

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MODERN RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN
ELEKTRİFİKASYON STANDARTLARI VE TASARIM
YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ: BİR METRO
HATTININ TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

Büşra ÖLMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU

Haziran, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MODERN RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN
ELEKTRİFİKASYON STANDARTLARI VE TASARIM
YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ: BİR METRO
HATTININ TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ**

Büşra ÖLMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 20.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Şen YILDIZ, Üye
Kırklareli Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Modern Raylı Ulaşım Sistemleri İçin Elektrifikasyon Standartları ve Tasarım Yaklaşımlarının İncelenmesi: Bir Metro Hattının Tekno-Ekonomik Analizi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Büşra ÖLMEZ

İmza



Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanmasında emeği geçen, katkı sağlayan ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli insanlara teŗekkür etmeyi bir borç bilirim.

Öncelikle, tez sürecimin her aşamasında engin bilgi birikimi ve rehberliği ile bana yol gösteren, kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Bedri Kekezoğlu'na en içten teŗekkürlerimi sunarım. Sabırla yönlendirdiği, yapıcı eleŗtirileriyle alıŗmama değer kattığı ve akademik gelişimime olan katkıları benim için son derece kıymetlidir.

Bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan, sabrı, anlayıŗı ve sevgisiyle beni destekleyen sevgili eŗim ve meslektaşım Turan Ölmez'e sonsuz teŗekkür ederim. Varlığın ve desteğin bu yolculuğu benim için daha anlamlı ve katlanabilir kıldı.

Hayatımın en büyük motivasyon kaynağı, sevgili kızım Bilge Ölmez'e ise ayrı bir teŗekkür borçluyum. Gülüşün, varlığın ve koŗulsuz sevgin bu sürecin en güzel yanıydı.

Tüm katkı sağlayanlara en içten Őukranlarımla...

Büşra ÖLMEZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Literatür Taraması.....	2
1.3.1 Enerji Verimliliği ve Optimizasyon Çalışmaları.....	3
1.3.2 Elektrifikasyon Sistemleri, Güç Kalitesi ve Harmonik Analizler...	4
1.3.3 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu, Enerji Depolama ve Akıllı Yönetim.....	6
1.3.4 Tezin Literatüre Katkısı.....	7
2 RAYLI SİSTEM ELEKTRİFİKASYONUNA GİRİŞ	9
2.1 Raylı Sistemlerde Güç Sistemi Özellikleri.....	9
2.1.1 Trafo merkezleri.....	10
2.1.2 Katener Sistemleri.....	13
2.1.3 Üçüncü Raylı Sistem.....	17
2.2 Şehir İçi Raylı Sistemler	18
2.2.1 Metro	19
2.2.2 Hafif raylı tren.....	19
2.2.3 Tramvay	20
2.2.4 Monoray	21
2.2.5 Banliyö treni.....	22
3 METRO ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİNDE KULLANILAN STANDARTLAR VE TASARIM KRİTERLERİ	23

3.1	Metro Elektrifikasyon Sistemlerinde Kullanılan Standartlar	23
3.2	Ülkemizde Kullanılan Metro Elektrifikasyon Tasarım Kriterleri	28
3.3	Trafo Merkezi Tasarım Kriterleri	30
3.4	Doğrultucu Tasarımı Kriterleri	34
3.4.1	Doğrultucu Koruma Sistemi	37
3.5	Katener Hattı Tasarımı	39
3.5.1	Katener Hattı ile İlişkili Manyetik Alanlar	41
3.6	İletken Seçim Kriterleri	41
3.7	Geri Dönüş Akımı Sistemi	43
3.8	DC Elektrifikasyon Sistemlerinde Ray İzolasyonunun Önemi	44
3.8.1	Ray Potansiyelleri ile İlgili Riskler	45
3.9	Metro Hattı Topraklama Sistemleri	46
3.9.1	Metro Hatlarında Yıldırımdan Koruma	47
3.10	Enerji Kalitesi ve Kompanzasyon Sistemi	47
4	MAHMUTBEY – YILDIZ METRO HATTININ ELEKTRİFİKASYON SİSTEMİNİN TASARIMI	49
4.1	M7 Mahmutbey – Yıldız Metro Hattı	49
4.1.1	İstasyon Yapıları	50
4.1.2	İstasyon Yapıları	52
4.1.3	M7 Mahmutbey – Yıldız Metro Hattı Elektrifikasyon Sistemi ...	53
4.1.4	Katener İzolasyon Seviyesi ..	55
4.1.5	Projede Kapsamında Seçilen DC kablolar	57
4.1.6	Transformatör Merkezleri	58
4.1.7	Seçilen Doğrultucu Sistemi	61
4.1.8	M7 Metro Hattında Seçilen Kaçak Akım İzleme Sistemi	63
4.2	M7 Metro Hattı Enerji Sisteminin ETAP Modeli	64
4.2.1	M7 Metro Hattı ETAP Modelinin Teknik Detayları	64
4.2.2	M7 Hattı Elektrifikasyon Sisteminde Kullanılan Kablo Tipleri ...	64
4.2.3	M7 Hattı Cer Transformatörlerinin ETAP Modellemesi	65
4.2.4	M7 Hattı İç İhtiyaç Transformatörlerinin ETAP Modellemesi	67

4.3	M7 Metro Hattı Enerji Sisteminin ETAP Analizi	69
4.3.1	Mevcut İç İhtiyaç Transformatörleri ile Kayıp Analizi	70
4.3.2	İç İhtiyaç Transformatörlerinin 1000 kVA Seçilmesi ile Kayıp Analizi.....	72
4.3.3	İç İhtiyaç Transformatörlerinin 630 kVA Seçilmesi ile Kayıp Analizi.....	75
4.3.4	Tüm Senaryoların Kayıp Analizi.....	84
4.4	Elektrifikasyon Sistemi Ekonomik Analizi.....	84
4.4.1	İşletme Maliyeti Açısından Analiz	85
4.4.2	Kurulum Maliyeti Açısından Analiz.....	86
5	SONUÇ	87
	KAYNAKÇA	89
	A M7 MAHMUTBEY – YILDIZ METRO HATTI ETAP MODELİ	94
	B ETAP ANALİZİ TABLOLARI	102
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	134

KISALTMA LİSTESİ

A	Amper
AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
AG	Alçak Gerilim
BS	British Standart (İngiliz Standardı)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
EN	European Norm (Avrupa Standardı)
ETAP	Electrical Power System Analysis & Operation Software
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnic Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
Km	Kilometre
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt amper
kWh	Kilowatt saat
kW	Kilowatt
LFA	Load Flow Analysis (Yük Akış Analizi)
LRT	Light Rail Transit (Hafif Raylı Ulaşım)
LV	Low Voltage (Alçak Gerilim)
m	metre
MV	Medium Voltage (Orta Gerilim)
MVA	Medium Voltage Amper
OCS	Overhead Catenary System (Havai Katener Sistemi)
OG	Orta Gerilim
Sa	Saat
SI	Section Isolator (Bölüm İzolatörü)
Sn	Saniye
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TM	Trafo Merkezi
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt saat

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Orta gerilim şalt sistemi.....	12
Şekil 2.2 12 darbeli doğrultucu şeması	13
Şekil 2.3 Katener Sistemi çeşitleri ve tanımları.....	14
Şekil 2.4 M7 Mahmutbey – Yıldız katener hattındaki dezeksman örneği	14
Şekil 2.5 Havai rijit katener profili	16
Şekil 2.6 Havai katener hattının detay parçaları	17
Şekil 2.7 Bir metro hattında kullanılan 3. Ray ve taşıyıcı raylar.....	18
Şekil 2.8 Üsküdar-Yamanevler metro hattı Çarşı istasyonu	19
Şekil 2.9 M1 Yenikapı-Kirazlı metro hattı Yenikapı istasyonu	20
Şekil 2.10 Bağcılar – Kabataş tramvayı	21
Şekil 2.11 Las Vegas'daki monoray sistemi	22
Şekil 2.12 Halkalı – Gebze banliyö treni	22
Şekil 3.1 Ülkemizde kullanılan standartların sistemler bazında gruplandırılması	25
Şekil 3.2 Ray gerilim seviyesinin tren konumuna göre değişimi	33
Şekil 3.3 12 pulse doğrultucu devresi	34
Şekil 3.4 Dd0Dy11 cer trafosunun sekonder çıkış sinyali	36
Şekil 3.5 12 pulse doğrultulmuş sinyal ve devre şematığı	36
Şekil 3.6 Aşırı gerilimde delinen doğrultucu ünite diyotları.....	38
Şekil 3.7 Katener tasarım programı Sicat ekran görüntüsü.....	39
Şekil 3.8 İletkenlerin ve ray altı donatının gösterildiği tünel kesiti.....	41
Şekil 3.9 Tavaya döşenmiş DC kablolar	42
Şekil 3.10 Ray izolasyon komponentleri.....	44
Şekil 3.11 Diyotlu topraklama sisteminde ray potansiyeli.....	46
Şekil 3.12 Kompanzasyon sistemi	48
Şekil 4.1 M7 hattı istasyon şeması.....	51
Şekil 4.2 M7 hattı kısmi OG tek hat şeması.....	51
Şekil 4.3 Raylı sistem elektrifikasyonu	53
Şekil 4.4 M7 hattı orta gerilim elektrifikasyonunun diyagramı	53
Şekil 4.5 M7 Metro hattında kullanılan DC kablo kesiti	58

