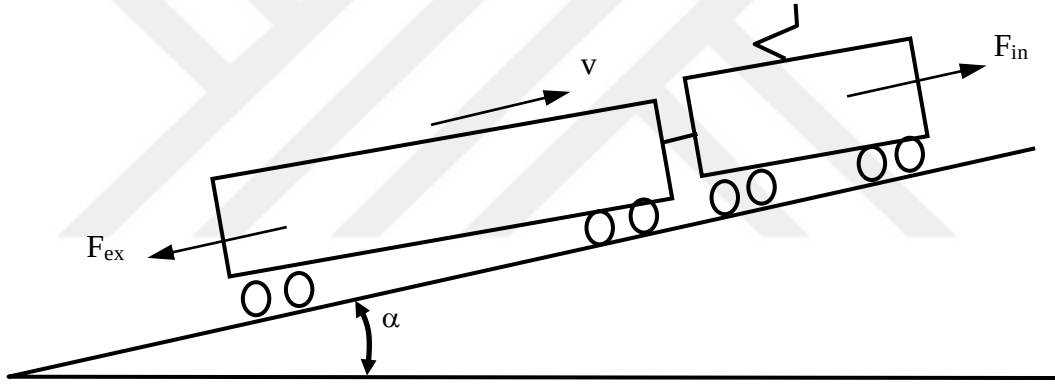
4. RAYLI SİSTEM FORMULASYONLARI

4.1. Davis Formülasyonu

Bu bölümde tren hareketini hesaplamaya yönelik formüller verilmiştir. Tren hareketi hattın geometrik yapısı ve tren çekiş sistemi karakteristiklerine bağlıdır. Trene etki eden kuvvetler Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Trenin hareketi en basit şekilde Newton’un hareket denklemi ile tanımlanabilmektedir.

$$\sum_{i=0}^n F = M \cdot a \quad (4.1)$$

Bu denklemde F trene etki kuvvet, m trenin kütlesidir, a ise ivmedir.



Şekil 4.1: Hat üzerinde tren hareketi [29].

F_{in} : Tren çekiş kuvveti

F_{ex} : Trene ters yönde etki eden direnim kuvveti

v : Tren hızı

α : Eğim

$$F = F_{in} - F_{ex} = m \cdot a \quad (4.2)$$

Trene ters yönde etki eden direnimimler formüle edilirse

$$F_{ex} = F_r + F_{gr} + F_c \quad (4.3)$$

Bu denklemde F_r trenin direnimi, F_{gr} eğimlerden kaynaklı direnim ve F_c kurbalardan kaynaklı direnimdir. F_r trenin direnimi

$$F_r = A + Bv + C \cdot v^2 \quad (4.4)$$

olarak yazılır. Burada A katsayısı yüke bağlı bir değişkendir, B katsayısı hat ve tren kararlılığına bağlı bir değişken, C katsayısı ise aerodinamik direnç değişkenidir.

$A + B \cdot v$ genellikle hareket direnimi, $C \cdot v^2$ ise aerodinamik direnim olarak ifade edilmektedir. Araç imalatçıları F_r formülünü farklı şekilde verebilmektedir. Örnek bir formül ve katsayılar aşağıda verilmiştir.

$$F_r = 6,4 M + 130 n + 0,14 M V_t + \beta_{\text{ktünel}} [0,046 + 0,0065(N - 1)] A V_t^2 18] \quad (4.5)$$

Bu denklemde

V_t : Tren hızı (km/s)

M: Trenin kütlesi

n: Aks sayısı

N: Araç sayısı

A: Trenin ön alanı

$\beta_{\text{ktünel}}$: Katsayı (tren açık hatta ise 1, tünelde ise genel olarak 1,5 alınmaktadır).

F_{gr} eğimlerden kaynaklı direnim

$$F_{gr} = M g \sin(\alpha) \quad (4.6)$$

denklemi ile; F_c kurbalardan kaynaklı direnim

$$F_c = k_e / (r \cdot 10^{-3}) Mg \quad (4.7)$$

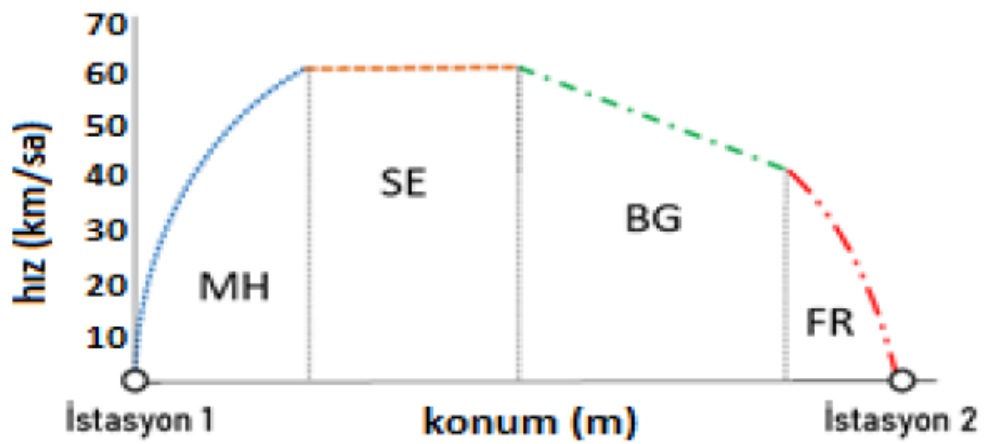
denklemi ile verilir. (7) denklemindeki k_e katsayısı için Çizelge 4.1'deki değerler kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1 : Ray genişliğine bağlı k_e katsayısı [29].

Ray Genişliği (mm)	k_e (m)
1435	750
1000	530
750	400
600	325

4.2. Tren Hareketi

Tren hareketi, Hızlanma (MH), Seyir (SE), Boşta Gitme (BG) ve Frenleme (FR) aşamalarından oluşmaktadır. Tren hareketlerinin bu dört aşaması, trenin hareket etme sürecini ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Her aşama, trenin hızını, gücünü ve durumunu belirleyen önemli faktörleri içerir. Ancak, trenin gerçek hareketi, farklı kombinasyonlar içerebilir, özellikle raylardaki değişiklikler, sinyalizasyon sistemleri veya trafik koşulları gibi faktörlere bağlı olarak. Tren adımları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Tren adımları [30].

4.2.1. Hızlanma

Hızlanma aşaması, trenin durumdan hareket etmeye başladığı andan itibaren geçerlidir. Bir tren hareket etmek için itici bir kuvvet gerektirir. Bu kuvvet, elektrikli trenlerde elektrik motorları, dizel trenlerde motorlar veya itici vagonlarda bulunan motorlar tarafından sağlanabilir. Bu motorlar, tekerleklerin raylar üzerinde hareket etmesini sağlayan bir tahrik kuvveti üretir. Hızlanma süreci, motorlardan gelen gücün tekerlekler aracılığıyla trenin kütlesi üzerine aktarılmasıyla gerçekleşir. Motorlardan gelen güç, tekerlek sürtünmesini aşarak trenin hızını artırır. Hızlanma süreci, trenin hızının yavaş yavaş artmasıyla karakterizedir.

4.2.2. Seyir

Seyir aşaması, trenin belirli bir hızda ve istikrarlı bir şekilde ilerlediği aşamadır. Tren, hedef hızına ulaştıktan sonra seyir moduna geçer. Motorlar veya itici vagonlar, trenin hızını korumak için gereken gücü sağlamaya devam eder. Bu aşamada, trenin hızı sabit

kalır ve tren yolcularını ve yükünü düzgün bir şekilde taşıyacak şekilde stabilize edici sistemler devreye girer. Trenin seyir aşamasında enerji tüketimi, trenin hedef hızını korumak ve çevreye minimum etkiyle seyahat etmek için optimize edilir.

4.2.3. Boşta gitme

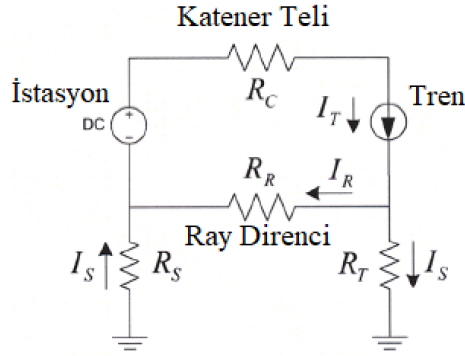
Boşta gitme aşaması, trenin hızını koruduğu, ancak belirli bir hızlanma veya yavaşlama olmadığı aşamadır. Tren, düz bir hat üzerinde seyahat ederken veya duraklama öncesi son hızda ilerlerken boşta gitme moduna geçer. Bu aşamada, trenin motorları veya itici vagonları güç üretmeye devam eder, ancak trenin hızı sabit kalır. Boşta gitme sırasında, tren sürücüsü veya otomatik bir kontrol sistemi, gerektiğinde hız değişikliklerini yapar. Bu aşama, trenin hızını korumak ve gerektiğinde hızlı bir şekilde tepki verebilmek için önemlidir.

4.2.4. Frenleme

Frenleme aşaması, trenin hızını azaltmak veya durdurmak için kullanılan aşamadır. Frenleme aşamasında trene hareket yönünün tersine sabit bir kuvvet uygulanır, trenin kinetik enerjisi azalır ve hızı düşer. Frenleme, trenin tamamen durmasını sağlayabileceği gibi, trenin istenen duraklamaya veya durma noktasına ulaşmasını sağlamak için de kullanılabilir. Frenleme aşaması, fren sisteminin etkili bir şekilde çalışması ve trenin güvenli bir şekilde durmasını sağlaması için önemlidir. Ayrıca, frenleme sürecinde, frenlerin aşırı ısınmasını önlemek ve frenleme kuvvetini dengelemek için uygun bir dengeleme yapılması önemlidir.

5. DC RAYLI SİSTEMLERDE KAÇAK AKIM KONTROLÜ

DC beslemeli hatlarda raylar cer akımının geri dönüş iletkeni olarak kullanılmaktadır. Rayların tam yalıtımının yapılamamasından kaynaklı olarak dönüş akımı toprağa sızmaktadır. Geri dönüş iletkeni olarak kullanılan raylarda oluşan gerilimin ve oluşan kaçak akımların EN 50122 standardına göre kontrol altında tutulması gerekmektedir. EN 50122 dokunma gerilimleri Çizelge 1.5'te verilmiştir. Kaçak akım ile temas eden boru hatları, betonarme yapılar, zırhlı kablolar, gömülü metalik yapılarda yapısal bozulmalara ve korozyona sebep olarak yapıların ömürlerini ksalmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda ray geriliminin yükselmesi insan hayatını da tehlikeye atmaktadır [31]. Kaçak akımların etkisinin en aza indirilmesi için rayın direncinin artırılması, trafo merkezinin gerilim seviyesinin yükseltilmesi, trafo merkezleri arasındaki mesafenin kısaltılması, dönüş iletkeni olarak dördüncü iletkenin kullanılması gibi çözümler bulunmaktadır [32]. Katodik koruma da korozyonun yarattığı olumsuz etkileri azaltmak için kullanılan yöntemlerden biridir [33]. Kaçak akım ve dokunma geriliminin basitleştirilmiş modeli Şekil 5.1'da gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Kaçak akım ve dokunma gerilimi basitleştirilmiş modeli [34].

$$I_S = \frac{R_R I_T}{R_t + R_R + R_S} \quad (1)$$

I_T = Tren akımı, I_R Raydan geçen akım, R_R = Ray Direnci, R_S Topraklama Direnci, V_{Touch} Dokunma gerilimidir.

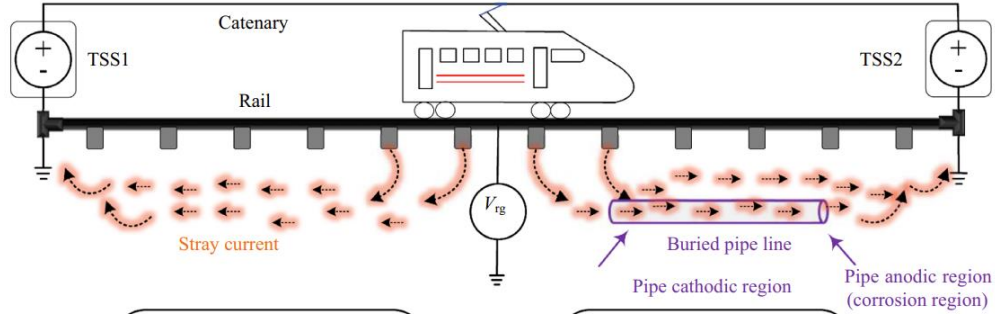
Kaçak akımı etkileyen tasarım konuları on kategoride incelenebilir [33].

- 1- Ray dönüş devresinin iletkenliği
- 2- Ray dönüş devresinin izolasyonu
- 3- Hat ve katener arasındaki işletme gerilimi
- 4- Havai hattın izolasyonu
- 5- Havai hattın iletkenliği
- 6- Trafo merkezleri arasındaki mesafe
- 7- Trenin akım talebi
- 8- Rejenaratif frenleme
- 9- Trafo merkezlerinin ve sistemin güvenlik topraklaması
- 10- Sinyal gereksinimleri

Topraklama sisteminin seçimin ray kaçak akımlarında çok etkili olduğu bilinmektedir. Trafo merkezlerinde uygulanan topraklama sistemlerini; tam topraklanmış, diyot üzerinden topraklanmış, yüzen sistemler v olarak kategorize edebiliriz.

Tam topraklanmış sistemde DC negatif dönüş empedans kullanılmadan topraklanır ve topraklama direnci mümkün olduğu kadar düşük tutulmaktadır. Kaçak akımlar serbest olduğundan dolayı korozyon sorununu artırmaktadır. Ancak ray gerilimi azaltılmakla elektrik çarpmalarını ve trafo merkezi ekipmanlarının zarar görmesini engeller. Tam topraklanmış sistemin şematik gösterimi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

$$V_{\text{Touch}} = R_R \times I_R \quad (2)$$

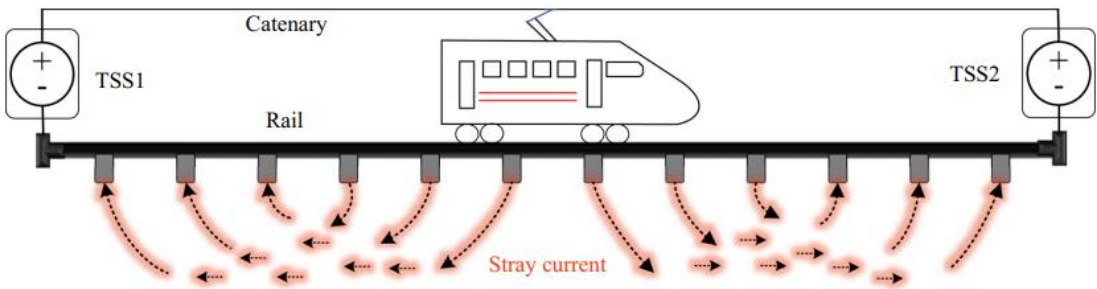


Şekil 5.2: Tam topraklanmış sistem [34].

Yüzen topraklama sisteminde ise toprakla bir bağlantı bulunmamaktadır. Bu sistemde raylar, raylara bağlantı noktaları, trafo merkezlerinin negatif baraları tamamen topraktan izole edilmektedir. Rayların altına yerleştirilen izole edilmiş bir iletken demeti bulunmaktadır. Bu demet, rayların altında bir yalıtım malzemesiyle desteklenir ve genellikle beton veya plastik panellerle korunmaktadır. İletken demetinin altına yerleştirilen yalıtım malzemesi, rayları yalıtarak elektriksel olarak izole etmektedir. Bu sayede, raylar enerji iletirken elektriksel teması minimuma indirir ve güvenli bir iletim sağlamaktadır.

Yüzen topraklama sistemi, birkaç avantaja sahiptir. İlk olarak, enerji iletimi sırasında raylar arasındaki gerilimi azaltır ve güvenliğini artırır. Ayrıca, yüzen topraklama sistemi, raylarda oluşabilecek kısa devreleri de önlemektedir.

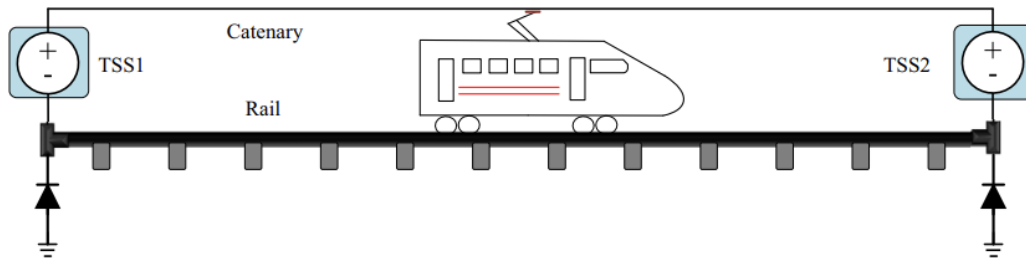
Yüzen topraklama sistemi, elektrikli tren hatlarında yaygın olarak kullanılan bir güvenlik önlemidir. Raylı sistemlerde yolcu ve personel güvenliğini sağlamak için tasarlanmıştır ve elektrikli trenlerin sorunsuz ve güvenli bir şekilde çalışmasına yardımcı olur. Gerilimi kontrol altında tutmak için koruma cihazları (VLD) kullanılmaktadır. Bu cihaz bir çeşit normalde açık potansiyel aştığında kapanan bir kontaktördür. Yüzen topraklama sistemine ait şematik gösterim Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Yüzen topraklama sistemi [34].