Şekil 4.6 Metro hattının OG, DC ve AG enerji besleme şeması	59
Şekil 4.7 İç ihtiyaç transformatörü.....	60
Şekil 4.8 DC doğrultucu ünite ve devreleri	63
Şekil 4.9 Kaçak akım izleme sistemi ekran görüntüsü	63
Şekil 4.10 240 mm ² kablo ETAP modeli.....	65
Şekil 4.11 120 mm ² kablo ETAP modeli.....	65
Şekil 4.12 Cer transformatörünün ETAP programındaki modellenmesi	66
Şekil 4.13 Transformatör modeline ait empedans değerleri.....	67
Şekil 4.14 2 MVA İç ihtiyaç transformatörünün elektriksel verileri	68
Şekil 4.15 1 MVA İç ihtiyaç transformatörünün elektriksel verileri	68
Şekil 4.16 630 kVA İç ihtiyaç transformatörünün elektriksel verileri.....	68
Şekil 4.17 2000 kVA ve 1600 kVA transformatörler için istasyon bazlı aktif kayıplar grafiği.....	70
Şekil 4.18 Senaryo 1'e göre yük akışı analizi grafiği	71
Şekil 4.19 Senaryo 2'e göre yük akışı analizi grafiği	71
Şekil 4.20 Senaryo 2'e göre yük akışı analizi grafiği	72
Şekil 4.21 1000 kVA transformatör istasyon bazlı aktif kayıplar grafiği	73
Şekil 4.22 Senaryo 4'e göre yük akışı analizi grafiği	73
Şekil 4.23 Senaryo 5'e göre yük akışı analizi grafiği	74
Şekil 4.24 Senaryo 6'e göre yük akışı analizi grafiği	75
Şekil 4.25 630 kVA transformatör istasyon bazlı aktif kayıplar grafiği	76
Şekil 4.26 Senaryo 7'e göre yük akışı analizi grafiği	76
Şekil 4.27 Senaryo 8'e göre yük akışı analizi grafiği	77
Şekil 4.28 Senaryo 9'e göre yük akışı analizi grafiği	78
Şekil 4.29 Hat genelinde XLPE Kablo değerleri.....	79
Şekil 4.30 2000 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği	80
Şekil 4.31 Hat genelinde XLPE Kablo değerleri.....	80
Şekil 4.32 630 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği	81
Şekil 4.33 Hat genelinde 1x240 mm ² XLPE Kablo değerleri	81
Şekil 4.34 2000 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği	82
Şekil 4.35 Hat genelinde 1x120 XLPE Kablo değerleri	82
Şekil 4.36 630 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği	83

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Raylı sistemlerde kullanılan standartlar.....	26
Tablo 3.2 Ülke bazında kullanılan uluslararası standartlar.....	28
Tablo 3.3 EN50119 standardına göre kontak teli akım taşıma kapasiteleri.....	40
Tablo 4.1. M7 Hattı işletme bilgileri.....	51
Tablo 4.2 M7 hattı transformatör merkezleri toplam kurulu gücü.....	54
Tablo 4.3 EN50119 standardına göre kontak teli akım taşıma kapasiteleri.....	55
Tablo 4.4 2 MVA İç ihtiyaç transformatör bilgileri	60
Tablo 4.5 1.6 MVA İç İhtiyaç transformatör bilgileri	60
Tablo 4.6 İstasyon bazlı servis transformatörü sayıları ve yük oranları.....	61
Tablo 4.7 Doğrultucu ünitenin teknik verileri	62
Tablo 4.8 3300 kVA cer transformatörünün teknik özellikleri.....	66
Tablo 4.9 Transformatör ve XLPE kablo güç kayıpları.....	84
Tablo 4.10 Trafo gücüne göre (mevcut kablolar ile) günlük ve yıllık maliyet tablosu.....	85
Tablo 4.11 Trafo gücüne ve 185 mm ² kabloya göre günlük ve yıllık maliyet tablosu.....	85
Tablo 4.12 Trafo gücüne ve 120 mm ² kabloya göre günlük ve yıllık maliyet tablosu.....	86
Tablo 4.13 İlk kurulum maliyeti hesap tablosu	86

MODERN RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN ELEKTRİFİKASYON STANDARTLARI VE TASARIM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ: BİR METRO HATTININ TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ

Büşra ÖLMEZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Yüksek Lisans

Danışman: Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU

Kentsel raylı ulaşım sistemleri, metro ve tramvay gibi altyapılar sayesinde günlük yaşamda milyonlarca yolcuya hizmet sunarak şehir içi ulaşımında kilit bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu açısından önemli avantajlar sağlasa da, enerji tüketimi maliyetleri ve enerji besleme sistemlerinin tasarımı gibi zorlu mühendislik problemleriyle karşı karşıyadır. Raylı sistemlerin enerji besleme altyapısı genellikle doğru akım (DC) ile çalışmakta olup, alternatif akım (AC) ile çalışan orta gerilim ağı ile DC çekiş ağı arasındaki bağlantı, çekiş trafo merkezleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Ancak, enerji ağlarının tasarımında, orta gerilim ağlarının etkileri çoğunlukla göz ardı edilmekte ve bu durum, sistem performansının doğru bir şekilde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu doğrultuda, enerji sistemlerindeki AC yük akışlarını analiz etmek için Newton-Raphson algoritması gibi yöntemler kullanılmakta ve bu analizler, gelişmiş simülasyon yazılımları ile desteklenmektedir. Yapılan çalışmalar, farklı orta gerilim ağı yapılandırmalarının, trafo merkezlerindeki gerilim düşüşleri ve yük paylaşımı üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir. Özellikle, aynı orta gerilim hattına bağlı birden fazla trafo merkezi olduğunda, önemli gerilim problemleri ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, raylı sistemlerin enerji talebi ve

tüketimi; trafik yoğunluğu, yolcu sayısı ve operasyonel dinamikler gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak sürekli değişiklik göstermekte, bu da enerji yönetimini daha karmaşık hale getirmektedir.

Raylı sistemlerin yüksek başlangıç yatırım maliyetleri ve enerji tüketiminin büyüklüğü, bu sistemlerde enerji verimliliğinin artırılmasını zorunlu hale getirmektedir. Enerji verimliliği, sistemin kalitesini ve sürekliliğini etkilemeden enerji kullanımını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Ancak bu hedefe ulaşabilmek için, raylı sistemlerin tüm bileşenlerinin etkileşimlerini dikkate alan detaylı analizler ve simülasyon çalışmaları gereklidir.

Bu çalışmada, kentsel raylı sistemlerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir yaklaşım benimsenmiştir. Çalışmanın odak noktası olarak İstanbul M7 metro hattı seçilmiş ve bu hat ETAP yazılımı üzerinde modellenmiştir. Öncelikle, cer ve sabit tesislerin enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik öneriler geliştirilirken, orta gerilim (OG) tarafındaki yük akışları, trafo ve kablo yüklenmeleri ile enerji kayıpları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu araştırma, raylı sistemlerde enerji tüketiminin optimize edilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması konusunda değerli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Metro Elektrifikasyonu, Uluslararası Standartlar, Raylı Sistemler Tasarımı

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF ELECTRIFICATION STANDARDS AND DESIGN APPROACHES FOR MODERN RAILWAY SYSTEMS: TECHNO- ECONOMIC ANALYSIS OF A METRO LINE

Büşra ÖLMEZ

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Bedri KEKEZOĞLU

Urban rail transportation systems play a key role in urban transportation by providing services to millions of passengers in daily life through infrastructures such as metro and tram. Although these systems provide significant advantages in terms of environmental sustainability and energy saving, they face difficult engineering problems such as energy consumption costs and the design of energy supply systems. The energy supply infrastructure of rail systems generally operates with direct current (DC), and the connection between the medium voltage network operating with alternating current (AC) and the DC traction network is provided through traction transformer centers. However, in the design of energy networks, the effects of medium voltage networks are often ignored, which makes it difficult to accurately evaluate system performance. In this regard, methods such as the Newton-Raphson algorithm are used to analyze AC load flows in energy systems, and these analyzes are supported by advanced simulation software. Studies show that different medium voltage network configurations have significant effects on

voltage drops and load sharing in transformer centers. In particular, when there are multiple transformer centers connected to the same medium voltage line, significant voltage problems can occur. In addition, the energy demand and consumption of rail systems constantly change depending on various factors such as traffic density, passenger numbers and operational dynamics, which makes energy management more complex.