Diyot üzerinden topraklanmış sistem, topraklanmış sistem ile yüzen sistem arasında bir çözüm olarak sunulmaktadır. Ray gerilimi normal değerlerde olduğundan diyot kapalı konumdadır ve ray topraktan izoledir bu durumda yüzen sistem haline gelmektedir. Eğer ray gerilimi kritik seviyeye gelirse diyot trafo merkezinin negatif geri dönüşüne dönerek, kaçak akımın toprağa akmasını sağlamaktadır. Ray gerilimini ve sızıntı akımlarını artırıcı etkilerinden dolayı fazla bir uygulama alanı bulamamıştır [20].

Trafo merkezi geri dönüş barası bir Şekil 5.4'te görüldüğü gibi bir diyot üzerinden topraklanmaktadır.



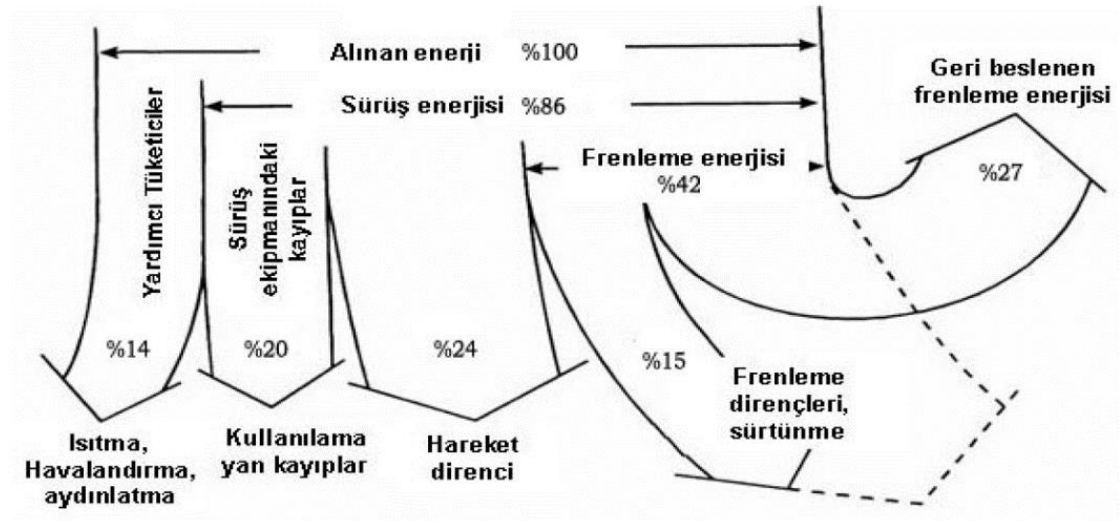
Şekil 5.4: Diyot üzerinden topraklama sistemi [34].

6. REJENERATİF FRENLEME VE DEPOLAMA ŞEKİLLERİ

Rejeneratif frenleme, genellikle elektrikli motorların çalışma prensibine dayanmaktadır. Frenleme sırasında motor jeneratör olarak çalışmaktadır. Trenin kinetik enerjisi elektrik enerjisine çevrilmektedir. Bu kinetik enerji bataryalarda veya enerji depolama sistemlerinde depolanmaktadır.

Raylı sistemlerdeki rejeneratif frenleme, çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Araçların frenleme sırasında geri kazanılan enerji, elektrik şebekesinde kullanılabilir veya diğer araçlara beslenebilir. Bu da enerji verimliliğini artırmakta ve enerji tüketimini azaltmaktadır [35].

Ten sefer sıklığının 3 dakikanın altında olduğu işletmelerde rejeneratif frenleme enerjisinden diğer araçlar %85- %95 oranında kullanılmakta olduğu görülmektedir [36]. Araçlarda konfor enerji tüketimi ortalama olarak %14 mertebesinde olmaktadır. Aracın cer motorları ve sürüş dişlilerden kaynaklanan sürüş ekipmanındaki kayıplar % 20 ve sürüş direncini yenmek için harcanan hareket enerjisi ortalama %24 alınmaktadır. Araç frenleme sırasında %42 oranında elektrik enerjisini oluşmaktadır. Oluşan bu frenleme enerjisinin, %27'si katener sistemine geri verilmekte ve %15'i ise rezistörlerde harcanmaktadır. Şekil 6-1'de trenin enerji dağılımı ve diğer tüketimleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.1: Frenleme enerjisi ve diğer tüketimleri [14].

Frenleme sırasında üretilen elektrik enerjisi, Frenleme kuvveti sürtünme frenleme kuvveti ve motor frenleme kuvveti toplamına eşit olmaktadır [37].

$$B_t = B_e + B_f \quad (7.1)$$

Motor fren kuvvetinin frenleme giriş hızı ve verim ile çarpılması sonucunda frenleme kuvvetinin ürettiği elektrik gücü elde edilmektedir.

$$P_r = \frac{1}{3,6} B_e x V x \eta B \quad (7.2)$$

B_t : Toplam frenleme kuvveti (kN)

B_e : Elektrik(rejeneratif) fren kuvveti (kN)

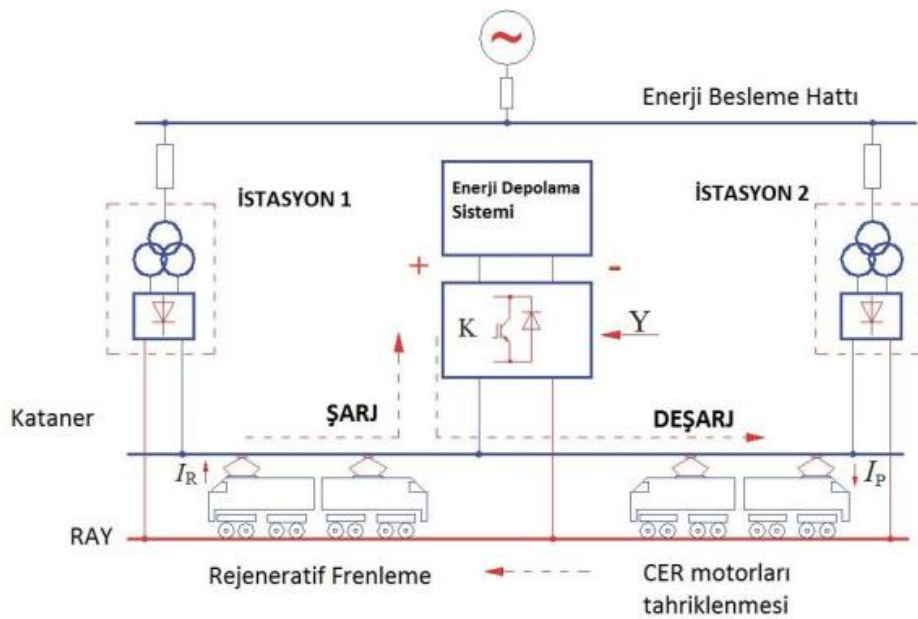
B_f : Sürtünme fren kuvveti (kN)

ηB : Rejeneratif sistemin verimi

P_r : Rejeneratif frenlemenin elektrik gücü (kW)

V : Hız

Rejeneratif frenlemeden daha fazla yararlanmaya yönelik enerji depolama sistemleri ilk defa Londra Metrosu Far Rockaway hattında kullanılmaya başlanmıştır. Süper kapasitörler ise Almanya Cologne şehrinde ilk kez uygulanmıştır [38]. Enerji depolama sistemi araç üstüne, yol kenarlarına, istasyonlara konulabilmektedir. Şekil 6.2’de rejeneratif frenlemede enerji depolama sisteminin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 6.2: Rejeneratif frenlemede enerji depolama şematik gösterimi [39].

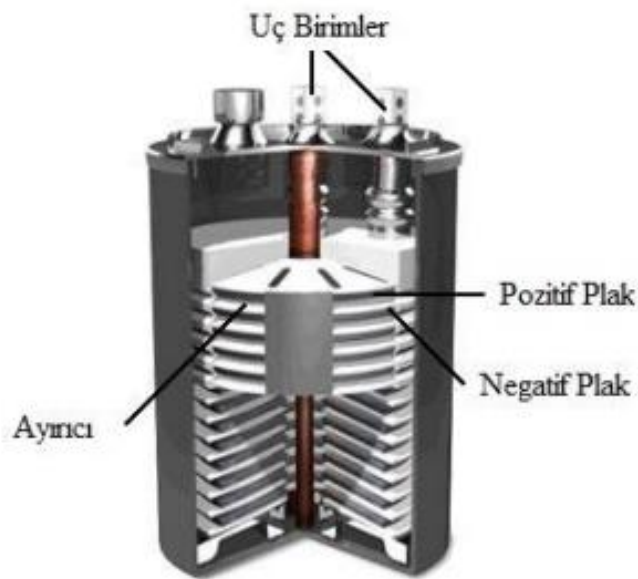
Araç üstüne yerleştirilen depolama sistemi trenin hızlanması durumunda katener hattından çekilen enerji motorlar tarafından kullanılmaktadır. Frenleme durumunda açığa çıkan enerji trenlerin üst kısmında bulunan kapasitörlerde tarafından depolanarak yaklaşık % 40 oranında bir enerji geri kazanımı sağlanmaktadır [40]. Aynı zamanda araç üstü depolama sistemleri katenersiz bölgede çalışma olanağı sağlar ve gerilim düşümü de minimize etmektedir.

Rejeneratif frenleme enerjisinin depolanmasında bataryalar, süper iletken manyetik enerji depolayıcılar (SMES), süper kapasitörler ve volanlar en sık olarak karşımıza çıkmaktadır.

6.1. Bataryalar

Elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve elektrik enerjisinin ihtiyaç duyulduğu zaman tekrar geri verilmesini sağlayan cihazlardır. Elektrokimyasal bir mekanizma ile çalışırlar ve bu sayede enerjiyi depolayabilmektedir. Şarj olma süreleri çok uzundur. Kurşun asit batarya, nikel metal hibrit batarya, lityum batarya, sodyum batara, vanadyum redoks ve nikel kadmiyum batarya çeşitleri bulunmaktadır [39].

Kurşun asit bataryalar, en eski ve yaygın kullanılan batarya türlerindendir. Elektrolitik sülfürik asit ve plaka malzemesi olarak kurşun kullanılmaktadır. Diğer bataryalara göre daha ucuzdur. Çok ağır ve fazla yer kaplaması, ısınma problemleri, ömürlerinin az olması dezavantajlarıdır. Kurşun ait bataryanın iç yapısı Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Kurşun asit batarya iç yapısı [41].

Nikel metal hidrit bataryalar, kurşun asit bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Nikel oksit hidroksit ve metal hidritleri kullanarak çalışmaktadır. Enerji yoğunluğu kurşun asit bataryalara ve nikel kadmiyum bataryalara göre daha fazladır. Tamamıyla deşarj edilebilmektedir.

Lityum İyon Bataryalar, yüksek oranda reaktif özelliklere sahiptir. Deşarj özellikleri çok gelişmiştir. Güvenlik sebebiyle şarj kontrol devresine ihtiyaç duymaktadırlar [42]. Lityum iyon bataryanın iç yapısı Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Lityum iyon bataryanın iç yapısı [41].

Sodyum sülfür bataryalar, sodyum iyonları ile çalışan bir batarya türüdür. Lityum bataryalara benzer özelliklere sahiptirler, ancak lityum yerine sodyum kullanılmaktadır.

Vanadyum redoks bataryalar (VRB), enerji depolama için kullanılan akış bataryaları arasında yer almaktadır. Vanadyum redoks bataryalarda, enerji elektrolit içinde çözünmüş halde depolanmaktadır. Bu bataryalar yüksek verimliliğe sahiptir ve yüksek sayıda şarj-deşarj döngüsüne dayanıklıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji sistemlerinde ve büyük ölçekli enerji depolama projelerinde kullanılmaktadırlar.

Nikel kadmiyum bataryalar, eski teknolojiye sahip olsalar da bazı uygulamalarda hala kullanılmaktadır. Nikel oksit hidroksit ve kadmiyum oksit arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile çalışmaktadır. Ancak, çevre dostu olmayan kadmiyum içerikleri nedeniyle çevre için potansiyel bir tehlike oluşturabilmektedir. Bu nedenle, çoğu modern uygulama lityum bataryalar ve diğer çevre dostu batarya türleri ile değiştirilmiştir.

6.2. Süperkapasitörler

Süperkapasitörler, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürlü enerji depolama cihazlarıdır. Geleneksel kapasitörlerden (veya kondansatörlerden) farklı olarak, süper kapasitörler, elektrokimyasal süreçleri ve yüzey yüklenme mekanizmalarını bir araya getiren iki temel kapasite mekanizması kullanır. İki elektrot, bir ayırıcı ve bir elektrolit içerirler. İki elektrot, bir ayırıcı ve bir elektrolitten oluşan süper kapasitörler çift katmanlı kapasitör ve elektrokimyasal kapasitör olarak ikiye ayrılmaktadır. Elektrokimyasal kapasitörler 2 Volt 'un altında çalışmaktadır.

Çift katmanlı kapasitörler, elektrik yüklerini yüzeylerinde biriktiren elektrotlar arasındaki elektrik alanından kaynaklanan kapasiteye dayanmaktadır. Elektrik yükleri elektriksel çift katman adı verilen bu arayüzde tutulur ve depolama kapasitesini artırmaktadır. Çift katmanlı kapasitörler, yüksek güç yoğunluğuna sahiptir, yani hızlı bir şekilde şarj edip boşaltılabilmektedir. Elektrokimyasal kapasitörler, elektrolit ve elektrotlar arasında çözelti bazlı elektrokimyasal redoks reaksiyonlarından kaynaklanan kapasiteye dayanmaktadır. Bu tip kapasitörlerin enerji yoğunluğu çift katmanlı kapasitörlere kıyasla daha yüksektir. Süperkapasitör iç yapısı Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

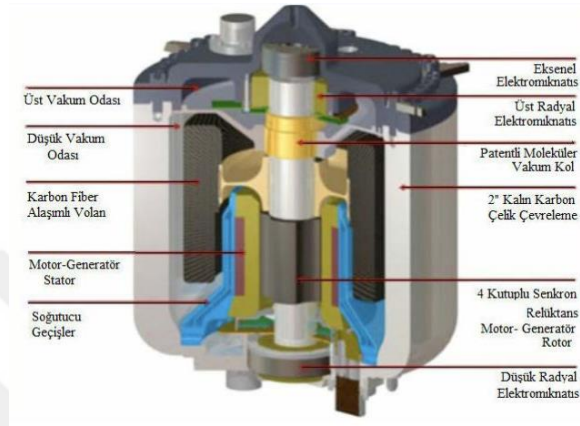


Şekil 6.5: Süperkapasitör iç yapısı [39].

6.3. Volanlar (Fly Wheel)

Volanlar, enerji depolama ve dönme hareketi sağlama amacıyla kullanılan mekanik cihazlardır. Süperkapasitörlere göre daha uzun çevrim ve kullanım ömrüne sahiptirler. Ancak yatırım maliyetleri çok yüksektir. Araç üstü volanların enerji depolamasının dışında enerji verimliliği, pik sırasında güç ihtiyacını karşılaması, enerji kayıpların düşürülmesi ve gerilim dengelenmesi gibi çok avantajı da

bulunmaktadır. Volanın temel bileşenleri dönen bir cisim, manyetik yataklama elemanları ve enerji depolanmasını sağlayan iletim elemanlarından oluşmaktadır. Volanlar kinetik enerji formunda enerjiyi depolamaktadır. Enerji depolama kapasitesi, volanın hızına ve kütlesine bağlıdır. Daha yüksek hızlar ve daha büyük kütleler, daha fazla enerji depolama kapasitesi sağlamaktadır. Volan iç yapısı Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6: Volan iç yapısı [42].

6.4. Süper İletken Manyetik Depolama Sistemleri (SMES)

Süper İletken manyetik depolama sistemleri süperiletken malzemeler kullanmaktadır. Süperiletkenler, çok düşük sıcaklıklarda çalıştıklarında elektrik direncini tamamen sıfırlarlar. Birçok madde çok düşük sıcaklıklarda süper iletkene dönüşebilmektedir. Bunlar arasında en yaygın olanlar Alüminyum, Cıva, Kalay, Kurşun yer almaktadır. Bu özellikleri, enerjiyi uzun süre depolayabilen ve kayıpları minimize eden bir enerji depolama sistemini mümkün sağlamaktadır.

Elektrik enerjisini manyetik alanlar aracılığıyla depolar. Enerji depolama için süperiletken bir halka veya bobin kullanılır. Elektrik enerjisi bu halka veya bobin içinde manyetik alan enerjisine dönüştürülerek depolanır. Depolanan enerji uzun süre boyunca muhafaza edilebilir ve geri çekildiğinde minimum enerji kaybıyla geri dönüştürülür. Süperiletken malzemelerin dayanıklılığı ve düşük enerji kaybı nedeniyle, SMES sistemleri uzun ömürlüdür ve bakım gereksinimleri düşüktür. Ancak, SMES sistemlerinin dezavantajları da vardır. Bu sistemler, yüksek soğutma gereksinimleri nedeniyle enerji yoğun olabilir ve bu nedenle yatırım ve işletme maliyetleri yüksek olabilir. Ayrıca, süperiletken malzemelerin düşük çalışma sıcaklıkları, uygulama alanlarını sınırlayabilir.

7. SİMÜLASYON VERİLERİ

Tren modellemesi, demiryolu ulaşım sisteminin analizi, tasarımı ve optimizasyonu için yapılan çalışmaları kapsar. Bu çalışmalar, trenlerin hareketi, enerji tüketimi, sinyalizasyon sistemleri, ray altyapısı ve trafik yönetimi gibi alanlarda gerçekleştirilir. Tren modellemesi, güvenlik, verimlilik, kapasite artışı ve çevresel sürdürülebilirlik gibi hedeflerle ilgilenir.

Tren modellemesi alanında öncü çalışmalardan biri, 19. yüzyılın sonlarında yapılan mühendislik hesaplamaları ve deneylerdir. Bu dönemde, trenlerin hızı, güç gereksinimleri ve frenleme performansı gibi konular üzerine deneysel çalışmalar yürütülmüştür. İlk olarak, 1978 yılında Mellitt, hızlı trenlerin performans özelliklerini incelemek amacıyla bilgisayar tabanlı bir benzetim geliştirmiştir. Bu çalışma, hızlı trenlerin hızlanma, frenleme, enerji tüketimi ve diğer dinamik davranışlarını modellemeyi amaçlamıştır. Mellitt'in benzetimi, gerçek trenlerin fiziksel davranışlarını taklit eden matematiksel denklemler ve hesaplamalar kullanmaktadır. Bu benzetim, trenlerin performansını optimize etmek ve enerji verimliliğini artırmak için kullanılan stratejileri analiz etmeye yardımcı olmuştur.

1993 yılında ise Cheng ve Howlett tarafından gerçekleştirilen çalışma da hızlı trenlerin performansını ve enerji verimliliğini artırmak hedeflenmiştir. Cheng ve Howlett, bilgisayar tabanlı bir simülasyon kullanarak trenlerin hızlanma, frenleme ve enerji tüketimi gibi faktörleri deneysel formül ve sayısal bütünleşme ile analiz etmişlerdir. Bu analizler, trenlerin enerji tüketimini azaltmak için optimize edilmiş kontrol stratejilerinin etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, trenlerin enerji verimliliğini artırarak çevresel etkileri azaltmaya yönelik katkı sağlamıştır.

1996 yılında Howlett ve arkadaşları sürekli kontrol tabanlı bir model 2016 yılında ise güzergâh ve araç parametrelerinin yanı sıra hattın belirli bölgelerindeki hız kısıtlamalarının da eklendiği sürekli kontrole sahip tren hareketini modellemişlerdir. Her iki çalışma da hızlı trenlerin performans özelliklerini anlamak ve optimize etmek

için bilgisayar tabanlı benzetim ve simülasyonları kullanmayı amaçlamaktadır. Bu tür çalışmalar, tren endüstrisinde verimliliği artırmak, güvenliği iyileştirmek ve çevresel etkileri azaltmak için önemli bir araç olabilir.

20. yüzyılın başlarından itibaren, tren modellemesi alanında bilgisayar tabanlı simülasyonlar kullanılmaya başlandı. Bilgisayar simülasyonları, trenlerin dinamik davranışlarını, raylardaki etkileşimlerini ve enerji tüketimini analiz etmek için kullanılan matematiksel modellerin uygulanmasıyla gerçekleştirildi.

Sonraki yıllarda, tren modellemesi alanında daha karmaşık ve kapsamlı modeller geliştirildi. Bu modeller, trenlerin hız profilleri, frenleme sistemleri, yolcu taşımacılığı modelleri ve trafik yönetimi stratejileri gibi daha fazla detayı içeriyordu. Ayrıca, ray altyapısı tasarımı, bakım planlaması ve güvenlik analizleri gibi alanlarda da tren modellemesi kullanıldı.

Günümüzde, tren modellemesi alanı sürekli olarak gelişmektedir. İleri simülasyon teknikleri, büyük veri analizi ve yapay zekâ gibi yeni teknolojiler, tren sistemlerinin daha iyi anlaşılması ve optimize edilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca, çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve yolcu konforu gibi konular tren modellemesinin odak noktaları arasında yer almaktadır.

Tren modellemesi alanındaki çalışmalar, demiryolu sektöründeki işletmecilere, mühendislere ve araştırmacılara değerli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmalar, tren sistemlerinin daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesine katkıda bulunmaktadır.

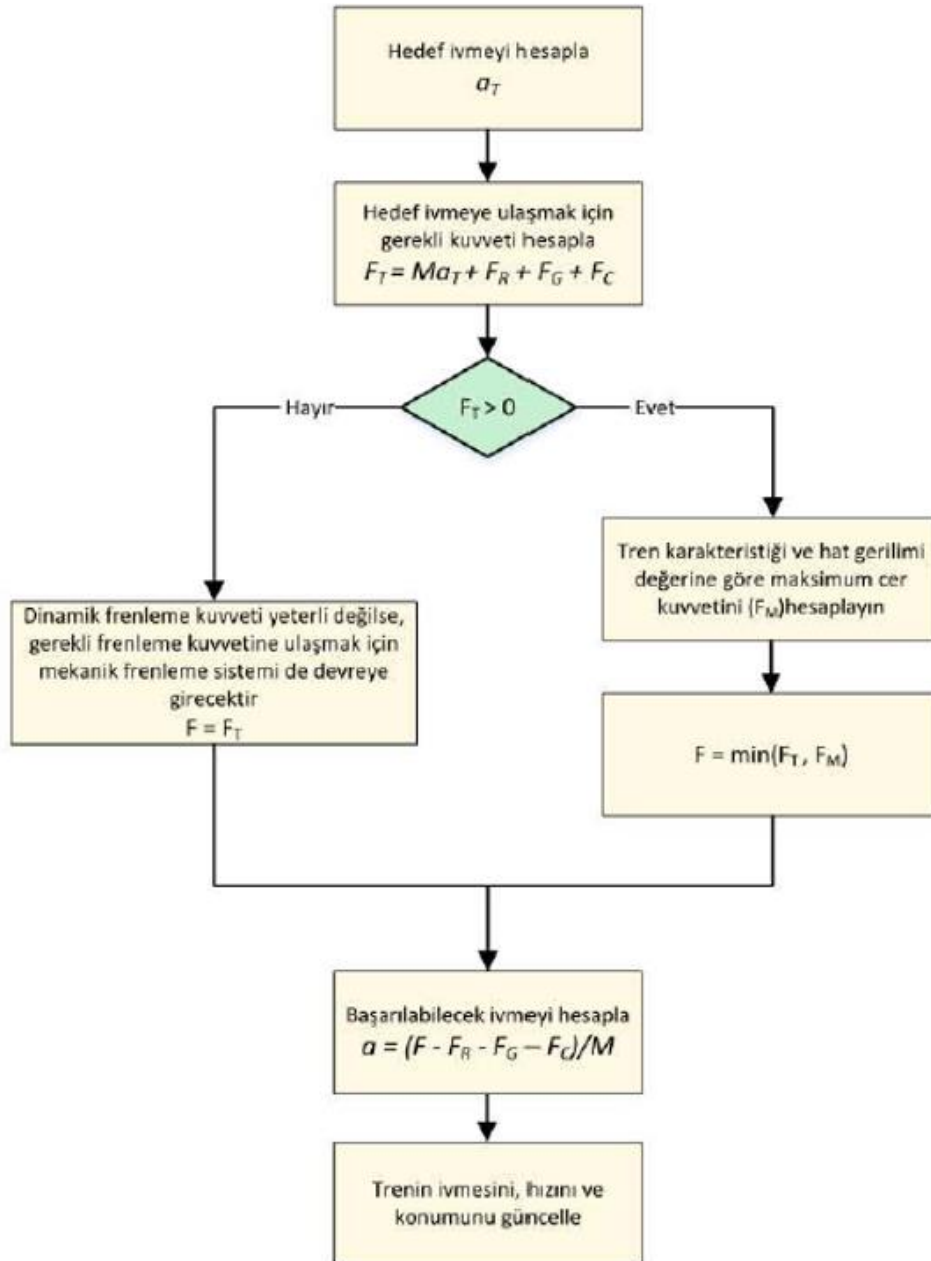
7.1. Simülasyon Yazılımı Hi-SimuX ve SimuX

İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen Hi-Simux ve SimuX yazılımları C# (.NET) ortamında hazırlanmıştır. Kullanıcı arayüzünde kullanıcı hem veri girişi hem de simülasyon sonuçlarını grafiksel olarak kıyaslayabilmektedir. Simülasyon programı ile tren performans analizleri, sefer sıklığı, tek hat işletme testleri, cer gücü ve trafo merkezleri boyutlandırılması, tren pantografında maksimum, minimum ve ortalama gerilim değerlerinin belirlenmesi, rejeneratif enerji kullanımı, ray gerilimi ve kaçak akım analiz, kısa devre akımı hesaplamaları, farklı besleme senaryolarının test edilmesi, enerji tüketiminin ve kayıplarının saptanması gibi birçok analizde kullanılmaktadır.

Hi-SmuX yazılımında çok sayıda farklı tren tipi modele dahil edilebilmektedir ve bu modelde tren hareketleri dinamik olarak izlenebilmektedir.

Şekil 8.6’da hedef ivmenin hesaplanmasında, mevcut ivme, hız, konum hareket yönü, hız limitleri, trafik sinyalleri, cer gücü sistem parametrelerini dikkate alındığı gösterilmiştir.

SimuX, düğüm analizi kullanılarak ağ empedans matrisi çözümü sunmaktadır. Bu empedans matrisi 1000x1000 gibi büyük boyutlarda olabilmektedir. Temel tren hareketleri hesap algoritması Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



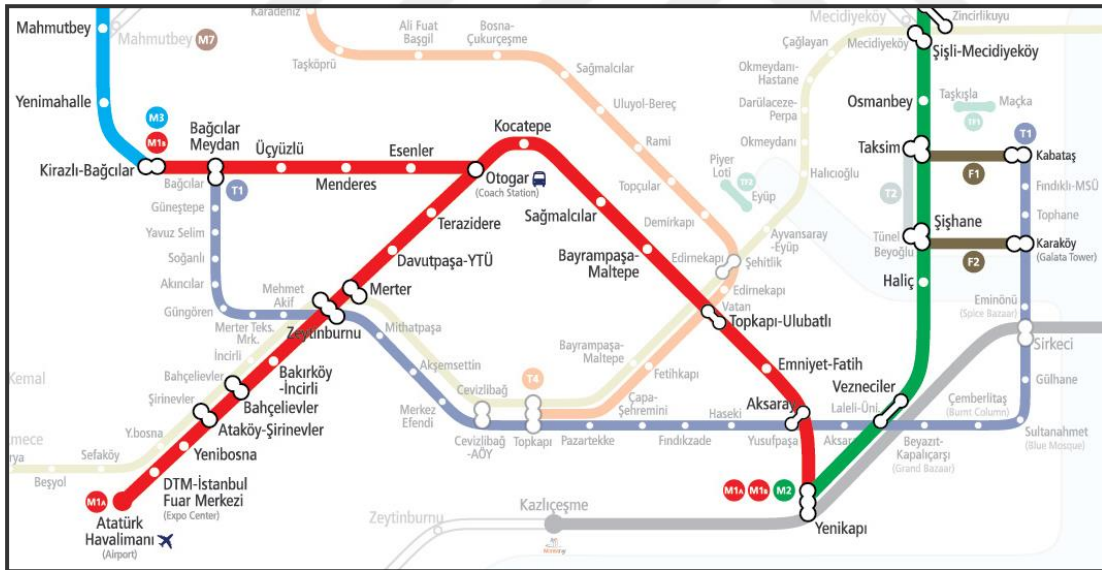
Şekil 7.1: Temel tren hareketleri hesap algoritması [43].

7.2. Hat Bilgileri

7.2.1. Mevcut hat bilgileri

M1A Yeni kapı – Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı- Kirazlı hattı 1989 yılında Aksaray Kartaltepe arasının açılmasıyla faaliyetine başlamıştır. Daha sonra Esenler (1989), Otogar – Zeytinburnu (1994), Zeytinburnu -Bakırköy (1994), Bakırköy - Ataköy (1995), Ataköy-Yenibosna (1995), Bahçelievler (1999), DTM-CNR-Havalimanı (2002), Yeni Esenler İstasyonu (2013), M1B Uzatması ve Yenikapı (2014) istasyonları tamamlanmıştır.

Hat uzunluğu 26,1 km olan hatta 23 adet istasyonun; 10 tanesi orta peron, 11 tanesi ikili peron, Otogar ise 3 hattın geçiş yapabildiği ikili orta peron şeklinde inşa edilmiştir. İstasyon İsimleri: Yenikapı, Aksaray, Emniyet, Ulubatlı, Bayrampaşa, Sağmalcılar, Kocatepe, Otogar, Terazidere, Davutpaşa, Merter, Zeytinburnu, Bakırköy, Bahçelievler, Ataköy, Yenibosna, DTM ve Havalimanı'dır. M1A- M1B hattına ait istasyonların haritası Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2: M1A- M1B hattı istasyonları [5].

M1A-M1B hattı ile ilgili tüm tablolar 14.04.2023 Tarihli ve 28016334.2023.200-07/E.01564 Sayılı Metro İstanbul Yazısıyla gelen bilgiler baz alınarak oluşturulmuştur. Mevcut hatta bulunan istasyonlara ait kilometre bilgileri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Mevcut hatta ait düşey eğim kilometre bilgileri Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : İstasyon km bilgileri [23].

İstasyon Bilgileri Hat ve Hat 2					
Adı	Kısaltma	Orta Nokta (m)	Uzunluk (m)	Min Dwell (s)	Max Dwell (s)
Yenikapı	S01	66	120	25	25
Aksaray	S02	819	120	25	25
Emniyet	S03	1759	120	25	25
Ulubatlı	S04	2805	120	25	25
Bayrampaşa	S05	4265	120	25	25
Sağmalcılar	S06	5692	120	25	25
Kocatepe	S07	7275	120	25	25
Otogar	S08	8371	120	25	25

Çizelge 7.2 : Düşey eğim bilgileri [23].

HAT 1 (H1)			HAT 2 (H2)		
Baş (m)	Son (m)	Eğim (%)	Baş (m)	Son (m)	Eğim (%)
0	336	-0.30	0	339	-0.30
542	724	5.80	542	731	5.70
800	958	0.20	805	966	0.20
1048	1194	1.10	1054	1206	1.10
1232	1583	0.80	1243	1593	0.80
1647	1923	0.10	1655	1846	0.10
2006	2420	1.80	2013	2449	1.80
2501	2707	3.20	2510	2713	3.20
2757	2874	0.40	2766	2880	0.40
2960	3385	3.00	2968	3384	3.00
3455	3754	1.50	3459	3759	1.50
3857	4143	3.80	3865	4144	3.80
4228	4327	0.10	4232	4328	0.10
4394	4863	2.80	4395	4869	2.80
4910	5221	1.80	4917	5228	1.80
5318	5376	-2.10	5327	5378	-2.10
5469	5814	-0.20	5476	5818	-0.20
5894	6063	0.60	5895	6066	0.60
6233	6939	-3.00	6236	6929	-3.00
7099	7318	-0.20	7120	7329	-0.10
7434	7923	-2.50	7447	7943	-2.50
8046	8485	-0.20	8066	8558	0.00
8551	8678	0.60	8622	8645	-3.40

M1A hattında bulunan cer trafo merkezlerine ait bilgiler Çizelge 7.3’te verilmiştir. Mevcut hatta ait yatay kurplara ait kilometre bilgileri Çizelge 7.4’te verilmektedir.

Çizelge 7.3 : Trafo merkezleri konumları [23].

Trafo Merkezi	S/I veya DILA-S Konumu (m)		(+) Fider Direnci [mΩ]		(-) Fider Direnci [mΩ]	
	H1	H2	Batı	Doğu	H1	H2
Yenikapı	185	185	-	0.5	0.5	0.5
Aksaray	1010	1010	3.2	1.1	0.5	0.5
Ulubatlı	3300	3300	2.8	5.2	0.5	0.5
Sağmalcılar	5850	5850	2.8	2	0.5	0.5
Otogar	8550	8550	5.2	5.2	0.5	0.5
Mimarsinan	9940	9940	0.9	0.9	0.5	0.5
Belpa	12990	12990	0.8	0.8	0.5	0.5
Bahçelievler	15580	15580	1.8	1.8	0.5	0.5
Yenibosna	17850	17850	1.6	1.6	0.5	0.5
DTM	19310	19310	0.8	-	0.5	0.5

Çizelge 7.4 : Yatay kurp değerleri [23].