The high initial investment costs of rail systems and the magnitude of energy consumption make it necessary to increase energy efficiency in these systems. Energy efficiency aims to minimize energy use without affecting the quality and continuity of the system. However, in order to achieve this goal, detailed analyses and simulation studies that take into account the interactions of all components of rail systems are required.

In this study, an approach aimed at enhancing energy efficiency in urban rail systems has been adopted. The Istanbul M7 metro line was selected as the focal point of the study and was modeled using ETAP software. Initially, the effects of traction and fixed installations on energy consumption were examined. While developing proposals to improve energy efficiency, load flows on the medium voltage (MV) side, transformer and cable loadings, as well as energy losses, were analyzed in detail. This research aims to make a valuable contribution to the optimization of energy consumption and the enhancement of energy efficiency in rail systems.

Keywords: Metro Elektrifikasyonu, Uluslararası Standartlar, Raylı Sistemler Tasarımı.

1 GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Kentsel raylı sistemler, metro ve tramvay gibi altyapılarla her gün milyonlarca insanı taşımakta ve yüksek seviyede hizmet sunmaktadır. Bu sistemlerin enerji beslemesi genellikle doğru akım (DC) ile yapılmaktadır ve enerji besleme ağlarının tasarımı büyük bir öneme sahiptir. DC elektrifikasyonlu raylı sistemlerin enerji besleme ağı, alternatif akım (AC) ile çalışan orta gerilim ağı ve DC ile beslenen çekiş ağı arasında çekiş trafo merkezleri aracılığıyla bağlanmaktadır. Ancak, birçok simülasyon modeli, enerji ağı tasarımında orta gerilim ağının etkisini göz ardı etmektedir; bu durum, tasarım sonuçlarının doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle aynı orta gerilim şebekesine bağlı birden fazla trafo merkezi olduğunda, gerilim düşüşleri ciddi bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma, DC elektrifikasyonlu raylı sistemlerin enerji besleme ağlarının daha doğru ve etkili bir şekilde tasarlanabilmesi için OG besleme ağlarında yapılabilecek tasarım optimizasyonu gerekliliğini ve tasarım aşamasında seçilen ekipmanlarda uluslararası standartlara uyumun önemini vurgulamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, doğru akım (DC) ile elektrifikasyon yapılan kentsel raylı sistemlerin acil durum senaryolarını da dikkate alarak enerji besleme ağlarının tasarımında orta gerilim sistemlerinin etkisini incelemek ve bu ağların simülasyon sürecine dahil edilmesinin önemini ortaya koymaktır. Çalışma, OG besleme ağı tasarımında sıklıkla aşırı dizayn edilen OG kablolar, servis trafo merkezlerindeki transformatör kapasitelerini ilk kurulum ve işletme maliyetleri üzerindeki etkilerini analiz etmeyi hedeflemektedir. Bu çalışma, DC elektrifikasyonlu raylı sistemlerin enerji besleme ağlarının daha doğru ve etkili bir şekilde tasarlanabilmesi için OG

besleme ağlarında yapılabilecek tasarım optimizasyonu gerekliliğini vurgulamaktadır.

Gerçekleştirilen tez, literatürde genellikle göz ardı edilen orta gerilim ağlarının DC besleme tasarım sürecine entegrasyonunun önemini vurgulayarak; aşırı dizayn kaynaklı verimsizlikleri, trafo ve kablo boyutlandırma kriterlerini uluslararası EN/IEC ve IEEE standartları çerçevesinde yeniden değerlendirmektedir. İstanbul M7 Mahmutbey - Yıldız metrosu hattı üzerinden gerçekleştirilen ETAP tabanlı simülasyon çalışmalarını, orta gerilim ve DC yük akışlarının, çekiş trafo merkezleri ve katener sistemlerinin performans ve enerji kayıplarına olan etkisini ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. Bu bulgular ışığında, standartlara uygun ekipman seçimi, optimum trafo konumlandırma ve kablo kesit optimizasyonu yaklaşımları sunulurken hem enerji verimliliği artırılmış hem de yatırım ve işletme maliyetleri minimize edilmiştir. Sonuç olarak, DC elektrifikasyonlu kentsel raylı sistemlerin enerji besleme altyapısına yönelik hem teorik hem de uygulamalı düzeyde orijinal ve pratik öneriler sunulurken literatüre değerli bir katkı sağlanmıştır.

1.3 Literatür Taraması

Elektrikli ulaşım sistemleri, şehir içi ve şehirler arası taşımacılıkta giderek daha önemli hale gelmektedir. Güvenilir raylı sistem işletimi için kesintisiz enerji sağlanması, frenleme enerjisinin absorbe edilmesi ve belirli gerilim seviyelerinin korunması gereklidir. Literatürde yapılan çalışmalarda metro hatlarının tasarımı önemli yer tutmaktadır. Yapılan çalışmalarda, raylı sistemlere kaliteli güç temini incelenmiş ve mevcut bir toplu taşıma hattı metro olarak yeniden tasarlanmıştır [1]. Literatürde, Polonya demiryolu sisteminin 1936 yılından 1990'ların başına dek uzanan elektrifikasyon süreci, dönemin ekonomik koşulları çerçevesinde ele alınmıştır. Özellikle 1970'ler ve 1980'lerde, hat türü, arazi yapısı ve trafik yapısı gibi kriterler dikkate alınarak elektrifikasyon için uygun eşiğin belirlenmesine odaklanılmıştır. Günümüzde ise Ulusal Demiryolu Programı (KPK) çerçevesinde, seyahat sürelerinin kısaltılması, taşıma birliğinin sağlanması ve hizmet güvenilirliğinin artırılması gibi operasyonel hedeflere odaklanarak elektrifikasyon projeleri devam etmektedir [2]. Ayrıca, yüksek hızlı demiryolu çekiş güç kaynağı sisteminde (TPSS) iki taraflı güç kaynağının kapasiteyi artırma ve mesafeyi uzatma potansiyeline sahip olduğunu, ancak dengeli güç sorunlarının yaygın kullanımını

engellediğini vurgulamaktadır. Araştırma, iki komşu çekiş trafo merkezinin besleyici gerilimlerin faz sapmasının dengeli gücü etkilediğini bulmuştur. Geliştirilen yenilikçi gerilim faz kaydırma sistemi, faz açısını optimize ederek reaktif güç dengesizliğini minimize etmekte ve bu sayede elektrifikasyonlu demiryolu sistemlerinde çift yönlü güç beslemesinin uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Bu teknolojik inovasyon, sistem verimliliğini kayda değer ölçüde artırmaktadır [3].

1.3.1 Enerji Verimliliği ve Optimizasyon Çalışmaları

Yıldız tez çalışmasında, kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji tüketimi ve verimliliğini analiz ederek tasarruf sağlama yöntemlerini incelemektedir. İstanbul'un raylı ulaşım ağından seçilen M1 ve M5 hatları simülasyonlarla modellenmiş, enerji tüketimine etki eden faktörler değerlendirilmiş ve optimum işletme senaryoları belirlenmiştir [4].

Yine Yıldız tarafından gerçekleştirilen doktora çalışmasında, raylı ulaşım sistemlerindeki enerji verimliliğinin optimizasyonuna yönelik çok parametrelilik bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın kapsamı, optimum hız profillerinin tespiti, rejeneratif frenleme teknolojilerinden elde edilen enerjinin efektif kullanımı ve sefer planlamasının optimizasyonu gibi kritik parametreleri içermektedir. Metodolojik çerçevede, inovatif matematiksel modeller ve çeşitli optimizasyon algoritmalarının uygulanması gerçekleştirilmiş olup, tren operasyonlarının enerji tüketim karakteristikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırmanın deneysel fazında, M3 metro hattı pilot uygulama alanı olarak seçilmiş, geliştirilen enerji tasarruf stratejileri öncelikle simülasyon ortamında test edilmiş ve akabinde gerçek operasyon koşullarında doğruluğu sağlanmıştır. Bu entegre yaklaşım, akademik literatüre teorik katkı sağlarken, endüstriyel uygulamaya yönelik pratik çözümler de sunmaktadır [5].