HAT 1 (H1)			HAT 2 (H2)		
Baş (m)	Son (m)	Yarıçap (m)	Baş (m)	Son (m)	Yarıçap (m)
0	336	-0.30	0	339	-0.30
542	724	5.80	542	731	5.70
800	958	0.20	805	966	0.20
1048	1194	1.10	1054	1206	1.10
1232	1583	0.80	1243	1593	0.80
1647	1923	0.10	1655	1846	0.10
2006	2420	1.80	2013	2449	1.80
2501	2707	3.20	2510	2713	3.20
2757	2874	0.40	2766	2880	0.40
2960	3385	3.00	2968	3384	3.00
3455	3754	1.50	3459	3759	1.50
3857	4143	3.80	3865	4144	3.80
4228	4327	0.10	4232	4328	0.10
4394	4863	2.80	4395	4869	2.80
4910	5221	1.80	4917	5228	1.80
5318	5376	-2.10	5327	5378	-2.10
5469	5814	-0.20	5476	5818	-0.20
5894	6063	0.60	5895	6066	0.60
6233	6939	-3.00	6236	6929	-3.00
7099	7318	-0.20	7120	7329	-0.10
7434	7923	-2.50	7447	7943	-2.50
8046	8485	-0.20	8066	8558	0.00
8551	8678	0.60	8622	8645	-3.40

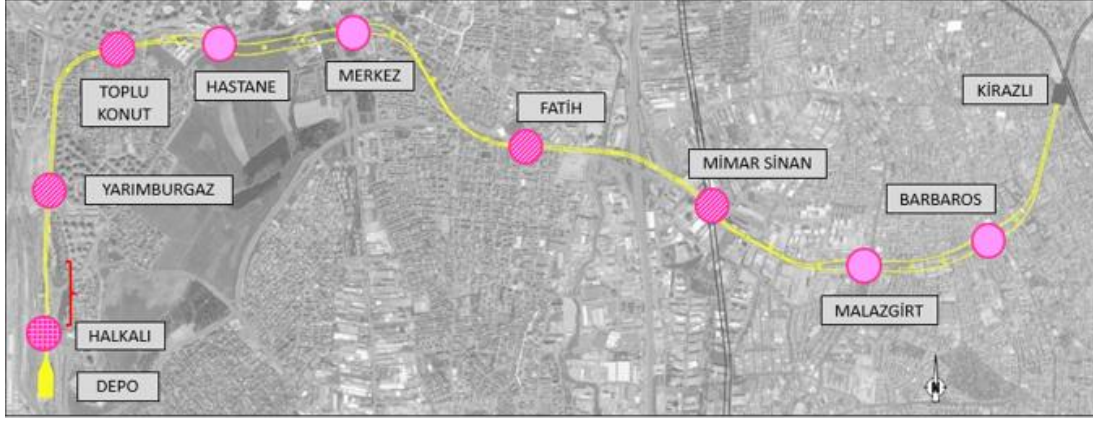
Mevcut hatta ait güzergâh boyunca uygulanan hız limitleri Çizelge 7.5’te verilmiştir. İstasyonda bekleme süresi 25 s olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.5 : Mevcut hatta ait hız limitleri [23].

HAT 1 (H1)			HAT 2 (H2)		
Baş (m)	Son (m)	Hız (km/h)	Baş (m)	Son (m)	Hız (km/h)
0	336	40	0	248	40
326	505	70	248	509	65
505	694	55	509	632	60
694	954	40	632	935	40
954	1645	80	935	1651	80
1645	1879	40	1651	1885	40
1879	2690	80	1885	2696	80
2690	2924	40	2696	2930	40
2924	3233	80	2930	3233	80
3233	3467	40	3233	3467	40
3467	3797	80	3467	3794	80
3797	4146	60	3794	4147	65
4146	4380	40	4147	4397	40
4380	5575	80	4397	5581	80
5575	5809	40	5581	5815	40
5809	5998	80	5815	6005	80
5998	6483	75	6005	6483	70
6483	6717	40	6483	6717	40
6717	7031	65	6717	7164	70
7031	7155	60	7164	7398	40
7155	7389	40	7398	7787	65
7389	7511	65	7787	8039	80
7511	7773	70	8039	8260	65

7.2.2. Entegre hat bilgileri

Kirazlı Halkalı Metro hattı yaklaşık 9,9 km olan entegre olacak bu hat 9 adet yeraltı istasyonu ve bir depo hattından oluşmaktadır. Kirazlı Halkalı metro projesi M1 hattı yansira Mimarsinan istasyonu ile Ataköy İkitelli, Halkalı istasyonu ile Marmaray ve Halkalı Havalimanı, Kirazlı istasyonu ile de Başakşehir Kayaşehir Metro hatlarına entegre olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 7.3: Kirazlı Halkalı Metro Hattı istasyonları

Kirazlı Halkalı metro hattına ait eğim verileri Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6 : Düşey eğim verileri [23].

HAT 3 (H3)			HAT 4 (H4)		
Baş (m)	Son (m)	Eğim (%)	Baş (m)	Son (m)	Eğim (%)
-600	-445	0.00	-550	-450	0.00
-395	-330	5.50	-340	-5	2.05
-235	-205	-2.00	43	66	1.70
-140	-5	2.5	146	486	0.00
0	37	2.80	566	842	-3.50
93	113	0.00	1042	1469	-0.30
176	202	-1.70	1589	1930	-3.96
287	506	0.00	2110	2155	3.00
594	868	-3.50	2245	2423	0.30
1068	1468	-0.30	2543	3396	1.40
1588	1926	-4.00	3496	3683	-0.50
2106	2154	3.00	3803	4621	-3.97
2244	2423	0.30	4701	4874	2.06
2543	3408	1.38	4974	5325	0.30
3508	3703	-0,50	5480	6101	1.90
3823	4470	-4.00	6215	6408	0.00
4710	4864	2.15	6471	6859	0.85
4964	5316	0.30	6927	7101	0.00
5465	6110	1.83	7252	7808	-2.85
6238	6428	0.00	7978	8190	0.00
6483	6940	0.75	8377	8605	-3.18
6993	7161	0.00	8689	8834	-0.40
7332	7876	-2,85	8948	8985	3.39
8047	7161	0.00	9188	9463	0.00

Kirazlı Halkalı Metro hattına ait yatay kurplara ait kilometre bilgileri Çizelge 7.7’de, hız limitleri Çizelge 7.8’te verilmiştir.

Çizelge 7.7 : Yatay kurp değerleri [23].

HAT 3 (H4)			HAT 4 (H4)		
Baş (m)	Son (m)	Yarıçap (m)	Baş (m)	Son (m)	Yarıçap (m)
43	214	348	53	182	300
772	1223	314	834	1243	300
1525	1728	750	1526	1724	736
1993	2075	800	1989	2073	814
2466	3139	797	2461	3155	815
3759	4042	698	3767	4059	719
4212	4916	405	4232	4909	390
5835	6089	400	5901	6155	400
6449	6801	720	6473	6861	485
7172	7249	900	7431	7566	450
7403	7556	350	8013	8076	320
7929	7974	350	8330	8396	350
8254	8324	350	9029	9073	500
8575	8950	85	9503	9523	310
9013	9066	350			
3208	9241	300			
6442	9462	310			

Çizelge 7.8 : Entegre hatta ait hız limitleri [23].

HAT 1 (H1)			HAT 2 (H2)		
Baş (m)	Son (m)	Hız (km/h)	Baş (m)	Son (m)	Hız (km/h)
-755	-560	40	-550	-490	40
-560	-4	80	-490	-29	80
-4	296	40	-29	290	40
296	777	80	290	1256	80
777	1272	75	1256	1520	40
1272	1506	40	1520	2206	80
1506	2220	80	2206	2470	40
2220	2454	40	2470	3470	40
2454	3497	80	3470	3734	40
3497	3731	40	3470	3734	40
3731	5116	80	3734	5111	80
5116	5316	40	5111	5325	40

Kirazlı Halkalı metro istasyonu için ihale aşamasında Halkalı ve Barbaros'ta olmak üzere iki ayrı besleme noktası tasarlanmıştır. Her bir kaynak normal işletmede tüm yüklerin yarısını besleyecek şekilde, enerji kaynaklarından birinin olmaması

durumunda ise tüm hattı besleyecek şekilde 60MVA gücünde projelendirilmiştir. Her bir istasyonda CER trafo merkezi de bulunmaktadır.

M1A-M1B hattından farklı olarak ring topolojisi olarak projelendirilmiştir. Kirazlı Halkalı metro projesine ait orta gerilim tek hat şeması ekte bulunan Şekil 0.2’de verilmiştir.

7.3. Mevcut Hat Orta Gerilim İşletme Senaryoları

M1A-M1B hattında; 19 adet trafo merkezi ve 6 adet indirici merkez bulunmaktadır. Sözleşme güçleri, Yenikapı 25000 kW, Ulubatlı 4800 kW, Sağmalcılar 6000 kW, Yenibosna 5200 kW, Havalimanı 5000 kW, Bağcılar 26000 kW olmak üzere toplam 5 adet Bedaş enerji beslemesi bulunmaktadır [44]. Mevcut hat üzerinden M1B bölgesinde Kirazlı’da jeneratör binası bulunmaktadır. Bu jeneratör sınırlı bir bölge için tasarlanmıştır. Hattın tamamı için tüm kaynakların devre dışı kaldığı durum için bir jeneratör sistemi bulunmamaktadır. Mevcut hatta ait orta gerilim tek hat şeması ekte bulunan Şekil 0.1’de verilmiştir.

7.3.1. Normal işletme senaryoları

Normal işletmede iki farklı tip senaryo bulunmaktadır.

Senaryo 1:

Ulubatlı Bedaş: Aksaray, Ulubatlı,

Sağmalcılar Bedaş: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa,

Yenibosna Bedaş: Yenibosna, Bahçelievler, Bakırköy, Belpa.

Havalimanı Bedaş: Havalimanı, DTM,

Bağcılar Bedaş: Kirazlı, Bağcılar, Üçyüzlü, Menderes, Esenler

Senaryo 2:

Ulubatlı Bedaş: Aksaray, Ulubatlı,

Sağmalcılar Bedaş: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan,

Yenibosna Bedaş: Yenibosna, Bahçelievler, Bakırköy, Belpa.

Havalimanı Bedaş: Havalimanı, DTM,

Bağcılar Bedaş: Kirazlı, Bağcılar, Üçyüzlü, Menderes, Esenler, Ferhatpaşa,

Bu senaryolara ilaveten Havalimanının kapasitif sorunu olması durumunda Yenibosna Bedaş devre dışı bırakılarak Havalimanı Bedaş hattından beslenmektedir.

Ulubatlı Bedaş: Aksaray, Ulubatlı,

Sağmalcılar Bedaş: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa,

Havalimanı Bedaş: Havalimanı, DTM, Yenibosna, Bahęelievler, Bakırköy, Belpa.

Bağcılar Bedaş: Kirazlı, Bağcılar, yzl, Menderes, Esenler.

Havalimanı hattında gerilim düşümü sorunu olduğunda veya enerji kesintisi durumunda aşağıdaki senaryoya göre besleme yapılmaktadır.

Ulubatlı Bedaş: Aksaray, Ulubatlı,

Sağmalcılar Bedaş: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa,

Yenibosna Bedaş: Yenibosna, Bahęelievler, Bakırköy, Belpa, Havalimanı, DTM

Bağcılar Bedaş: Kirazlı, Bağcılar, yzl, Menderes, Esenler.

7.3.2. Enerji kesilmesi işletme senaryoları

Ulubatlı Bedaşta enerji kesintisi olduğunda aşağıdaki senaryo işletilmektedir.

Sağmalcılar Bedaş: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa, Aksaray, Ulubatlı

Yenibosna Bedaş: Yenibosna, Bahęelievler, Bakırköy, Belpa,

Havalimanı Bedaş: Havalimanı, DTM,

Bağcılar Bedaş: Kirazlı, Bağcılar, yzl, Menderes, Esenler

Sağmalcılar Bedaşta enerji kesintisi olduğunda aşağıdaki senaryo işletilmektedir.

Ulubatlı Bedaş: Aksaray, Ulubatlı, Sağmalcılar, Otogar, Ferhatpaşa,

Yenibosna Bedaş: Yenibosna, Bahęelievler, Bakırköy, Belpa, Mimarsinan

Havalimanı Bedaş: Havalimanı, DTM,

Bağcılar Bedaş: Kirazlı, Bağcılar, yzl, Menderes, Esenler.

Yenibosna Bedaşta enerji kesintisi olduğunda aşağıdaki senaryo işletilmektedir.

Ulubatlı Bedaş: Aksaray, Ulubatlı,

Sağmalcılar Bedaş: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa, Yenibosna,

Bahęelievler, Bakırköy, Belpa, Mimarsinan

Havalimanı Bedaşı: Havalimanı, DTM

Bağcılar Bedaşı: Kirazlı, Bağcılar, Üçyüzlü, Menderes, Esenler.

Bağcılar Bedaşıta enerji kesintisi olduğunda aşağıdaki senaryo işletilmektedir.

Ulubatlı Bedaşı: Aksaray, Ulubatlı,

Sağmalcılar Bedaşı: Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa, Yenibosna, Kirazlı, Bağcılar, Üçyüzlü, Menderes, Esenler, Bahçelievler, Bakırköy, Belpa, Mimarsinan

Yenibosna Bedaşı: Yenibosna, Bahçelievler, Bakırköy, Belpa,

Havalimanı Bedaşı: Havalimanı, DTM

Yenibosna ve Havalimanı Bedaşıta enerji kesintisi olduğunda aşağıdaki senaryo işletilmektedir.

Sağmalcılar Bedaşı : Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa, Yenibosna, Bahçelievler, Bakırköy, Belpa, Havalimanı, DTM,

Ulubatlı Bedaşı: Aksaray, Ulubatlı, Sağmalcılar, Otogar, Ferhatpaşa,

Bağcılar Bedaşı: Kirazlı, Bağcılar, Üçyüzlü, Menderes, Esenler

Ulubatlı ve Sağmalcılar Bedaşıta enerji kesintisi olduğunda aşağıdaki senaryo işletilmektedir.

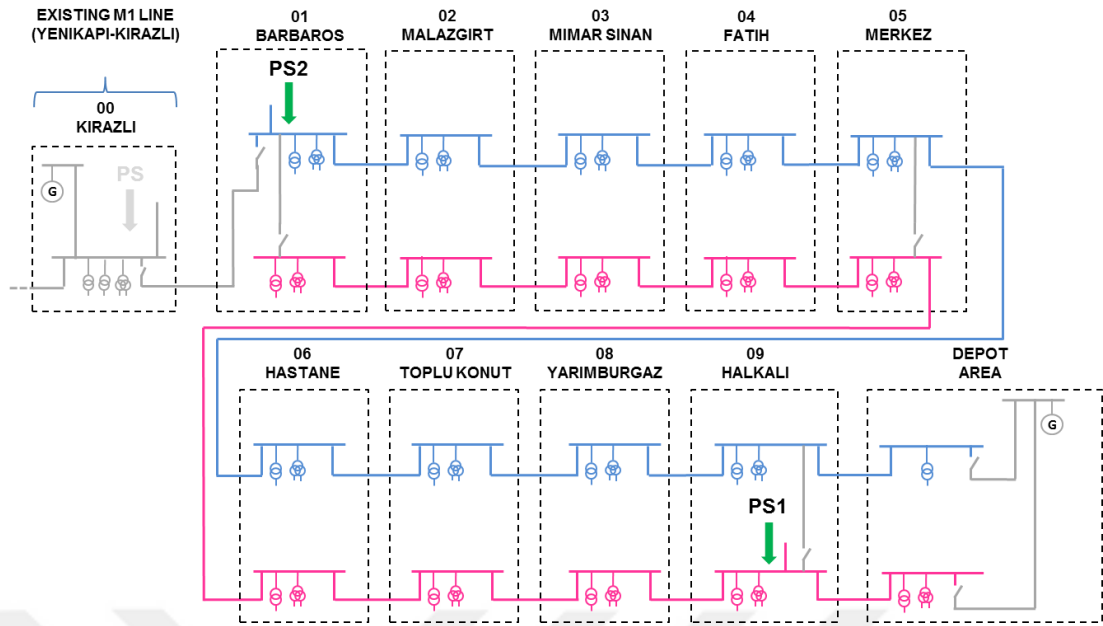
Yenibosna Bedaşı: Yenibosna, Bahçelievler, Bakırköy, Belpa, Aksaray, Ulubatlı, Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Ferhatpaşa,

Havalimanı Bedaşı: Havalimanı, DTM

Bağcılar Bedaşı: Kirazlı, Bağcılar, Üçyüzlü, Menderes, Esenler, Menderes, Esenler

7.4. Kirazlı Halkalı Hattı Orta Gerilim İşletme Senaryoları

Kirazlı Halkalı metro projesi kapsamında Barbaros İstasyonu ve Halkalı depo istasyonuna iki adet Bedaşı enerji beslemesi planlanmıştır. Aynı zamanda Kirazlı istasyonundan mevcut hatta bağlantı bulunmaktadır. Normal işletme durumunda her bir kaynak istasyon yüklerinin yaklaşık yarısını beslemektedir. Şekil 7.4'te Kirazlı Halkalı Metro projesine ait normal işletme durumu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.4: Kirazlı Halkalı Metro orta gerilim normal işletme.

Enerji kaynaklarından bir tanesinin arızalanması durumunda tüm orta gerilim sistemi tek bir kaynaktan beslenmektedir. İki enerji kaynağının da arızalanması durumunda Halkalı Depo bölgesinde bulunan acil durum jeneratörü üzerinden indirgenmiş modda yolcuların tahliyesini izin verecek enerjiyi sağlamaktadır. İndirgenmiş modda trenler istasyonlara ikişer ikişer istasyona çekilmesi ve acil durumda kritik ekipmanların çalışmasına imkân verecektir.

Kirazlı istasyonunda aynı zamanda M1B hattına bağlantı bulunmaktadır ancak orta gerilim senaryolarının içine bu besleme dahil edilmemiştir. Kirazlı Halkalı metro hattının Mimar Sinan istasyonunda yapımı devam eden Ataköy İkitelli hattı ile de entegrasyonu bulunmaktadır. Ancak bu iki hat arasında orta gerilim sistemi arasında bir arayüz planlanmamıştır. Halkalı depo sahasında ise hem işletilmekte olan Marmaray projesi hem de yapımı devam eden Halkalı Havalimanı projesi ile de entegre olan Kirazlı Halkalı projesinin bu hatlarla yine bir orta gerilim arayüzü bulunmamaktadır. Her bir proje için indirici merkezden ayrı ayrı besleme getirilmektedir. Yapımı devam eden bu tarz projelerin özellikle indirici merkezlerden getirilen enerjinin ortak olarak yapılması daha ekonomik olacaktır.