Ayrıca, raylı sistem araçlarında enerji verimliliğinin iyileştirilmesi amacıyla farklı sürüş stilleri test edilmiş, örneğin Samsun'da hizmet veren SAMULAŞ A.Ş.'ye ait CNR marka tramvaylar üzerinde yapılan analizler, önerilen sürüş senaryolarının enerji tüketiminde % 20 tasarruf sağladığını ortaya koymuştur [6].

Bunun yanında, otomatik yolcu taşıma (APM) sisteminde erken aşamada tahrik gücü sistemi tasarımı için gerekli parametrelerin belirlenmesi amacıyla, güç kaybını

azaltmak için güç kaynağı rayının minimum güç kaybı modeli oluşturulmuş ve tahrik alt istasyonlarının optimal konumlandırması, geliştirilmiş adaptif PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) algoritması implementasyonu ile gerçekleştirilmiştir [7].

1.3.2 Elektrifikasyon Sistemleri, Güç Kalitesi ve Harmonik Analizler

Kentsel raylı ulaşım sistemlerinde çekiş güç kaynağı sisteminin neden olduğu harmonik problemler ve bu sorunların enerji şebekesi üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. MATLAB kullanılarak yapılan simülasyonlarda, çekiş güç sistemi tarafından üretilen en yüksek harmoniklerin 23. ve 25. harmonikler olduğu belirlenmiş ve bu harmonik etkilerini azaltmak için etkili önlemler önerilmiştir [8].

Demiryolu elektrifikasyonunun tarihsel gelişimi, DC sistemlerin yaygınlığı ve AC elektrifikasyon sistemlerinin ortaya çıkışı da literatürde incelenmiştir. Büyük ölçekli metro ve hafif raylı sistemlerde enerji besleme stratejileri, gerilim seviyeleri, dağıtım ağları ile ilgili mühendislik zorlukları; alan sıkıntısı, harmonik bozulmalar ve gerilim regülasyonu gibi konular tartışılmıştır [9].

Farklı çalışmalarda, DC elektrifikasyonlu şehir içi demiryolu sistemlerinin güç tedarik ağı tasarımının karmaşıklığı, simülasyon modellerinin gerekliliği ve farklı yüksek gerilim ağ mimarilerinin gerilim düşüşü ile yük paylaşımı üzerindeki etkileri; aynı hatta bağlı tahrik trafolarında gözlemlenen gerilim düşüşleri de detaylı şekilde ele alınmıştır [10]. Alifuatpaşa-Pamukova hattının modernizasyonu kapsamında katener sistemi, trafo merkezi ve haberleşme sistemi tasarımı; besleme planı, piketaj ve derülaj planları ile bakım ve trafik koşulları göz önüne alınarak optimum çözümler geliştirilmiştir [11].

Autotransformer fed çekiş güç kaynağı sistemlerinin analizi, modellemesi ve simülasyonları; 50 Hz AC ve DC demiryolu sistemlerinde dönüş yolları, topraklama ve kaçak akım yönetimi arasındaki farklar; elektromanyetik uyumluluk, harmonikler, rezonans ve indüksiyon etkileri de kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [12]. Ayrıca, 50 Hz AC ve DC demiryolu sistemlerinde dönüş yolları, topraklama ve kaçak akım yönetimi arasındaki farkları incelenmiştir. Elektromanyetik uyumluluk sorunları, özellikle harmonikler, rezonans ve indüksiyon etkileri açısından ele alınarak, sinyal ve kontrol sistemleriyle uyum gerekliliği vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, EN50122-2 standardına göre

uygun tasarım yapılmaması durumunda, yeniden tasarımın yüksek maliyet ve gecikmelere yol açabileceği belirtilmektedir [13].

Raylı sistemlerde AC ve DC beslemeli demiryolu elektrifikasyon sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik algoritmalar; Newton'un Hareket Kanunu ve Kirchhoff'un Kanunları'na dayalı olarak yapay sinir ağı, destek vektör makineleri ve adaptif ağ fuzzy karar verme sistemi gibi yöntemlerle karşılaştırılmıştır [14]. 1500 V DC elektrik beslemeli demiryolu hattı için trafo yerleşiminin optimizasyonu, enerji kayıplarının azaltılması ve hattın enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik olarak detaylandırılmıştır [15].

Modelleme çalışmaları ile DC ve AC trafo istasyonlarını besleyen elektrik güç sistemlerinin temel ve harmonik frekanslar bazında segmentlere ayrılarak analiz edilmesi sonucunda asimetri ve harmonik bozulmaların artan trafik yoğunluğu gibi durumlarda kabul edilebilir sınırları aşabileceği gözlemlenmiştir [16]. Çekiş gücü trafo merkezlerinin yük akış analizleri, farklı tren işletme senaryoları ve arıza modlarının etkileri incelenmiştir [17].

Ayrıca, çekiş güç besleme sisteminde aktif doğrultucular kullanılarak çıkış geriliminin stabilize edilmesi, birim güç faktörünün sağlanması ve toplam harmonik bozulmanın (THD) istenilen seviyelerde tutulması için geliştirilen kontrol yaklaşımları, AC/DC dönüştürücülerin performansı ile birlikte ele alınmıştır [18].

Raylı araçlar ile tahrik ağı arasındaki elektriksel uyumsuzluğun, sistem kararsızlığı ve aşırı gerilim dalgalanmalarına yol açtığı; ölçülen empedans sonuçlarına dayanan bileşen bağlantı tabanlı modelleme yaklaşımı ve çok seviyeli duyarlılık analizi yöntemiyle bu sorunun giderilebileceği belirtilmiştir [19].

Ayrı çalışmalarda, manyetik levitasyonlu taşıma sistemlerinde toprak arızası akımının dinamik dağılımı ve etki eden faktörler incelenmiş; teorik türetmelerle desteklenen sonuçlar, düşük ve orta hızlı sistemlerin güvenli ve kararlı çalışması için önemli veriler sunmuştur [20]. Elektrifikasyonlu demiryolu sistemlerinin bölgesel güç şebekesine etkileri, harmonikler, üç fazlı gerilim dengesizliği ve gerilim sapsmaları üzerinden detaylı şekilde analiz edilmiştir [21].

Bunun yanında, çekiş güç besleme sistemlerinin yük modellemesi kapsamında bileşik yük eşdeğer modellemeleri yapılarak sistemin performansı değerlendirilmiştir [22].

1.3.3 Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu, Enerji Depolama ve Akıllı Yönetim

Fotovoltaik (PV) ve hidrojen enerjisinin entegre edildiği çok enerjili çekiş güç kaynağı sistemlerinde, ekonomik ve kararlı işletim stratejileri geliştirilmiştir. Operasyonel maliyetlerin minimizasyonuna yönelik matematiksel optimizasyon modelleri geliştirilmiştir. Fotovoltaik sistemlerdeki stokastik değişkenler, robust optimizasyon teknikleri kullanılarak modellenmiş olup, hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri, solar enerjinin avantajlarını değerlendirerek efektif enerji konversiyonu sağlamıştır. [23].

Çin'de paylaşımlı enerji depolama projelerinin ticari uygulanabilirliğini ve verimliliğini artırmaya yönelik olarak, optimal konumlandırma için iki aşamalı çok kriterli karar verme modelleri geliştirilmiştir. İlk aşamada güç çekim modeliyle makroskopik düzenlemeler oluşturulurken, ikinci aşamada geniş ölçekli grup karar verme çerçevesi kullanılarak en uygun mikro konumlar belirlenmiştir [24].

Demiryolu enerji tedarik sistemlerinin, dağıtık yenilenebilir enerji üretim üniteleriyle entegrasyonunda, operasyonel parametreler dijital simülasyon modelleri vasıtasıyla analiz edilmiştir. Bu entegre yaklaşım, şebeke kapasitesinin limitli olduğu lokasyonlarda güç tedarik güvenilirliğini optimize etmiş ve kritik yük noktaları için otonom enerji kaynakları tesis edilerek enerji konversiyon verimliliğinde kayda değer iyileştirmeler sağlanmıştır [25].

Enerji depolama teknolojisinin önemi, Çin'deki artan yenilenebilir enerji kapasitesi ile paralel olarak vurgulanmış; iki aşamalı çok kriterli karar verme modeli ile paylaşılan enerji depolama projelerinin en uygun konumları belirlenmiş, Shandong, Henan ve Hebei bölgeleri ideal lokasyonlar olarak tespit edilmiştir [26].

Dijital ikiz teknolojisi kullanılarak çekiş güç kaynağı AC-DC hibrit ağındaki bileşenlerin özellikleri analiz edilmiş; MATLAB/Simulink ortamında kaynak-ağ-yük-depolama etkileşim modeli oluşturulmuş ve üç istasyonlu, iki aralıklı model geliştirilmiştir. Sonuçlar, gerilim koruma stratejileri temelinde sistemin kararlı çalıştığını doğrulamıştır [27].