7.5. Mevcut Hat Trafo Merkezleri Fiziki Koşulları

Mevcut M1A hattında bulunan Sağmalcılar Trafo Merkezi yerinde incelenerek mevcut durumları incelenmiştir. 1989 yılında faaliyetine başlayan trafo merkezlerinde bulunan

ekipmanların ekonomik ömürleri de tamamlandığında kısmi olarak revizyon süreçleri de başlamıştır.

Trafo merkezi Sağmalcılar Metro İstasyonu durağında yanında bulunan park içine konumlandırılmıştır. Bu trafo merkezinde orta gerilim hücrelerinin yenilenmesi tamamlanmıştır. Eski hücreler de aynı oda içinde bulunmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ile yeni hücre boyutları eskilerine göre daha küçük boyutlarda olduğu görülmüştür. Şekil 7.5'te Sağmalcılar trafo merkezinde bulunan eski ve yeni hücreler görülmektedir.



Şekil 7.5: Sağmalcılar trafo binası orta gerilim hücreleri.

Cer Trafoları doğrultucular önüne konumlandırılmış ve aradaki bağlantı busbar sistemi ile sağlanmıştır. Busbar girişleri trafo koruma kapaklarının içerisinde yapılmıştır. Trafolar beton plaka üzerine yerleştirilmiş kanallara monte edilmiştir. Trafo ve doğrultucular ASEA Markadır. Şekil 7.6'da Sağmalcılar Trafo Merkezi Cer Trafoları görülmektedir.

DC Hücrelerin yerleşimi iki doğrultucunun ortasına gelecek şekilde yapılmıştır. DC hücre ölçüsü 300x175cm olarak ölçülmüştür. DC hücrelerin markası Whipp & Bourne'dir.



Şekil 7.6: Sağmalcılar trafo merkezi cer trafoları.

Şekil 7.7’de Sağmalcılar Trafo Merkezi’nde bulunan DC hücreler gösterilmiştir.



Şekil 7.7: Sağmalcılar trafo merkezi DC hücreler.

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi ayırıcılar ise DC hücrelerin yanına monte edilmiştir.



Şekil 7.8: Sağmalcılar trafo merkezi ayırıcılar.

7.6. Mevcut Hat Cer Gücü, Katener Sistemi ve Ray Verileri

M1A hattının tamamı ve Esenler peron bölgesine kadar mevcut hatta ikiz katener teli+ kontak teli +fider teli içeren 120 mm² kesitte normal katener sistemi, M1B hattında ise rijit katener sistemi kullanılmaktadır. Mevcut hattın katener sisteminde ve raylarında paralelleme bulunmamaktadır

Normal katener sistemi km direnci 44,4 miliohm olarak alınmıştır. Proje kapsamında kullanılan S49 tek hat normal ray direnci km başına 20,5 miliohm olarak alınmıştır. İki hatta ait 4 ray 250 m’de bir paralelleme olduğu katener hattında paralelleme bulunmadığı kabul edilmiştir.

Mevcut hatta 19 adet Orta gerilim Trafo merkezi ve 13 adet Cer trafo merkezi bulunmaktadır. Simülasyonda Yenikapı Otogar arasında bulunan Cer Trafo merkezleri doğrultucu bilgileri kullanılmıştır. Yenikapı Otogar bölgesinde bulunan doğrultuculara ait bilgiler Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.9 : M1A- M1B hattı doğrultucu bilgileri [44].

Cer Trafo Merkezi	Doğrultucu Gücü (kVA)	Aşırı Yük Sınıfı
Yenikapı TM	1x2100	VI
Aksaray	2x2100	V
Ulubatlı	2x2100	V
Sağmalcılar	2x2100	V
Otogar	1x2100	VI

Simülasyon çalışması için yaygın yaklaşıma benzemesi için uç TM'lerde tek set ve tüm TM'lerde benzer güç seviyesi kullanılmıştır. Hattın uç noktalarındaki TM'lerde 1 trafo + doğrultucu grubu ve 2 adet hat çıkış fider kesicisi bulunmaktadır. Diğer TM'lerde 2 trafo + doğrultucu grubu ve 4 adet hat çıkış fider kesicisi bulunmaktadır. Normal işletme durumu 90 s bekleme süresine ve tek trafo merkezinin (trafo + doğrultucu setlerinin ve tüm hat çıkış fider kesicileri) devre dışı kalma durumu ise 120 s bekleme süresine göre analiz edilmiştir.

7.7. Kirazlı Halkalı Hattı Cer Gücü, Katener Sistemi ve Ray Verileri

Kirazlı Halkalı Metro Projesi kapsamında 9 adet Cer Trafo merkezi bulunmaktadır. Çizelge 7.10'da cer trafo merkezi doğrultucu bilgileri paylaşılmıştır. Kirazlı Halkalı Metro hattında tünel kesiminde rijit katener sistemi, depo hattında konvansiyonel katener sistemi bulunmaktadır.

Çizelge 7.10 : Kirazlı Halkalı doğrultucu bilgileri.

Cer Trafo Merkezi	Doğrultucu Gücü (kVA)	Aşırı Yük Sınıfı
Barbaros	2x3300	VI
Malazgirt	2x3300	VI
Mimarsinan	2x3300	VI
Fatih	2x3300	VI
Merkez	2x3300	VI
Hastane	2x3300	VI
Toplu Konut	2x3300	VI
Yarımburgaz	2x3300	VI
Halkalı	2x3300	VI

Rijit katener sistemi eşdeğer bakır kesiti 1400 mm² 'dir. Kesit, kontak telinin %20 aşınmış ve 60°C'ye ısınmış olacağı kabulü ile direnci 15 mΩ/km olarak hesap edilmektedir. S54 (UIC54) tek hat ray sistemi 45 °C km direnci %5 aşınmış olarak 22 mΩ olarak alınmıştır.

7.8. Kullanılan Standartlar

EN 50122, demiryolu altyapısının elektrifikasyonu ile ilgili standartlardan biridir. Ray toprak arası gerilimi, elektrikli demiryolu hatlarında rayların ve toprak arasındaki gerilim farkını ifade eder.

Elektrikli demiryolu hatlarında, raylar elektrik enerjisi iletilmesi ve trenlerin çalıştırılması için kullanılır. Raylar, iletilen elektrik enerjisini taşıyan bir iletim hattı gibi davranır. Rayların yüksek gerilimle doğrudan temas halinde olması güvenlik riski oluşturabilir, bu nedenle ray toprak arası gerilimi kontrol edilmelidir. Ray toprak arasındaki gerilimin yüksek olmasını kontrol edilmesi ve sınır değerlerin aşılması durumunda enerjinin kesilmesi gerekmektedir. Bu nedenle hat üzerinde VLD benzer gerilim sınırlayıcı cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazların sınır değerleri bazı şartnamelerde 60 V dokunma gerilimi olarak düzenlenmiştir.

EN 50122 standardı, ray toprak arası geriliminin belirli limitler içinde tutulması gerektiğini ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için gerekli önlemlerin alınmasını önerir. Bu gerilim, demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde kullanılan farklı konfigürasyonlara ve güç sistemlerine bağlı olarak değişebilir.

Ray toprak arası gerilimi, demiryolu altyapısının güvenli işletilmesi ve personel ile yolcuların güvenliği için önemli bir konudur. Bu nedenle, EN 50122 standardı gibi yönergeler ve ulusal veya uluslararası düzenlemeler, ray toprak arası gerilim kontrolü ve güvenlik önlemlerinin uygulanmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

EN 50122-1 standardına göre ray gerilimin alabileceği değer Ute 300 saniyeden büyük değerler için 120 V, 1 saniye için Ute 160 V olmaktadır [16]. Çizelge 7.11'de efektif temas gerilimi değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.11 : EN 50122-1'e göre zamana bağlı maksimum efektif temas gerilimi değerleri [46].

T(s)	Ute max (V) uzun süreli	Ute max (V) kısa süreli
> 300	120	-
300	150	-
1	160	-
0,9	165	-
0,8	170	-
0,7	175	-
< 0,7	-	350
0,6	-	360
0,5	-	385
0,4	-	420
0,3	-	460
0,2	-	520
0,1	-	625
0,05	-	735
0,02	-	870

Cer gücü simülasyonlarında tek trafo arızaları, komşu olan iki trafonun devre dışı kalma durumları da kontrol edilmektedir. Özellikle komşu olan iki adet trafo merkezinin devre dışı kaldığı durumlarda trafoların çok fazla yüklendiği görülmektedir. Bu nedenle trafo aşırı yük hizmet (duty) sınıflarının iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

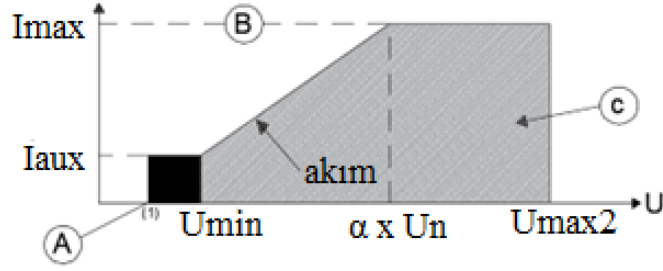
Proje kapsamında V ve VI sınıfı trafoların kullanıldığı görülmüştür. EN 50329 standardına göre çalışma sınıfı VI olan trafoların % 150 yüke 2 saat, % 300 yüke 1 dakika sınıfı V olan trafoların ise % 150 yüke 2 saat, % 200 yüke 1 dakika sınır kapasiteleri belirtilmiştir [47]. Yeni yapılan hatlarda trafoların aşırı yük hizmet (duty) sınıfları minimum VI olarak seçilmesi gerektiği şartnamelerde belirtilmektedir. Ancak bu durumun mutlaka simülasyon sonucuna göre değerlendirilerek seçilmesi gerekmektedir.

EN 50329 standardına göre çalışma sınıflarına göre trafoların yüklenmeleri aşağıdaki Çizelge 7.12'de verilmiştir.

Çizelge 7.12 : Trafo aşırı yük hizmet (duty) sınıfları.

Duty Sınıfı	Id.	p.u. of IB	Süre	Tipik Uygulaması
I	-	1	Sürekli	
IA	a	1	3120 saniye	a.c systems
	b	1.7	480 saniye	
IB	a	1	3300 saniye	a.c systems
	b	2.2	300 saniye	
IC	a	1	1500 saniye	a.c systems
	b	2.7	300 saniye	
ID	a	1	1620 saniye	a.c systems
	b	3.7	180 saniye	
IE	a	1	1680 saniye	a.c systems
	b	4.6	120 saniye	
V	a	1	Sürekli	Hızlı toplu taşımacılık Trolleybüs
	b	1.5	2 saat	
	c	2	60 saniye	
VI	a	1	Sürekli	Ana demiryolları
	b	1.5	2 saat	
	c	3	60 saniye	
VII	a	1	Sürekli	Hafif Raylı Tramvaylar
	b	1.5	2 saat	
	c	4.5	15 saniye	
VIII	a	1	Sürekli	Hızlı toplu taşımacılık Trolleybüs
	b	1.5	2 saat	
	c	2	60 saniye	
IXA	a	1	Sürekli	Ana demiryolları
	b	1.5	2 saat	
	c	3	300 saniye	
IXB	a	1	Sürekli	Ana demiryolları
	b	2	2 saat	
	c	3	300 saniye	

Araçlarda gerilime bağlı cer akımı sınırlaması için kullanılan grafik Şekil 7.9’da verilmiştir. 750 V DC için 600 V DC de cer akımı U_{max2} maksimum değerini almakta ve bu gerilim seviyesinden sonra cer akımı sınırlandırılmaktadır. 750 V DC için minimum değer U_{min} ise 500 V DC olmaktadır. Araç yüklenicilerinin bu standartta verilen değerlere uyması gerekmektedir.



- (A) Cer yok 750 V DC için $\alpha = 0,8$
 (B) Akım seviyesi aşıldı
 (C) İzin verilen akım seviyeleri

Şekil 7.9: EN 50388'e göre katener hat gerilimize karşı tren akımının izin verilen çalışma aralıkları [48].

α faktörü değerleri Çizelge 7.13'te verilmektedir. 750 V DC için bu değer 0,8 olarak alınmaktadır. U_{min} 400 V DC'dir.

Çizelge 7.13 : α faktörü değerleri.

Güç Temini	A değeri
a.c. 25000 V 50 Hz	0,9
a.c. 15000 V 16,7 Hz	0,95
d.c. 3000 V	0,9
d.c. 1500 V	0,9
d.c. 750 V	0,8

7.9. Simülasyonda Kullanılan Araç Verileri

Simülasyonda kullanılan araç tipleri sembolik olarak adlandırılmıştır. A treni 5'li dizi, B treni 5'li dizi ve C treni 4'lü dizi kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan araçlardan birisi mevcut hatta 4'lü dizi olarak 180 s sefer sıklığı ile işletilmektedir. Her bir parametre ve eğri tek bir araç için verilmiştir. Trenlerin yardımcı güç sistemi sürekli %50'si yüklenecek şekilde hesaba katılmıştır.

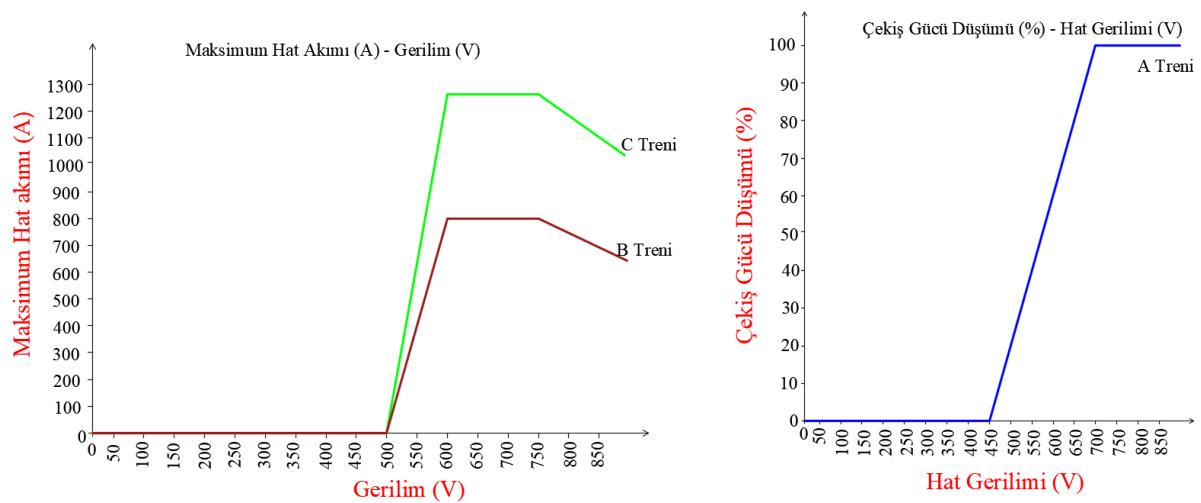
Araçların yolcu taşıma kapasiteleri standartlara göre AW0: yolcusuz araç, AW1: oturmuş yolcu ve ayakta yolcu 4 kişi/m², AW2: oturmuş yolcu ve ayakta yolcu 6 kişi/m², AW3: oturmuş yolcu ve ayakta yolcu 8 kişi/m² olarak değerlendirilmektedir. Simülasyon çalışması için tüm trenlerde 70 kg ağırlığında 1250 yolcu bulunduğu kabul edilmiştir. B ve C trenlerinin gerilime bağlı cer akımı sınırlama eğrisinin, EN 50388

standardına uygun olduğu kabul edilmiştir [48]. A trenlerinde gerilime bağlı akım sınırlamasından farklı olarak gerilime bağlı cer kuvveti sınırlaması bulunmaktadır.

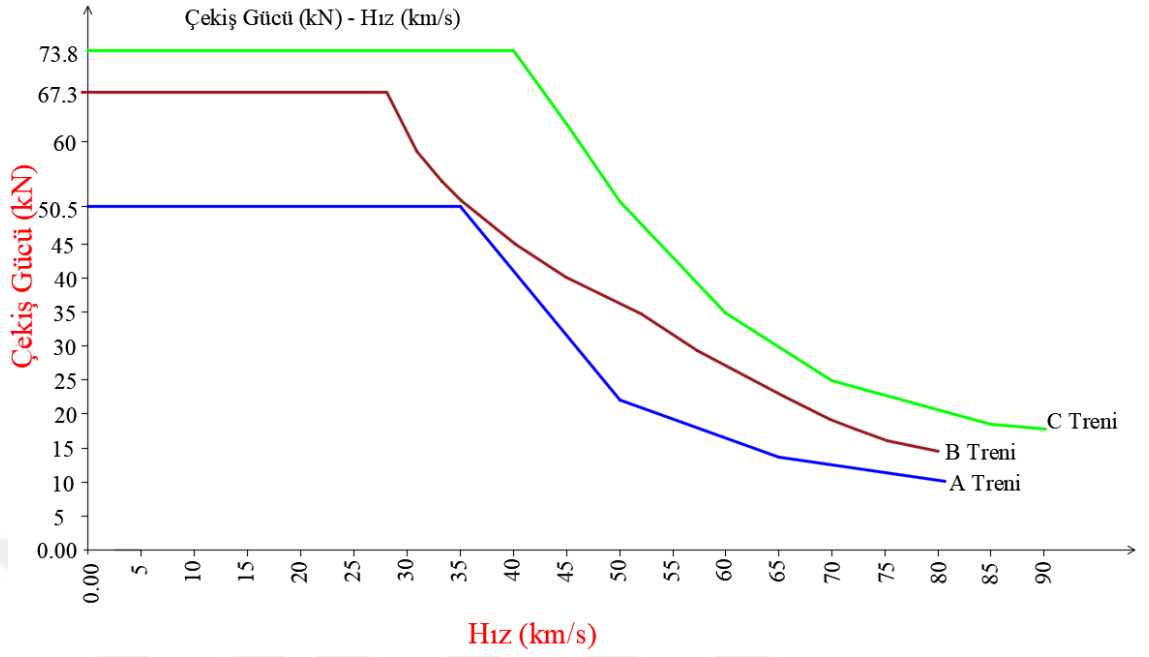
Simülasyonda kullanılan trenlere ait veriler Çizelge 7.14'te ve Şekil 7.10'da cer kuvveti [kN]- hız [km/h] diyagramı, Şekil 7.11'de rejeneratif fren kuvveti [kN]- hız [km/h] diyagramı ve Şekil 7.12'de verim [%]- hız [km/h] diyagramı sunulmuştur. Bu veriler bir araç için düzenlenmiştir. Simülasyonda araçlara ait yardımcı güç tüketimlerinin yarısı hesaba katılmıştır.