Son olarak, demiryolu tahrik güç kaynağı sistemlerinde elektrik enerji depolama birimlerinin kullanımı; sistem yük kapasitesi, ortalama akım ve gerilim, ısınma sıcaklığı, yükleme katsayıları, minimum tren arası mesafe ve taşıma kapasitesi gibi göstergeler üzerinde olumlu etkiler yaratmıştır. Örneğin, Trans-Sibirya demiryolu bölgesinde yapılan modellemede, depolama birimlerinin tahrik güç kaynağı elemanlarındaki yük kapasitesini düşürdüğü, trenler arası mesafeyi kısalttığı ve taşıma kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir [28].

Ayrıca, metro sistemlerinde enerji tasarrufunu artırmak için rejeneratif enerji cihazları (RED) ve enerji depolama cihazlarının (ESD) entegre edildiği akıllı güç kontrol modülleri geliştirilmiş; cihaz kontrolü ve tren işletimi arasındaki iş birliğini optimize etmek amacıyla ayrık zamanlı ölçüm yöntemi kullanılarak zaman çizelgesi optimizasyon modeli oluşturulmuş ve NSGA-II genetik algoritması ile yapılan simülasyon sonuçları, RED sisteminin enerji verimliliğini %6,36, ESD sisteminin ise %36,72 oranında artırdığını göstermiştir [29].

1.3.4 Tezin Literatüre Katkısı

Literatürde yer alan çalışmalar enerji verimliliğinden enerji kalitesinin artırılmasına, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonundan sistemin yeniden boyutlandırılmasına kadar çok geniş bir yelpazede toplanmaktadır. Buna karşın, raylı sistemler üzerinde kullanılan standartların fazlalığı, farklı ülkelerdeki standartların değişkenlik göstermesi, yapılan tasarımların standartlarda istenilen kriterlerin de üzerinde seçimlerle gerçekleştiriliyor olması gibi hususların irdelenmesi ve mevcut hatlar üzerinden örneklendirilmesi ihtiyacı bulunmaktadır.

Bu çalışmada, raylı sistem elektrifikasyonunda kullanılan tüm standartlar kapsamlı bir biçimde derlenmiş ve farklı ülkelere ait normlar detaylı şekilde karşılaştırılmıştır. Bu yönüyle literatüre önemli katkılar sunan tez, aynı zamanda araştırmacılar ve uygulayıcılar için bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

Ayrıca, acil durum senaryoları dikkate alınarak sistem boyutlandırmasına yönelik farklı tasarım yaklaşımları geliştirilmiş ve mevcut durumla birlikte modelleme çalışmaları kapsamında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular teknik ve ekonomik açıdan irdelenmiş, uygulamaya yönelik öneriler ortaya konulmuştur.

Tez çalışmasının literatüre sağladığı başlıca katkılar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Raylı sistem elektrifikasyonunda kullanılan ulusal ve uluslararası standartlar bütüncül bir çerçevede sunulmuştur.
- Farklı ülkelerdeki uygulamalara dair karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılarak, karar vericiler için yol gösterici bilgiler sağlanmıştır.
- Gerçek bir metro hattı esas alınarak detaylı modelleme yapılmış, performans analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Seçilen standartların ve şartnamelerin ekipman boyutlandırması, trafo yerleşimi ve kablo kesiti seçimleri üzerindeki etkileri sayısal olarak ortaya konulmuştur.
- Acil durum ve olağanüstü işletme koşulları dikkate alınarak farklı boyutlandırma senaryoları geliştirilmiş ve mevcut sistemle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.
- Teknik ve ekonomik analizler doğrultusunda, tasarım ve işletme açısından uygulanabilir en uygun çözüm önerileri sunulmuştur.
- Enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak alternatif senaryoların uzun dönemli yatırım ve işletme maliyetlerine etkileri analiz edilmiştir.

2

RAYLI SİSTEM ELEKTRİFİKASYONUNA GİRİŞ

İkinci bölümde, raylı sistemlerde elektrifikasyonun temel bileşenleri detaylandırılmıştır. Öncelikle, cer gücü sisteminin genel yapısı ve kullanılan gerilim seviyeleri açıklanmış; ardından trafo merkezlerinin işlevleri, yapılandırılmaları ve enerji sağlama yöntemleri ele alınmıştır. Trafo merkezlerinde yer alan OG sistemleri, doğrultucular ve yardımcı servis transformatörleri gibi alt sistemler teknik özellikleriyle tanıtılmıştır. Devamında, raylı sistem araçlarına enerji iletimini sağlayan katener sistemlerinin hem rijit hem de geleneksel türleri ayrıntılı biçimde incelenmiş; bu sistemlerin yapısal özellikleri, kullanım alanları ve avantajları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu bölüm genel olarak, raylı sistemlerin elektrikle çalışmasını mümkün kılan altyapının teknik temellerini kapsamlı bir şekilde açıklamaktadır.

2.1 Raylı Sistemlerde Güç Sistemi Özellikleri

Besleme gerilimleri metro ve tramvay hatlarında 750V veya 1500V seviyesindedir. Şehirlerarası ve banliyö hatları besleme gerilimi 25kV 50Hz, nostaljik tramvay gibi eski banliyö trenleri 600V DC, hafif raylı ve metro sistemleri 750V DC ve 750V / 1500V DC hatlar kullanılmaktadır. Genel olarak, elektrik katener sistemlerinin çoğu enerji verimliliği nedeniyle DC kullanır.

Cer güç transformatör merkezleri, negatif besleme hattı ile birlikte redresöre 1,2 kV nominal gerilim temin eden çekiş gücü transformatörü olarak tanımlanmaktadır. Transformatörler; katener, negatif fider ve rayları birbirine bağlayan hat boyunca sürekli olarak hizmet vermektedir. Transformatör dönüş oranı, birincil sargılardan ikincil sargılara 34,5 : 1,2 kV. Katener ve negatif fider arasındaki besleme gerilimi trenler için uygun olan 1,5 kV'tur [15].

Raylı Sistemlerin Elektrifikasyonu aşağıdaki sistemlerden oluşur:

- Trafo Merkezleri
- Hücreler
- Gerilim ve Akım Transformatörleri

- Aşırı Akım Koruma Rölesi
- Diferansiyel Koruma Rölesi
- DC Şalt Cihazları
- Redresörler
- Negatif Besleyici
- Katener / 3. Ray Sistemi
- Sinyalizasyon / Trafik Sistemleri
- İletişim Sistemleri
- SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama) ve Uzaktan Kontrol Sistemleri

2.1.1 Trafo merkezleri

Genel olarak, trafo merkezleri trenler için enerji tedarik kaynağı olarak hizmet vermektedir. Ana işlevleri yüksek gerilim üretim istasyonlarından enerji almak ve gerilimi belirlenen seviyeye uygun bir değere düşürmektir. Giden dağıtım fiderleri üzerindeki gerilim, trafolar üzerinde farklı kademe seviyeleri kullanılarak bir trafo merkezinde düzenlenebilir. Trafo merkezi, sistemin çeşitli bölümlerinin çalışmasını kontrol etmek amacıyla ölçümler yapmak için uygun bir yerdir.

Raylı ulaşım sistemlerinde, araç filosu ve istasyon komplekslerinin enerji gereksinimleri, hat güzergahı boyunca spesifik noktalarda konumlandırılmış transformatör merkezleri vasıtasıyla temin edilmektedir. İki tip trafo vardır, bunlardan biri trene enerji verirken diğeri istasyonlara enerji sağlar. Bu yedek sistem enerji sürekliliği avantajı sağlar. Bu trafo merkezlerinin sayısı ve gücü demiryolu tipine ve hat uzunluğuna göre değişmektedir.

2.1.1.1 Cer Gücü Transformatörleri

Trafo merkezleri 34,5 kV orta gerilim elektrik enerjisi TEİAŞ'a (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) bir OG şalt tesisi üzerinden bağlanır. OG Cer trafo merkezlerinde redresörler AC 34,5 kV / 1200 V cer güç transformatörleri üzerinden beslenir. Her trafo merkezinin kendi yedek sistemi vardır. Trafo merkezleri OG hücreleri, iki doğrultucu transformatör, iki doğrultucu, dört çıkış fiderinden oluşur. Doğrultucular 1200V AC gerilimi 1500V DC nominal gerilime dönüştürür. Temin edilen doğru akım (DC) potansiyeli, pozitif terminalde konumlandırılmış devre

kesici ve izolasyon ekipmanları vasıtasıyla, sabit katener sistemi veya üçüncü ray konfigürasyonuna transfer edilmektedir. 1500 V sistemler, 750V DC ile karşılaştırıldığında iletken kayıplarında ($P=I^2.R$) ve kaynaktan çekilen akımın azalmasına bağlı olarak kesitlerde azalma sağlar. Bu nedenle şehir içi metro hatlarında öncelik yolcu güvenliği olduğu için 1500 V tercih edilmektedir. Yolcu güvenliği bir sınır olarak kabul edilir ve şehir hatlarında çok yüksek gerilim değerlerine yer verilmez. Şehir içi raylı sistemde raylar elektrik devresinin negatif kutbu olarak kullanılır. DC besleme akımı trafo merkezindeki pozitif doğrultucu terminalinden gelip katenerlere giderek DC devresini tamamlar, araç tekerleği üzerinden devam eder ve transformatör merkezindeki doğrultucunun negatif ucuna bağlanarak devreyi tamamlar [16].

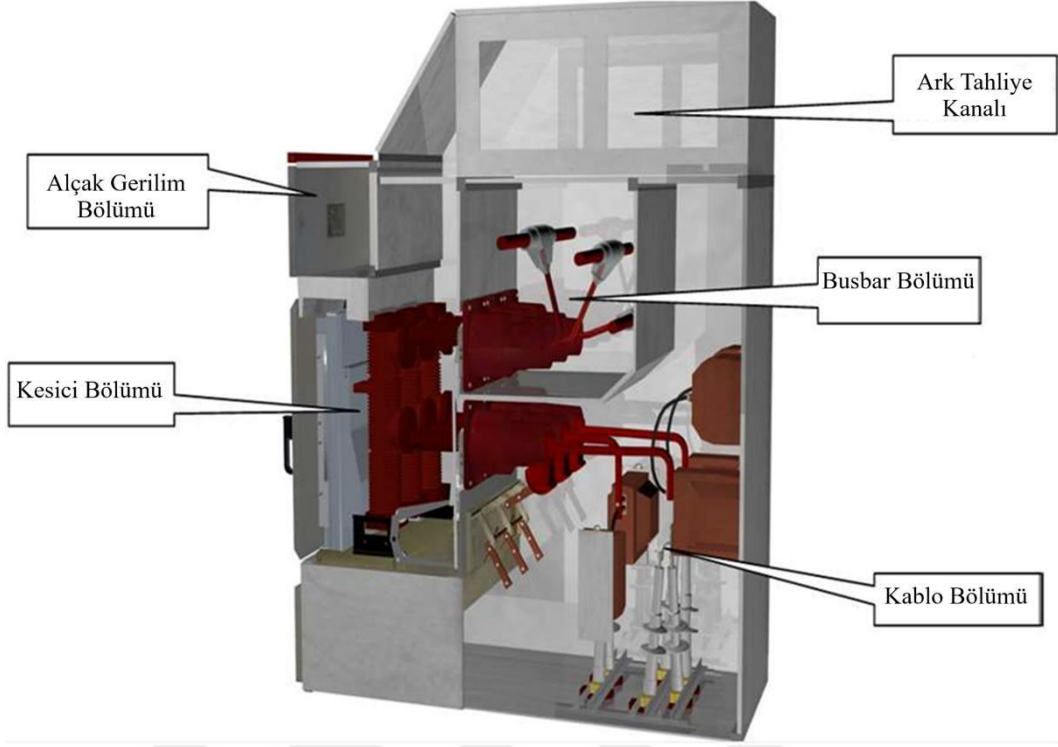
Her bir cer gücü trafo merkezinde, indirici merkez şebekesinden iki ayrı 3 fazlı YG kablosu çekilir. Bu kablolar farklı indirici merkezlerden, en azından farklı bara sistemlerinden kaynaklanmalıdır. Ancak bunlar aynı iletim merkezlerinde de taşınabilir. Her trafo merkezinde, her biri aynı güç şebekesinden beslenen eşit büyüklükte iki YG cer güç trafosu bulunur. Her iki trafo da, standart traksiyon güç besleme konfigürasyonunda operasyonel hale getirilmekte olup, transformatör istasyonunun paralel besleme noktalarına enerji dağıtımını sağlamaktadır. YG transformatörleri açık tip, kuru, kendinden soğutmalı ve uygun bir derecelendirmeye sahiptir.

2.1.1.2 Yardımcı servis transformatörleri

Yardımcı servis transformatörleri, orta gerilimden alçak gerilime besleme yapmak için kullanılır ve raylı sistemlerde tren yükü hariç tüm yardımcı hizmetleri sağlar. İstasyonlarda aydınlatma, havalandırma, motor, makine, ısıtma, soğutma gibi elektrik ihtiyacı olan tüm ekipmanlar yardımcı servis trafoları tarafından beslenir.

2.1.1.3 OG (Orta Gerilim) Sistemleri

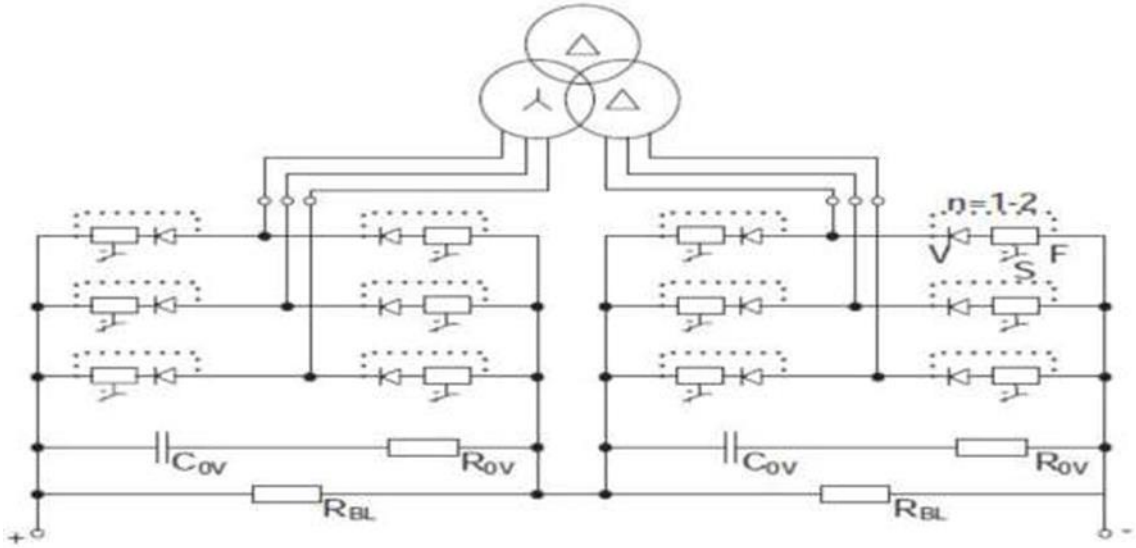
1-36 kV'a kadar orta gerilim dağıtım sistemleri için tasarlanmış bu üniteler; trafo binalarında, beton veya çelik köşklerde bina tipi trafolu yüksek gerilim tesislerinde kullanılmaktadır. Tüm enerji sürekliliği ve enerji kullanılabilirliği gereksinimlerini karşılayan sistemlerdir. Bu sistemler, işletmenin talep ve ihtiyaçlarına göre giriş, ölçüm ve çıkış olmak üzere üç hücreden oluşur. Şekil 2.1'de orta gerilim şalt tesisi gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Orta gerilim şalt sistemi [14]

2.1.1.4 DC (Doğru Akım) Doğrultucuları

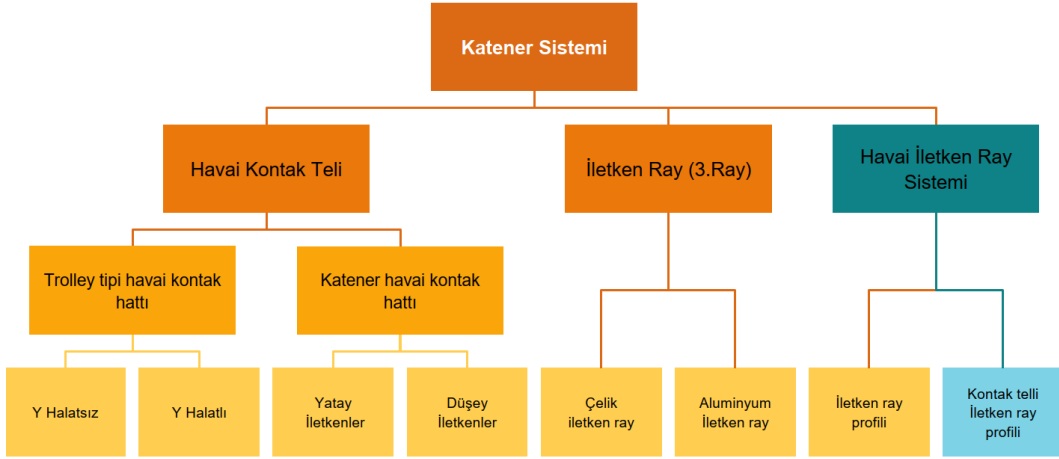
Cer transformatörünün sekonder tarafından iletilen 1200 V DC gerilim, 6 darbeli alternatif sinyali doğrultmak amacıyla diyot grubunun bulunduğu bara sistemi üzerinden DC doğrultucu şalt sistemine iletilir. Çift sekonderli transformatörler doğrultma uygulamaları için idealdir. 12 darbeli sinyallerin her bir fazı, diğerine göre 30 derecelik faz kaymasına sahiptir. Gerilim-akım doğrultma işlemi üçgen ve yıldız sargıların uçlarının seri olarak altı diyot ile bağlanması ile gerçekleştirilir. Şekil 2.2'de 6 darbeli doğrultucu şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.2 12 darbeli doğrultucu şeması [14]