Çizelge 7.14 : Araç parametreleri.

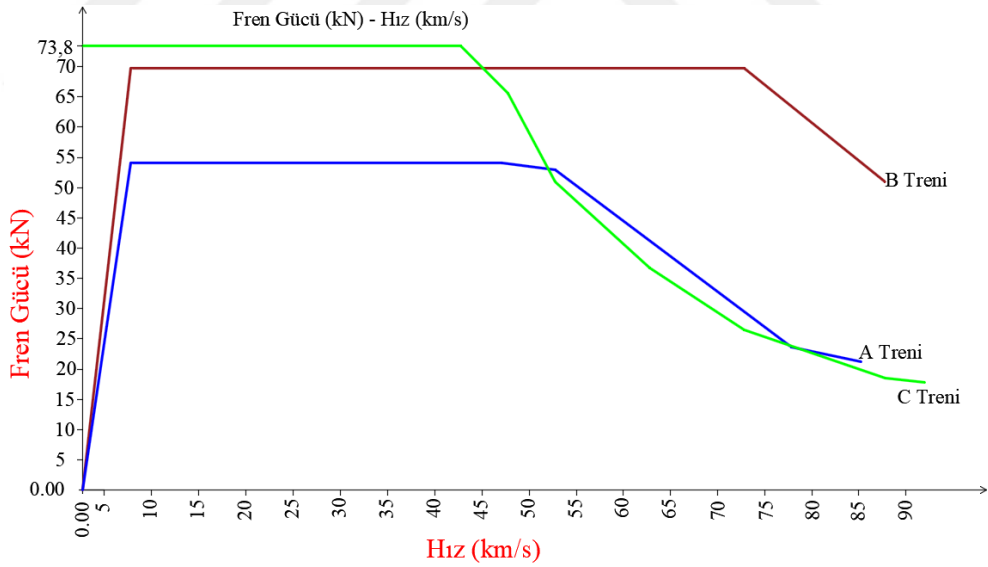
Parametre	A Treni 5'li Dizi	B Treni 5'li Dizi	C Treni 4'lü Dizi
Maksimum İşletme Hızı [km/s]	80	80	80
Maksimum İvmelenme [m/s ²]	1	0.7	1.1
Maksimum Frenleme İvmesi [m/s ²]	1.1	1.1	1.1
Jerk Limit [m/s ³]	0.8	1	1
Boş Ağırlık – AW0 [kg]	199500	145000	157676
Döner Kütle Oranı [%]	10	10	8.5
Uzunluk [m]	118	115	114
Yardımcı Güç [kW]	300	135	240
Maksimum İşletme Gerilimi (EN 50163) [V]	900	900	900
Minimum İşletme Gerilimi (EN 50163) [V]	500	500	500



Şekil 7.10: Araçlara ait gerilime bağlı akım (solda) ve cer gücü gerilim sınırlama (sağda) grafikleri.



Şekil 7.11: Araçlara ait cer gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları.

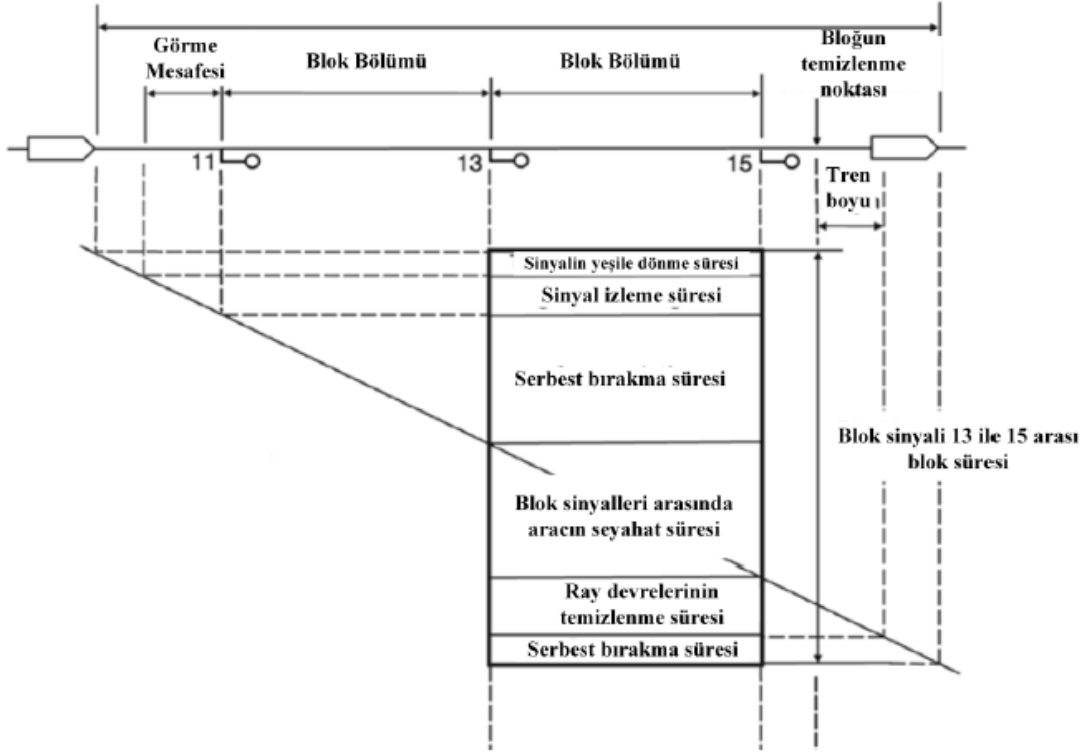


Şekil 7.12: Araçlara ait fren gücü [kN]- hız [km/h] diyagramları.

7.10. Sefer Sıklığı (Headway)

Minimum tren sıklığı veya headway, birbirini takip eden iki tren arasındaki en kısa zaman aralığıdır. Yani, bir trenin belirli bir noktadan geçmesiyle bir sonraki trenin aynı noktadan geçişi arasındaki süredir. Bu süre, demiryolu trafiğinin düzenlenmesi ve trenlerin güvenli bir şekilde hareket etmesi için önemlidir.

Sabit bloklu bir hatta minimum sefer sıklığı hesabında blok sinyalleri arasında geçen seyahat süresine, sinyal izleme süreleri, sinyallerin yeşile dönme süreleri, serbest bırakma süreleri, ray devrelerinin temizlenme süreleri dahil edilmektedir. Durmadan ilerleyen bir araç için sefer sıklığı (Headway) şematiği Şekil 7.13'te gösterilmiştir.

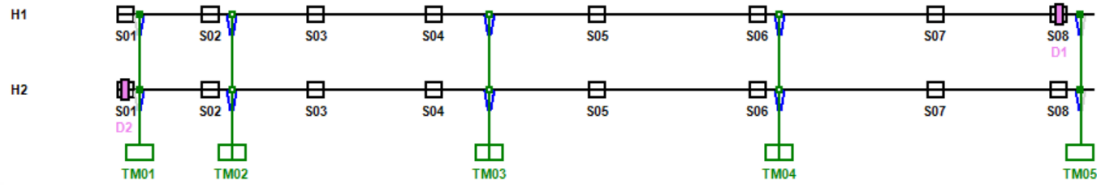


Şekil 7.13: Durmadan ilerleyen bir araç için sefer sıklığı (headway) şematiği [49].

Simülasyonda sefer sıklığı normal işletme için 90 s, bir trafonun devre dışı kaldığı durumlar için 120 s olarak alınmıştır. Mevcut işletme senaryosu 180 s olarak kabul edilmiştir.

8. SİMULASYON SONUÇLARI

Simülasyon çalışmaları Yenikapı Otogar güzergahı arasında yapılmıştır. Güzergâh ile ilgili şematik Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1: Yenikapı- Otogar hattı genel görünümü.

S01: Yenikapı, S02: Aksaray, S03: Emniyet, S04: Ulubatlı, S05: Bayrampaşa, S06: Sağmalcılar, S07: Kocatepe, S08: Otogar istasyonlarıdır.

Yenikapı -Otogar bölgesinde bulunan trafo merkezleri TM01, TM02... kodları ile tablolarda gösterilmiştir. Simülasyon çalışmalarında ilave trafo merkezleri T01, T02 ve T03 kodları ile gösterilmiştir. Trafo Merkezlerine ait konum bilgileri Çizelge 8.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 8.1 : Trafo Merkezi.

Trafo Merkezi Kodu, Adı	Konum (m)
TM01, Yenikapı	185
TM02, Aksaray	1010
T01, Yeni trafo merkezi 1	2158
TM03, Ulubatlı	3300
T02, Yeni trafo merkezi 2	4598
TM04, Sağmalcılar	5850
T03, Yeni trafo merkezi 3	7350
TM05, Otogar	8550

Hattın uç noktalarındaki TM'lerde 1 trafo + doğrultucu grubu ve 2 adet hat çıkış fider kesicisi bulunmaktadır. Diğer TM'lerde 2 trafo + doğrultucu grubu ve 4 adet hat çıkış fider kesicisi bulunmaktadır. Normal işletme durumu 90 s sefer sıklığına ve tek trafo

merkezinin (trafo + doğrultucu setlerinin ve tüm hat çıkış fider kesicileri) devre dışı kalma durumu ise 120 s sefer sıklığına süresine göre analiz edilmiştir.

Normal katener sistemi km direnci 44,4 miliOhm olarak alınmıştır. Proje kapsamında kullanılan S49 tek hat normal ray direnci km 20,5 miliOhm olarak alınmıştır. İki hatta ait 4 ray 250 m'de bir paralelleme olduğu katener hattında paralelleme bulunmadığı kabul edilmiştir.

Simülasyonda kullanılan araç tipleri sembolik olarak adlandırılmıştır. A treni 5'li dizi, B treni 5'li dizi ve C treni 4'lü dizi kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan araçlardan birisi mevcut hatta 4'lü dizi olarak 180 s sefer sıklığı ile işletilmektedir. Her bir parametre ve eğri tek bir araç için verilmiştir. Trenlerin yardımcı güç sistemi sürekli %50'si yüklenecek şekilde hesaba katılmıştır.

Tüm trenlerde 70 kg ağırlığında 1250 yolcu bulunduğu kabul edilmiştir. B ve C trenlerinin gerilime bağlı cer akımı sınırlama eğrisinin, EN 50388 standardına uygun olduğu kabul edilmiştir [48]. A trenlerinde gerilime bağlı akım sınırlamasından farklı olarak gerilime bağlı cer kuvveti sınırlaması bulunmaktadır.

Simülasyon sonuçları üç farklı grup simülasyonları şeklinde aşağıda verilmiştir birinci grup simülasyonlar 5 adet trafo merkezli mevcut hatta 90 s sefer sıklığına göre yapılmıştır. İkinci grup simülasyonlar 5 adet trafo merkezli mevcut hatta tek trafo merkezinin devre dışı kalma durumu için 120 s bekleme süresine göre yapılmıştır. Üçüncü grup simülasyonlar ise hatta ilave 3 adet yeni trafo merkezi eklenerek (Şekil 8.2) tek trafo merkezinin devre dışı kalma durumu 120 s bekleme süresine göre tekrar yapılmıştır.

8.1. Mevcut İşletme Simülasyonu

Mevcut işletme durumu 180 s aralıklarla C tipi trenin 4'lü dizi ile yapıldığı kabul edilmiştir. Simülasyonda yardımcı güç tüketimi kullanımı %50 olarak alınmıştır. Bu araca ait cer akımını 600-900 V olduğu bölgede 872 A olarak sınırlandırılmıştır. 600 V gerilimden daha düşük değerlerde maksimum CER akımı değeri azalarak 500 V gerilimde 0 A olmaktadır.

Mevcut işletme durumuna ait trafo yüklenmeleri Çizelge 8.2'de verilmiştir. Trafo yüklenmelerinin normal olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.2 : Normal durum için trafo yüklenmeleri.

Trafo Merkezi	Maksimum Güç [kW]	Maksimum Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
TM01	1994.25	66	1040.71	35	600.30	20
TM02	3618.72	86	1647.13	39	1086.76	26
TM03	3455.28	82	1691.12	40	1103.41	26
TM04	3674.01	87	2127.83	51	1153.40	27
TM05	5103.91	85	2477.30	41	1445.66	24

8.2. Kapasite Artırılması Durumu Simülasyonları

8.2.1. Birinci grup simülasyonlar

5 adet trafo merkezinin tüm trafolarının devrede olduğu durumda sefer sıklığını 90 s yaparak hattın kapasitesi artırılmasının sonuçları değerlendirilmiştir.

Çizelge 8.3'te verilen trafo yüklenmelerinin EN 50329'da belirtilen sınır değerlerde olduğu görülmüştür.

Çizelge 8.3 : Trafo yüklenmeleri.

Trafo Merkezi	Maksimum Güç [kW]	Maksimum Güç [%]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 dk) [%]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maksimum RMS Gücü (1 saat) [%]
TM01	3699	176	1805	86	1412	67
TM02	8053	192	4456	106	3532	84
TM03	7976	190	5153	123	4268	102
TM04	8372	199	5471	130	4643	111
TM05	4681	223	2973	142	2393	114

Çizelge 8.7'te verilen A trenleri ile minimum tren gerilim değerinde bir sıkıntı görünmemektedir. Ancak diğer iki tren ile sınır değere çok yaklaşılmaktadır. Senaryo sonuçlarına göre ray gerilimi EN 50122-1 standardına göre istenen aralıktadır.

Çizelge 8.4 : Normal durum simülasyon sonuçları.

Araç	Enerji Talebi [kWh]	Maksimum Güç [kW]	Maksimum RMS Güç [kW]	Minimum Tren Gerilimi [V]	Maksimum Ray Gerilimi [V]	Minimum Ray Gerilimi [V]
A Treni 5'li dizi	9396	15268	9523	626	42	-44
B Treni 5'li dizi	13701	26857	14411	508	77	-47
C Treni 4'lü dizi	12943	26385	13554	503	70	-48

8.2.2. İkinci grup simülasyonlar

Beş adet trafo merkezli işletme durumunda, bir adet trafo merkezinin devre dışı olduğu durum sefer sıklığı 120 s kabul edilerek analizler yapılmıştır.

Çizelge 8.5'te verilen trafo yüklenmeleri incelendiğinde yüklenme değerlerinin çok yüksek olduğu ve bazı senaryolarda tanımlı sınır değerlerin aşıldığı görülmektedir.

Çizelge 8.5 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri.

Araç	Trafo Merkezi	Maks. Güç [kW]	Maks. Güç [%]	Maks. RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maks. RMS Gücü (1 dk) [%]	Maks. RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maks. RMS Gücü (1 saat) [%]
A Treni (5'li dizi)	TM01	4862	232	2971	141	2193	104
	TM02	5833	139	3747	89	2804	67
	TM03	7424	177	5813	138	4132	98
	TM04	8339	199	6751	161	4700	112
	TM05	5058	241	3714	177	2759	131
B Treni (5'li dizi)	TM01	7202	343	4547	217	3262	155
	TM02	8847	211	5626	134	4032	96
	TM03	12182	290	7816	186	5544	132
	TM04	11240	268	8111	193	4385	104
	TM05	6738	321	5004	238	3466	165
C Treni (4'lü dizi)	TM01	7367	351	4090	195	2926	139
	TM02	7827	186	4976	118	3551	85
	TM03	11912	284	7779	185	5478	130
	TM04	10208	243	5316	127	3258	78
	TM05	7323	349	4243	202	3161	151

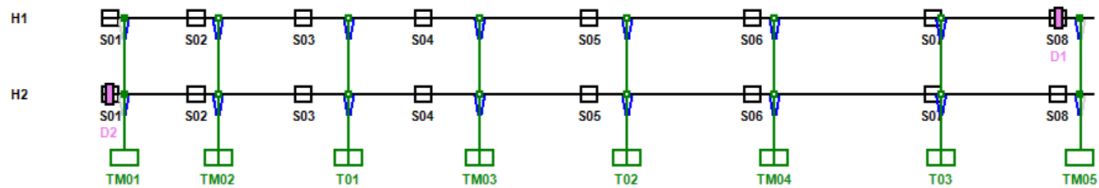
Çizelge 8.6’da verilen ray gerilimi değerleri EN50122-1 standardında istenen aralıktadır. Ancak minimum tren gerilimi değerlerinin her üç araçta da 500 V gerilim seviyesinin altına düştüğü ve mevcut trafo merkezlerinin yeterli olmadığı görülmektedir.

Çizelge 8.6 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları.