2.1.2 Katener Sistemleri

Katener, tren pantografı aracılığıyla gerilim sağlayan sistemdir. Bu sistem ray tipine ve tasarımına göre farklı yapılardan oluşur. Ancak asıl görevi elektrik enerjisini trafo merkezinden araç motorlarına dağıtmaktır. Katener sistemi, geleneksel ve rijit katener sistemleri olmak üzere ikiye ayrılır. Bir havai katener hattı, iletilen enerjiyi güç merkezinden hat boyunca araçlara aktaran besleme telleri, temas teli, asma teli, damlalık telleri, iletken taşıma yapıları, direkler, izolatörler, elektrik hattı mekanik germe aparatları, ağırlıklar, montaj aparatları ve ara parçalardan oluşur. Katener sisteminin çalışması genel olarak şu şekildedir. Enerji sağlayacak besleme noktalarından gelen gerilim cer trafosunun orta gerilim hücrelerine gelir. Cer trafoları tren güzergahı boyunca belirli aralıklarla kurulur. Enerji dağıtım merkezinden gelen orta gerilim daha düşük bir gerilime dönüştürülür (ray üzerinde kullanılacak gerilim seviyesi), transformatörler vasıtasıyla OG panolarında toplanır. Daha sonra gerilim doğrultucu panosuna aktarılır. Bu DC gerilim katener sisteminde genellikle 1500 V'tur. Katener hattı çeşitleri ve tanımları aşağıdaki diyagramda paylaşılmıştır.



Şekil 2.3 Katener Sistemi çeşitleri ve tanımları [11]

Havai katener sistemlerinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Katener sistemi genel olarak bir taşıyıcı tel, pantograf tarafından temas edilen hareket teli, taşıyıcı direkler ve telleri asmak için kullanılan hoban tertibatlarından oluşur.
- Katener, pantografin mümkün olduğunca homojen aşınması için yol ekseninde zig-zag ilerlemesi gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil 2.4’de katener hattı dezeksman örneği paylaşılmıştır.



Şekil 2.4 M7 Mahmutbey – Yıldız katener hattındaki dezeksman örneği [6]

- Katener sistemi belirli uzunluklarda (mekanik olarak) sonlandırılmaktadır.

Bölmeler merkez noktalara sabitlenmiştir.

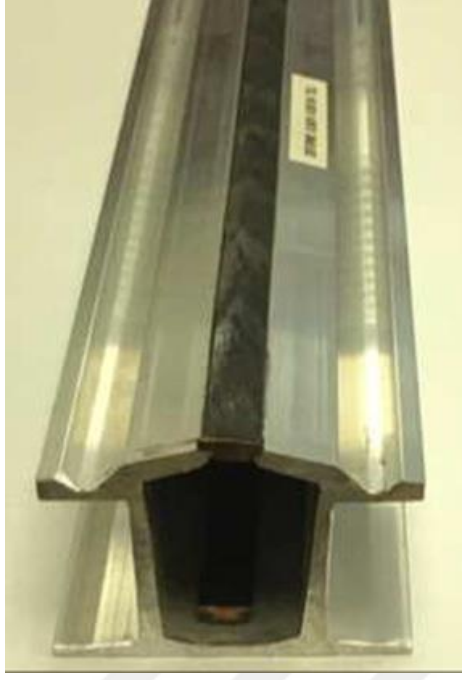
- S/I yerleştirerek iki trafo bölgesi arasındaki elektriksel ayırımı. Bir hafif metro hattının otomatik gerilmiş katener sisteminin özellikleri aşağıdaki gibidir:

şunlar sıralanabilir:

- Raylı sistem askı telinin tipine bağı olarak ikiz taşıyıcı, besleme hattı ve bir besleme teli içerir.
- Katener ve seyir teli otomatik olarak gerilir. Tellerin otomatik gerdirme sistemi, her birinin nominal çekme kuvvetlerini korumasına ve sarkmamasına izin verir. Bu, ağırlıklandırma cihazlarının hat sonlandırma noktalarına yerleştirilmesiyle sağılanır.
- Bu sistem 120 km/saat çalışma hızına olanak sağılar.
- İkiz katener telleri toplam 2400 kg ve kontak teli 1100 kg ile gerilir.
 - Seyir \pm 250 mm, kavisler 400 mm'dir.
 - Direkler arasındaki açıklık 22-60 m arasında değışmektedir.
 - Konsol sistemi taşıyıcı olarak kullanılmaktadır [19].

2.1.2.1 Rijit katener hattı

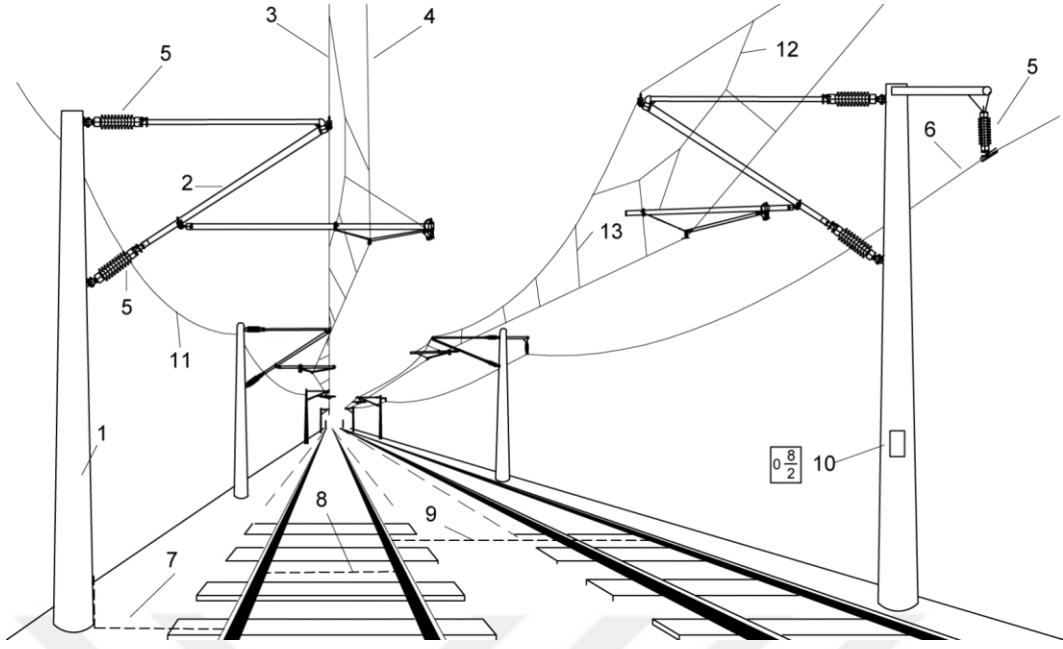
Rijit katener, katener sistemleri arasında en yeni demiryolu sistemi teknolojisidir. Alüminyum kompozit profile tutturulmuş kontak telinden oluşan, metro gibi yeraltı araçlarının elektrifikasyonu için daha çok tercih edilen sistemdir. Rijit katener, düşük mekanik arıza, sabit ve bütünsel yapı, düşük bakım ve akım taşıma kapasitesi gibi çok fazla avantaja sahiptir. Üçüncü ray sistemine alternatif olarak bakımı/montajı kolaydır ve yüksek iletkenliğe sahiptir. Rijit katener sisteminin en önemli avantajı, geleneksel katener sistemleri ile aynı hatta kurulabilmesidir. Avrupa'da, 3. ray sistemini rijit katener sistemine dönüştüren metrolar (Barselona metrosu gibi) mevcuttur. Özellikle tünel yapısına sahip yeraltı metrolarında rijit katener sisteminin kullanılması tercih edilmektedir. Ayrıca İstanbul Galata Köprüsü gibi açılıp kapanan köprülerin sabit yapısı nedeniyle bu yapı kullanılmaktadır [20]. şekil 2. 4.'te bir havai rijit katener profili gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Havai rijit katener profili [6]

2.1.2.2 Geleneksel havai katener hattı

Konvansiyonel katener, demiryolu üzerinde hareket eden trenlerin, demiryolunun çeşitli geometrik güzergahlarında, maksimum hızda, pantograf alım bölgesinde, her türlü iklim koşulunda can ve mal kaybını en aza indiren bir havai hat sistemidir. Konvansiyonel katener sistemi daha çok hafif raylı transit ve tramvay hatlarında tercih edilmektedir. Havai katener hattı; güç merkezinden iletilen enerjiyi hat boyunca araçlara aktaran besleme telleri, kontak teli, jumper, askı teli, damlalık telleri, iletken taşıma yapıları, direkler, izolatörler, elektrik hattı mekanik germe aparatları, ağırlıklar, montaj aparatları ve ara parçalardan oluşur. Klasik bir havai katener hattı şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmektedir [21].