Araç	Devre Dışı Trafo Merkezleri	Enerji Talebi [kWh]	Maks. Güç [kW]	Maks. RMS Güç [kW]	Min. Tren Gerilimi [V]	Maks. Ray Gerilimi [V]	Min. Ray Gerilimi [V]
A Treni (5’li dizi)	TM01	7766	19543	9792	600	39	-32
	TM02	8112	19770	10464	603	47	-33
	TM03	8277	16748	9105	509	53	-63
	TM04	7849	15430	8376	504	59	-58
	TM05	8548	20446	11184	491	77	-54
B Treni (5’li dizi)	TM01	10866	28193	13346	519	58	-43
	TM02	11877	30460	15478	453	71	-50
	TM03	5743	25514	12706	385	79	-70
	TM04	9314	24091	11314	394	85	-77
	TM05	2979	23292	11637	300	86	-50
C Treni (4’lü dizi)	TM01	9557	19052	10455	518	56	-45
	TM02	10073	25260	12103	450	78	-54
	TM03	94	12293	1633	456	49	-38
	TM04	9398	20100	10216	382	85	-79
	TM05	707	20582	5587	414	72	-50

8.2.3. Üçüncü grup simülasyonlar

2. Grup simülasyonlarda sağlanamayan koşulları iyileştirmek amacıyla 3 adet trafo merkezi (T01, T02, T03) ilave edilmiştir. Yeni durum yerleşimi Şekil 8.2’de verilmiştir.



Şekil 8.2: Yenikapı Otogar ilave 3 trafo merkezi genel şematik görünümü.

İlave trafo merkezleri konuları birbirine uzak olan trafoların orta noktalarına gelecek şekilde belirlenmiştir. 8 trafo merkezli yeni duruma ait tek trafo merkezinin devre dışı kalma senaryoları 120 s sefer sıklığı ile tekrar yapılmıştır.

Her bir araca ait trafo yüklenmeleri Çizelge 8.7’de verilmiştir. İlave 3 adet trafo merkezinin eklenmesi ile tek trafo devre dışı kalma durumundaki trafo yüklenmelerinin EN50329 standardına göre uygun hale geldiği görülmektedir.

Çizelge 8.7 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda trafo yüklenmeleri.

Araç	Trafo Merkezi	Maks. Güç [kW]	Maks. Güç [%]	Maks RMS Gücü (1 dk) [kW]	Maks RMS Gücü (1 min) [%]	Maks RMS Gücü (1 saat) [kW]	Maks RMS Gücü (1 saat) [%]
A Treni (5’li dizi)	TM01	3579	170	2294	109	1744	83
	TM02	4825	115	3018	72	2305	55
	TM03	3722	89	2212	53	1620	39
	TM04	5522	131	4000	95	2687	64
	TM05	4452	212	2845	135	2015	96
	T01	3087	73	2096	50	1556	37
	T02	3892	93	2673	64	1728	41
	T03	3039	72	2029	48	1406	33
B Treni (5’li dizi)	TM01	6105	291	3369	160	2409	115
	TM02	7266	173	4434	106	3178	76
	TM03	5069	121	3446	82	2533	60
	TM04	7433	177	4046	96	3310	79
	TM05	4822	230	2901	138	2306	110
	T01	5586	133	3525	84	2523	60
	T02	5551	132	3539	84	2612	62
	T03	3643	87	2068	49	1805	43
C Treni (4’lü dizi)	TM01	5690	271	3071	146	2197	105
	TM02	6881	164	3917	93	2812	67
	TM03	4986	119	3311	79	2453	58
	TM04	5599	133	2978	71	2399	57
	TM05	4333	206	2317	110	1831	87
	T01	5871	140	3487	83	2483	59
	T02	4503	107	2583	62	2046	49
	T03	4991	119	3230	77	2570	61

Üçüncü grup simülasyon sonuçlarına göre trafo yüklenmeleri, minimum tren gerilimi, ray toprak arası gerilimin standartlarda istenen aralıklara geldiği görülmüştür.

Çizelge 8.8’de verilen bilgilere göre ray gerilimi değerleri 120V’un aşağısında olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.8 : Bir adet trafonun devre dışı kalması durumunda simülasyon sonuçları.

Araç	Devre Dışı Trafo Merk.	Enerji Talebi [kWh]	Maks. Güç [kW]	Maks. RMS Güç [kW]	Min. Tren Gerilimi [V]	Maks. Ray Gerilimi [V]	Min. Ray Gerilimi [V]
A Treni (5’li dizi)	TM01	7491	19750	9730	617	80	-62
	TM02	7548	18753	9796	631	79	-65
	T01	7477	19384	9689	635	85	-58
	TM03	7505	19431	9682	636	81	-60
	T02	7601	19292	9781	631	81	-57
	TM04	7251	18386	8689	565	100	-87
	T03	7263	19087	9282	610	44	-40
B Treni (5’li dizi)	TM05	6950	17235	8262	527	120	-77
	TM01	9529	26641	11902	520	69	-72
	TM02	9654	27546	12098	527	74	-81
	T01	9568	26796	11898	576	70	-60
	TM03	9646	26698	11905	580	65	-65
	T02	9738	27150	12064	528	58	-56
	TM04	10122	24665	11833	497	120	-120
C Treni (4’lü dizi)	T03	9659	26396	11897	523	48	-54
	TM05	9520	24587	11041	491	114	-92
	TM01	8340	16607	9146	519	72	-59
	TM02	8516	16554	9418	515	97	-59
	T01	8442	15936	9237	532	64	-61
	TM03	8490	16064	9233	559	64	-66
	T02	8563	16393	9331	526	65	-44
	TM04	8687	17997	9415	522	87	-81
	T03	8589	16627	9294	519	53	-60
	TM05	8368	18809	8923	512	120	-78

Mevcut istasyon yapısı içinde ilave trafo merkezlerinin yapılması için fiziki koşullar uygun değildir. Bu nedenle güzergâh üzerinde üç adet trafo merkezinin yerinin kamulaştırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Simülasyon çalışmaları trafo yerleri birbirine uzak cer trafolarının orta noktaları olarak kabul edilmiştir.



9. SONUÇ

Trafik sorununun çözümünde en etkili yöntemlerden bir tanesi raylı sistemlerdir. Artan nüfus yoğunluğu kent merkezlerinde yeni hatların yapılmasına ve mevcut hatların kapasitesinin artırılmasını gerektirmektedir. Mevcut hatların kapasitesinin artırılması yüksek yolcu kapasiteli araçların alınması, tren dizilerinin artırılması ve daha sık tren seferlerinin yapılması ile mümkündür. Mevcut cer sisteminin kapasite artışı karşılayıp karşılamayacağını belirlenmesi için simülasyon çalışmalarının yapılmasına ihtiyaç vardır. Bu simülasyon çalışmalarında özellikle yeni araçlar alınması durumunda en enerji efektif aracın seçimi de değerlendirilebilir.

Bu tez kapsamında işletilmekte olan M1A Yeni kapı Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı Kirazlı hattının bir bölümünde üç farklı tip araç ile simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu simülasyon çalışmaları İTÜ Teknokent'te yerleşik HI-SIM Teknoloji Mühendislik firması tarafından geliştirilmiş Hi-SimuX ve SimuX programı ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre maksimum ray gerilimi, minimum tren gerilimi ve trafo yüklenmelerinin standartlara uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Yapılan simülasyonlar üç grupta toplanmıştır. Birinci grup senaryolarda beş adet trafo merkezinin hepsinin devrede olduğu, 90 s sefer sıklığına göre simülasyon çalışmaları yapılmıştır, ikinci grup senaryolarda cer trafo merkezlerinin sırayla devre dışı olduğu durum 120 s sefer sıklığı ile simüle edilmiştir. Üçüncü grup simülasyonlarda ise ilave üç adet trafo merkezi eklenerek simülasyonlar tekrarlanmıştır.

İlk grup simülasyonlarda 90 s sefer sıklığı ile yapılan analizlerde Sağmalcılar ve Otogar trafo merkezlerinin daha fazla yüklendikleri ancak EN 50329 standardında belirtilen sınır değerlerinin altına kaldığı görülmüştür. Trafo merkezi arıza durumları 120 s sefer sıklığına göre simüle edildiğinde her üç araçta da gerilim düşümünün 500 Voltun altına düştüğü ve mevcut cer trafo merkezleri ile hattın işletilemeyeceği görülmektedir. Üç adet trafo merkezinin ilave edilmesi işletme koşullarının ancak sağlanabildiği üçüncü grup simülasyonlarda görülmüştür.

Üçüncü grup simülasyon sonuçlarına göre ilave trafo merkezlerinin yapılabilmesi için ilave kamulaştırma yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. İstanbul gibi büyük şehirlerde

kamulaştırma hem maliyetli hem de süreç olarak uzundur. Özellikle büyük şehirlerde metro planlaması yapılırken istasyonlar arasındaki mesafenin gelecekteki kapasite artışını da düşünülerek iyi planlanması gerekmektedir.

Sefer sıklığı değerlendirmeleri yapılırken trafoların maksimum yüklenmelerinin uç istasyonlarda daha fazla olduğu görülmüştür. Bu uç istasyonlarda mevcut trafoların çalışma sınıfının VI olması sebebiyle trafo yüklenmelerinin standartta istenen aralıkta kaldığı gözlemlenmiştir. Trafo seçimlerinde çalışma sınıflarının, mutlaka simülasyon sonuçlarına göre seçilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda mevcut hatta tek trafo arızası simülasyonlarında ilave trafo merkezi yapılması ihtiyacı olduğu görülmüştür.

Her bir araca ait km başına enerji tüketimleri Çizelge 9.1 de verilmiştir. Araçların hem çekiş gücü hem de rejeneratif frenleme eğrilerinin iyi analiz edilmesi gerekliliği görülmüştür. Örneğin B treni daha fazla çekiş gücüne sahip olmasına rağmen rejeneratif frenlemesi daha iyi olduğu için km başına enerji ihtiyacı C trenine göre daha düşük çıkmıştır. Yatırım aşamasında doğru bir analiz ile araç seçimi yapıldığında, %50 oranında enerji tasarrufu yapılabileceği görülmektedir.

Metro sistemlerinde, enerji tasarrufu üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Eko sürüş teknikleri [50], hat güzergâh eğimlerinin azaltılması [18,51], rejeneratif frenleme depolama sistemlerinin kurulması bunlardan birkaçıdır. Kapasite artırımına yönelik yeni araç alımlarında, cer simülasyon analiz sonuçlarının da dikkate alınması gerektiği görülmektedir.

Çizelge 9.1 : Kilometre başına her bir araca ait enerji tüketimleri.

Senaryolar	A Treni (5'li dizi)	B Treni (5'li dizi)	C Treni (4'lü dizi)
TM01	2,62	3,31	3,62
TM02	2,64	3,36	3,69
T01	2,62	3,33	3,66
TM03	2,63	3,36	3,68
T02	2,66	3,39	3,71
TM04	2,54	3,52	3,77
T03	2,54	3,36	3,72
TM05	2,43	3,32	3,63

Mevcut hat ve entegre hatta ait orta gerilim işletme senaryoları incelendiğinde Kirazlı cer merkezinden entegre hatta ring bağlantısı olduğu görülmektedir. Ancak her iki hatta ait senaryolar incelendiğinde her iki hattın iki farklı bir hat gibi orta gerilim işletme senaryolarının yapıldığı görülmektedir. Entegre hatlar ile birlikte orta gerilim senaryolarının da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Kirazlı Halkalı metro hattının Ataköy İkitelli hattı, Halkalı depo sahasında Marmaray hattı ile yapımı devam eden Halkalı Havalimanı projesi ile de entegredir ancak bu hatlarla orta gerilim arayüzü bulunmamaktadır. Her bir proje için indirici merkezden ayrı ayrı besleme getirilmektedir. Yapımı devam eden bu tarz projelerin özellikle indirici merkezlerden getirilen enerjinin ortak olarak planlanması enerji yönetimi olarak daha ekonomik olacaktır. Ayrıca metroların enerji kurumlarından talep ettiği güçler çok fazla olduğundan ortak bir talep yapılması durumunda enerjinin dağıtım şirketi açısından yönetimi de daha kolay olacaktır.

Orta gerilim ve cer sistemi SCADA sistemi üzerinden izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Mevcut hatta ait SCADA sistemi incelendiğinde entegre hatta ait trafo merkezlerinin mevcut SCADA sistemine eklenmesi için ilave lisans alınması ihtiyacı olduğu görülmüştür. Mevcut kumanda merkezinde ilave iş istasyonu ve ekranlar için yer sıkıntı olduğu görülmüştür. Eski hatlarda bulunan kumanda merkezlerinin yeni hat entegrasyonları için yeterli olmamaktadır. Kumanda merkezi tasarımlarında hatların büyümesinin de dikkate alınması gerekmektedir. Kumanda merkezinin devre dışı kalma durumu için yedek bir kumanda merkezinin de yeni hatlar ile birlikte planlanması gerekmektedir. Ekte bulunan Şekil 0.4'te Esenler kumanda merkezinin genişletilmesi için örnek bir yerleşim projesi örneği paylaşılmıştır.

Bir sonraki çalışmada komşu olan ve komşu olmayan iki trafo devre dışı analizleri, değişken yük profili analizleri yapılabilir. Rejeneratif frenleme enerjisinden daha fazla yararlanabilmesi amacıyla SMES gibi depolama sistemlerinin güzergâh boyunca kurulmasının enerji tasarrufu üzerine etkileri modellenenebilir. Mevcut hattın enerji seviyesi 750 V DC olduğu için yeni hatta 750 V DC olarak projelendirilmiş ihtiyaçlar buna göre belirlenmiştir. 750 V DC olarak işletilen mevcut bir hattın kapasite artışı hattın 1500 V DC gerilim seviyesine değiştirilmesi durumunda ortaya çıkabilecek ihtiyaçları belirlenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Gökaşan, M.** (2021). *Raylı sistemler mühendisliği: demiryolu araçları*, Ders Notları.
- [2] **Cihangir, U.** (2013). *Çok istasyonlu ve çoklu tren setli bir metro hattının matematiksel modellemesi ve işletim senaryolarının karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Abbasgil, E.** (1994). *İstanbul'daki toplu taşımacılık kapsamında raylı sistemlerin değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Url-1**<<https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/on-track.html>>, erişim tarihi 26.11.2020
- [5] **İBB Ulaşım Yönetim Merkezi.** <https://uym.ibb.gov.tr>
- [6] **Frey, S.** (2012). *Railway Electrification Systems & Engineering*. Delhi, IN.: White Word Publications.
- [7] **Simiyu, P. Ve Davidson, I.** (2021). MVDC railway traction power systems; state-of-the art, opportunities, and challenges. *Energies*, 14 (4156), (1-27). Retrieved from <https://www.mdpi.com/journal/energies>
- [8] **EN 50163:2004/A3, 2022.** Railway Applications - Supply Voltages of Traction Systems.
- [9] **IEC 60850, 2014** Railway Applications - Supply Voltages of Traction Systems.
- [10] **Özmen, İ.** (2014). *750VDC cer gücü tedarik sisteminin bilgisayar destekli modellemesi, benzetimi* (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Alkaşı S. Ve Açıkbaş, S.** (2006). Şehiriçi raylı ulaşım da gerilim seviyeleri ve enerji iletim sistemleri. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu*.
- [12] **TS EN 50367:2020** Demiryolu Uygulamaları - Sabit Tesisler ve Demiryolu Araçları- Pantograflar ve Havai Temas Hattı Arasında Teknik Uyumluluğa Ulaşmak İçin Kriterler.
- [13] **Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. ve Scheider, E.** (2009). *Contact Lines for Electrci Railways: Planning, Design, Implementation and Maintenance*. Berlin, DE.: Publicis Corporate Publishing.
- [14] **Açıkbaş, S.** (2008). *Çok hatlı çok araçlı raylı sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik sürüş kontrolü* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Yeşiloğlu, S. M.** (2000). *Ankara-İstanbul demiryolu hattı 2. Etap hızlı tren projesi katener tesisleri eğitimi*, Eskişehir.

- [16] **Swanson, J. D.** (2003). Light rail without wires. *Transportation Research Circular E-C058: 9th National Light Rail Transit Conference*, 729-744.
- [17] **Aydın, T.** (2012). *Hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Url-2**<<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/iec-assemblies-mv-switchgear/ulusoy-oil-immersed-type-transformer/eaton-ulusoy-dry-transformer-catalog-tr-tr.pdf>>, erişim tarihi 30.11.2020
- [19] Kirazlı Halkalı Projesi Ekipman Güçleri
- [20] **Garcia, A.** (2023). *Traction Transformer Configuration Technical Note*.
- [21] **Ateş, E.** (2018). *Haberleşme tabanlı tren kontrol sistemleri için emniyetli fren mesafesi hesabı* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Çetin, Y.** (2008). *Demiryollarında ATC ve ATO sistemleri* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **28016334.2023.200-07/E.01564 Sayılı Metro İstanbul Yazısı. (2023)**
- [24] **Şenlik, İ.** (2016). Kent içi raylı ulaşım sistemleri. *Elektrik Mühendisliği*, 458, 37-39.
- [25] **Keskin, İ.** (2013). *Raylı sistemlerde yol tasarımının enerji tüketimine olan etkilerinin belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **İUAŞ,** (2015). Hatların yıllara göre yolcu sayıları. İstanbul Ulaşım A.Ş. İstanbul.
- [27] **Baohua M., Rong, H. ve Shunping J.** (2010). Potential applications of maglev railway technology in China, *Railway Technical Research Institute Overview of Maglev R&D*, 8 (1). 29-39. Retrieved from <http://www.rtri.or.jp/index.html>
- [28] **Söylemez, M. T.** (2021). *Raylı Sistemler Mühendisliği*, Ders notları.
- [29] **Davis, W. J.** (1926). *The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars*. Schenectady: General Electric.
- [30] **Yıldız, A. ve Keskin, K.** (2023). Elektrik tahrikli bir tren hareketinin benzetim ortamında modellenmesi ve modelin gerçek bir hat üzerinde doğrulanması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6 (1), 62-74.
- [31] **Akçay, M. T.** (2021). Metro hatlarındaki ray gerilimini en 5012 standardına uygun olarak sınırlandırılmada kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması. *Akçay/Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 1 (1), 74-93. doi:10.34186/klujes.865974.
- [32] **Niasati M. ve Gholami, M.** (2008). Overview of stray current control in DC railway systems. *Institute for Energy Efficiency*, 1-6. doi:10.1049/ic:20080043 <https://www.researchgate.net/publication/224364211>.

- [33] **Aylott, P.** (1999). Stray current is for life-not just for Christmas. Stray current corrosion management strategies for DC traction systems. *Institute for Energy Efficiency Seminar*, 7 1-6. doi: 10.1049/ic:19990910.
- [34] **Aatif S., Hu. H., Rafique, F. ve He, Z.** (2021). Analysis of rail potential and stray current in MVDC railway electrification system. *Railway Engineering Science*, 1, 394-407. doi:10.1007/s40534-021-00243-0.
- [35] **Tian, Z.** (2017). *System energy optimisation strategies for dc railway traction power networks* (Doktoral Thesis). Birmingham University, Birmingham, United Kingdom.
- [36] **Albrecht, T.** (2004). Computers in Railways IX, J. Allan, C. A. Brebbia, R. J. Hill, G. Sciutto & S. Sone (Eds.), *Reducing Power Peaks And Energy Consumption In Rail Transit Systems By Simultaneous Train Running Time Control*, (pp.885-894). www.witpress.com, ISBN:1-85312-715-9. Retrieved from [Reducing Power Peaks And Energy Consumption In Rail Transit Systems By Simultaneous Train Running Time Control \(witpress.com\)](http://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CR04/CR04095FU.pdf)
- [37] **Jong, J. Ve Chang, E.** (2005). Models for estimating energy consumption of electric trains. *Journal of Society of Transportation Studies*, 6, 278-291.
- [38] **Alfred Rufer, P. B. D. H.** (2004). Power-electronic interface for a supercapacitor-based energy-storage substation in dc-transportation networks. *EPE Journal*, 14 (4), 43-49.
- [39] **Özdemir, Y.** (2015). *Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde frenleme enerjisinin geri kazanım yöntemleri ve Kadıköy-Kartal Metro Hattı üzerinden incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] **Baran, S.** (2009). *Şehir içi raylı sistem işletiminde rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [41] **Yavuz, B.** (2011). *Enerji depolama sistemlerinin modellenmesi ve analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] **Arslan, M. A.** (2016). *Modern enerji depolama sistemleri ve kullanım alanları*, Retrieved from [Modern Enerji depolama sistemleri ve kullanım alanları \(ankara.edu.tr\)](http://ankara.edu.tr)
- [43] **Söylemez, M. T. ve Açıkbaş, S.** (2018). Computers in Railways IX, J. Allan, C. A. Brebbia, R. J. Hill, G. Sciutto & S. Sone (Eds.), *Energy Loss Comparison Between 750 VDC And 1500 VDC Power Supply Systems Using Rail Power Simulation*, (pp.951-960). www.witpress.com, ISBN 1-85312-715-9. Retrieved from <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CR04/CR04095FU.pdf>
- [44] **Karakuş, F.** (2017). Raylı sistemlerde orta gerilim elektrifikasyon sisteminin modellenmesi ve besleme senaryolarının belirlenmesi. *EMO Bilimsel Dergi*, 8 (1), 41-48.
- [45] **Söylemez, M. T. ve Açıkbaş, S.** (2022). M1A (yenikapı- havalimanı), M1B M1A (yenikapı- havalimanı), M1B hatları cer gücü simülasyonu veri kontrol dosyası. İstanbul.

- [46] **EN 50122-1:2022** Railway Applications. Fixed Installations, Electrical Safety, Earthing and the Return Circuit - Part 1: Protective Provisions Against Electric Shock.
- [47] **EN 50329:2003** Railway Applications. Fixed Installations, Traction Transformers.
- [48] **BS EN 50388:2012** Railway Applications. Power Supply and Rolling Stock, Technical Criteria for the Coordination Between Power Supply (Substation) and Rolling Stock to Achieve Interoperability.
- [49] **Theeg, G. ve Vlasenko S.** (2020). *Railway Signalling and Interlocking*. 3rd Edition, Leverkusen, DE.: Eurail Press.
- [50] **Boynukalın, S., Açıkbaş, S. ve Söylemez, M. T.** (2021). CBTC sistemlerinde tolere edilebilir seyahat süre artışı için enerji verimliliği stratejilerinin karşılaştırılması, *Demiryolu Mühendisliği*, 14, 154-166. doi: 10.47072/demiryolu.941405.
- [51] **Kara, H.** (2016). *Enerji tüketimi bazlı ahp yöntemi ile raylı sistem güzergah seçimi ve uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

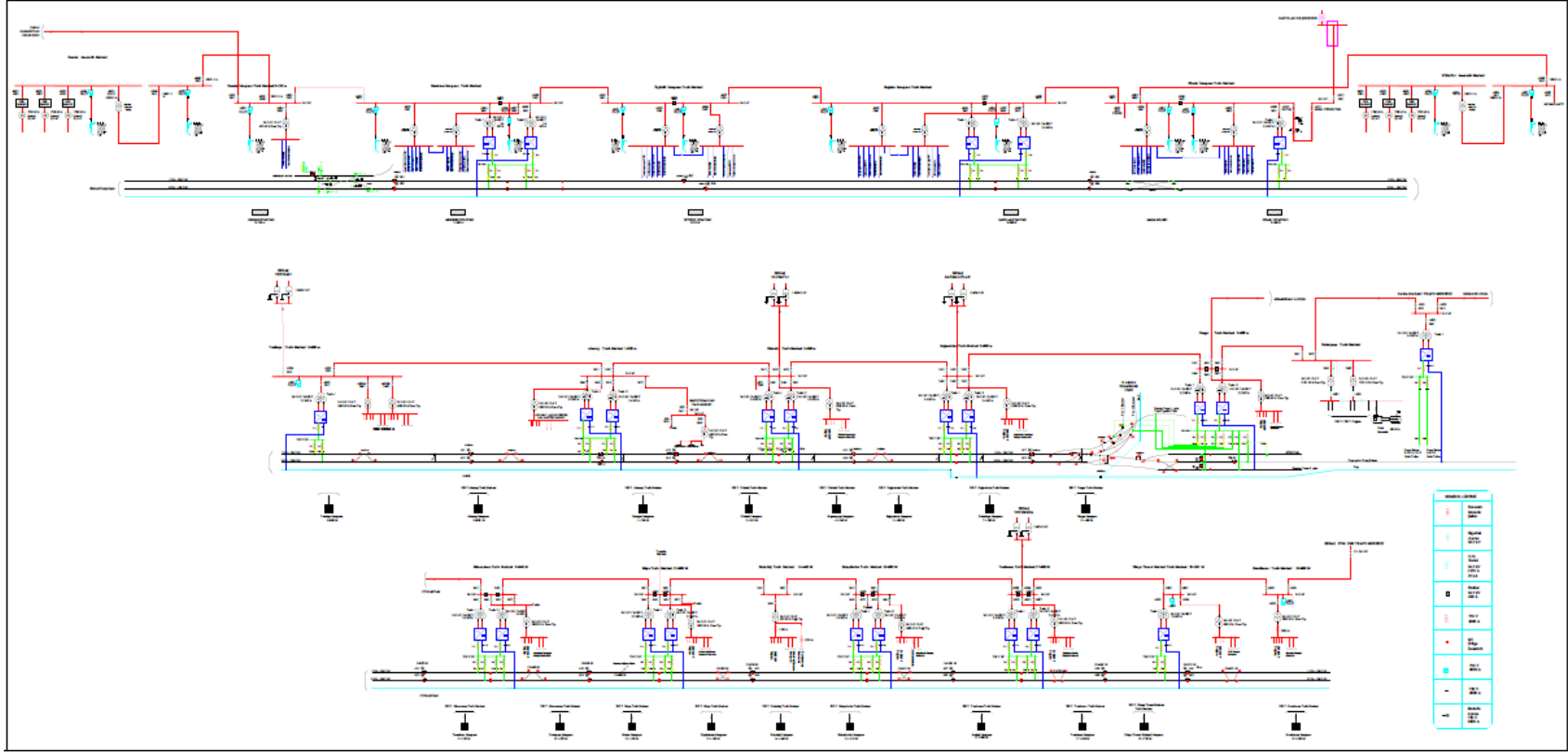
EKLER

EK A: M1A- M1B Tek Hat Şeması

EK B: Kirazlı Halkalı Tek Hat Şeması

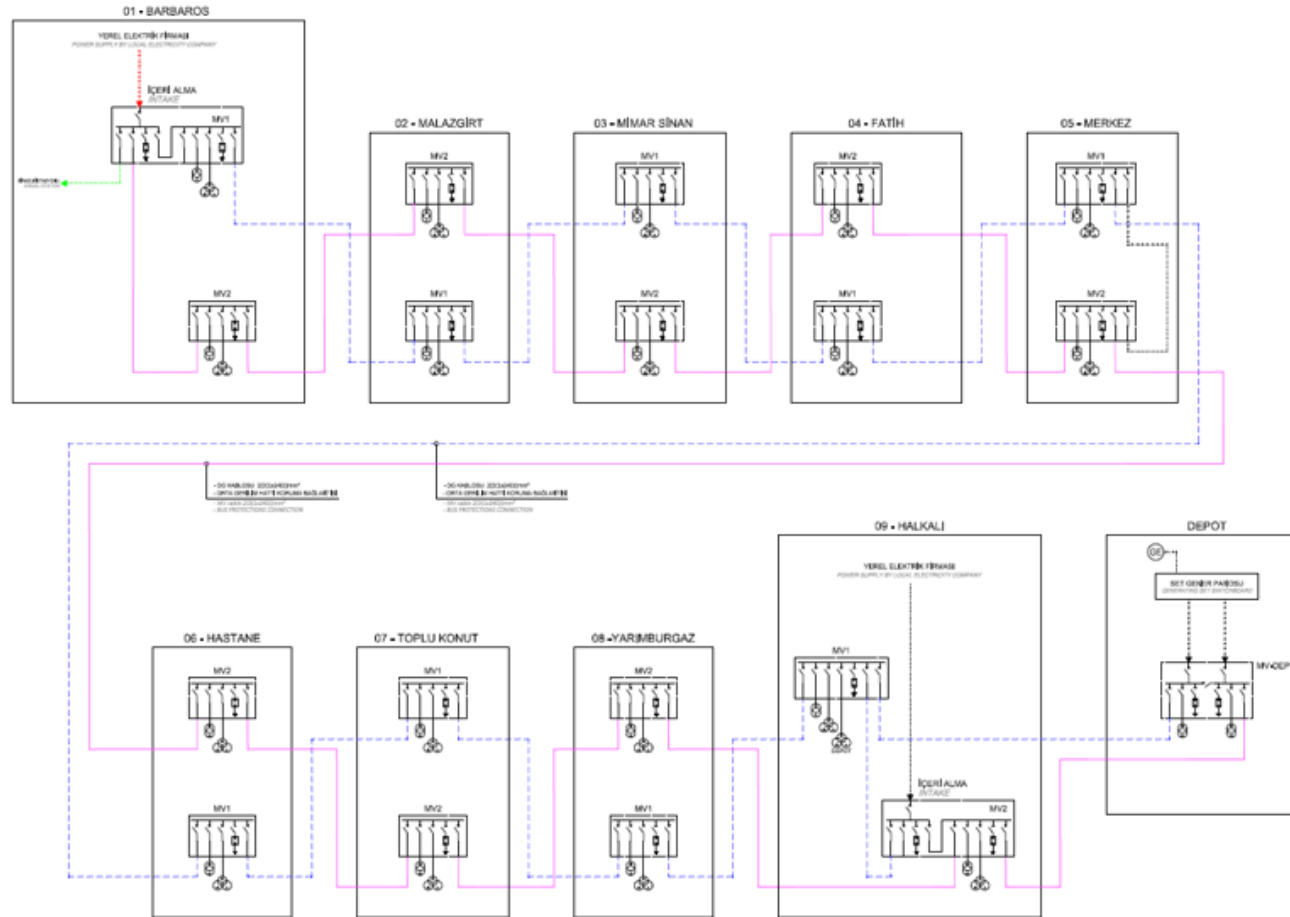
EK C: M1A SCADA Ekranı





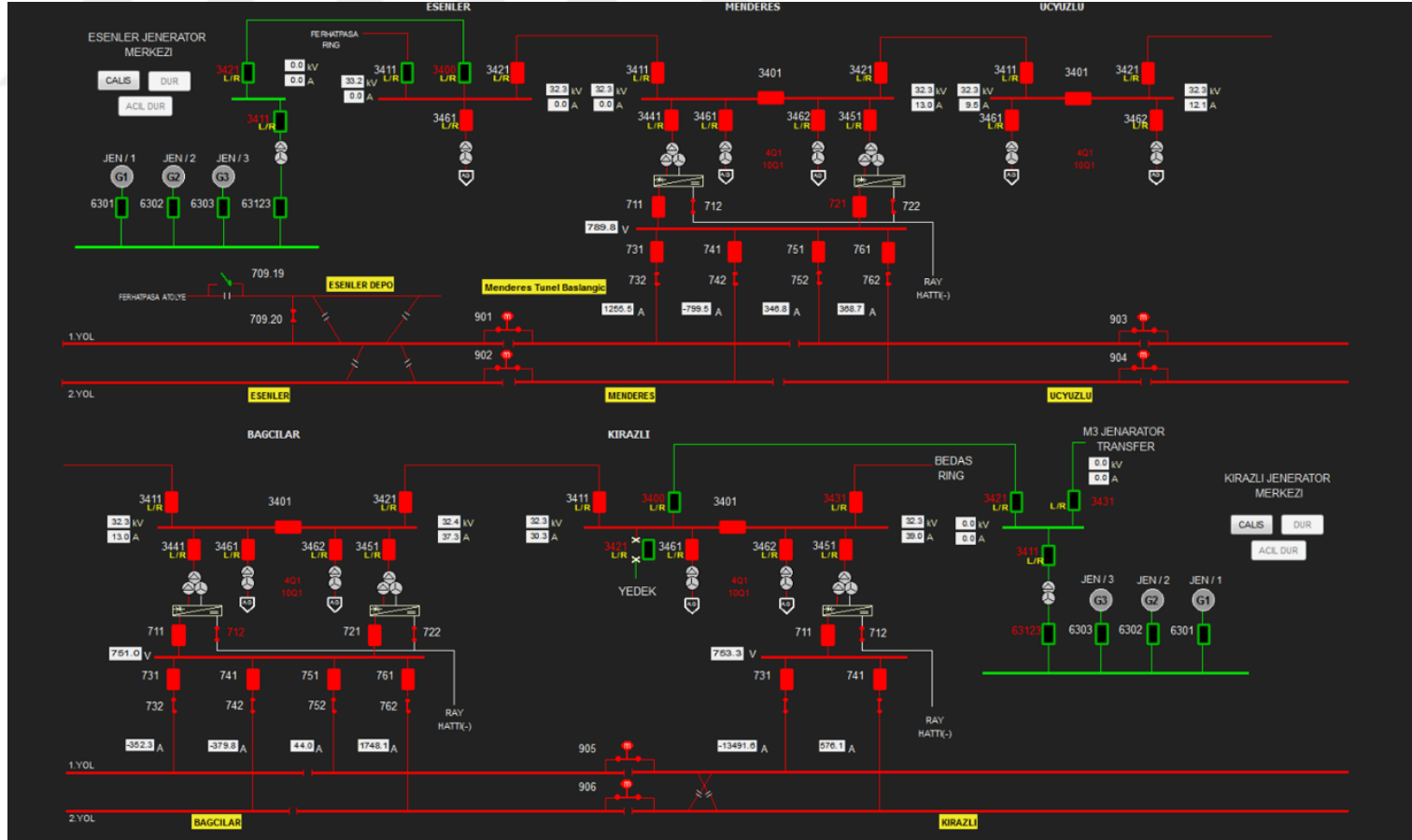
Şekil 0.1: M1A -M1 B tek hat şeması.

EK B



Şekil 0.2: Kirazlı Halkalı Tek Hat Şeması.

EK C



Şekil 0.3: M1A SCADA ekranı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyadı : Zennure YENER

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2001, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Rina Consulting	Raylı Sistem Müdürü	2022-
MIKA	Kirazlı Halkalı Metro Projesi, Proje Müdür Yardımcısı	2017-2022
ICA	3. Boğaz Köprü Projesi Elektromekanik Müdürü	2015-2018
OHL	Gebze Halkalı Tren Hattı Projesi Arayüz Müdürü	2014-2015
AMG	Kadıköy Kartal Metrosu Kontrol ve Haberleşme Sistemleri Şefi	2010-2014

Yayın Listesi

- Yener, Z., Kalenderli, Ö.,** 2023. Bir Metro Hattında Araç Kapasitesinin Artırılmasının Orta Gerilim ve Cer Sistemleri Üzerine Etkileri, *Dergipark Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1296406>