Şekil 2.6 Havai katener hattının detay parçaları [11]

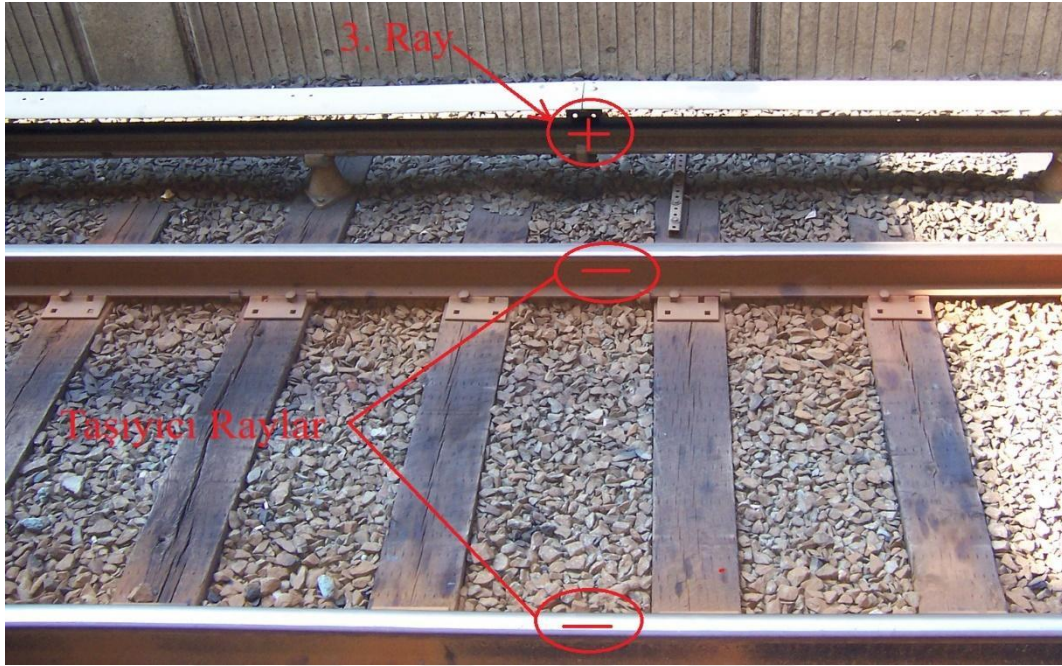
Şekil 2.6.'da gösterilen geleneksel katener sistemine ait ekipmanlar aşağıdaki gibidir:

- 1 Direk
- 2 Konsol
- 3 Portör Teli
- 4 Kontak Teli
- 5 İzolatör
- 6 Fider İletkeni
- 7 Direk Topraklama Kablo
- 8 Ray Bondingleri (S-Bond)
- 9 Ray Cross Bond
- 10 Direk Tabelası
- 11 Geri Dönüş Tablosu
- 12 Y hatı
- 13 Dropper

2.1.3 Üçüncü Raylı Sistem

Üçüncü ray, demiryolu araçlarına elektrik enerjisi sağlamak için kullanılan bir yöntemdir. Üçüncü ray, raylı sistemlerdeki en eski elektrik iletim şeklidir. Üçüncü

raylar, elektrik çarpması olasılığını azaltmak için istasyon tarafının tersine özellikle sert bir yönde yerleştirilir. Şekil 2.7’de 3. ray görseli paylaşılmıştır.



Şekil 2.7 Bir metro hattında kullanılan 3. Ray ve taşıyıcı raylar [10]

Üçüncü ray bazen nadiren iki hattın ortasında olabilir. Üçüncü ray sistemi aracı, aracın her iki tarafındaki ray pabucu yardımıyla üçüncü ray üzerindeki enerjiyi alır. Ray pabucunun üçüncü raya temas koşulları kullanıma bağlı olarak değişebilir. Enerji üçüncü raydan yan, alt veya üst temas ile alınabilir. Üçüncü raylar, su damlaması, yağmur ve diğer çevresel faktörlerin olumsuz etkisini azaltmak için yalıtkan malzeme ile kaplanır [22].

2.2 Şehir İçi Raylı Sistemler

Kamunun Kamunun kullanı Kamunun kullanımına sunulan çeşitli kentsel ve banliyö raylı sistem türleri vardır. Örneğin, şehir içi ulaşım için metro, tramvay, hafif raylı tren ve monoray. Kentsel raylı sistemlere ek olarak, iki tür banliyö raylı sistemi vardır; yüksek hızlı tren ve banliyö treni. Kent içi raylı sistemleri sınıflandırmak için kullanılan kriterler sistemin yolcu kapasitesi, ticari hızı, bir serideki vagon sayısı, aracın ivmelenmesi, demiryolunun geometrik özellikleri, sinyal sistemi, kesişme noktalarının varlığı, istasyon uzunlukları, istasyonlar arasındaki mesafe, pik saatte seri çalışma sıklığı kapasite ile ilgili faktörler sınıflandırmada dikkate alınmaktadır [25].

2.2.1 Metro

Tek yönlü yolcu kapasitesi 60000 ile 70000 kişi arasında olan toplu taşıma sistemi metro olarak adlandırılmaktadır. Metro ulaşımı, 1435 mm ray genişliğine sahip 4, 6 ve 8 araçlık bir seriye sahiptir. Metrolar, katener veya üçüncü ray hattından enerji alan ve sinyalizasyon sisteminden yararlanan şehir içi raylı sistemlerdir. Metroların hızı 70 km/saat ile 90 km/saat arasında değişmektedir. İstasyonların çoğu genellikle yeraltındadır ve bu da metro inşaatının yüksek maliyetinde önemli bir faktördür. Katenerden gelen besleme gerilimi, yazarların tercihine göre 750V DC veya 1500V DC olabilir. Günümüzde bazı metro araçları sürücüsüz olarak işletilmektedir ve buna otomatik tren işletimi (ATO) adı verilmektedir. Şekil 2.8'de Üsküdar- Yamanevler metrosuna ait bir görüntü yer almaktadır [26].



Şekil 2.8 Üsküdar-Yamanevler metro hattı Çarşı istasyonu [4]

2.2.2 Hafif raylı tren

Tek yön yolcu kapasitesi 34.000 - 35.000 / tek yön civarındadır. Araç serileri genellikle 4, 3 veya 4- 2 seridir ve geleneksel katener hatlıdır. İstasyon mesafesi metrolardan daha kısadır ve otomatik kontrol sistemi ve tam sinyalizasyon ile veya mekanik bir kontrol ile çalıştırılabilir. Yedek hattı olmasına rağmen, bazı yerlerde yeraltı ve yer seviyesi istasyonları, aç-kapa, yarma, viyadükler ve kısa tüneller bulunmaktadır. Maksimum seyahat hızı 60 km/saat - 80 km/saattir. Şekil 2.9'da M1 Yenikapı-Kirazlı metro hattına ait bir görüntü yer almaktadır [26].



Şekil 2.9 M1 Yenikapı-Kirazlı metro hattı Yenikapı istasyonu [4]

2.2.3 Tramvay

Tramvay, araç trafiğinin olduğu aynı yolu kullanan bir raylı sistem türüdür ve maksimum seyir hızı 40km/saattir. Saatte taşınan yolcu miktarı metro ve hafif raylı sistemlerden daha düşüktür. İstasyonların çoğu yer üstündedir ve araçlar alçak seviyeli istasyonlara uygun olarak tasarlanmıştır. İstasyonlar arasındaki mesafe yaklaşık 700 m-1 km civarındadır. Diğer raylı sistem tipleriyle karşılaştırıldığında, taşınan yolcu için Enerji tüketim değerleri sığdır. Eski tramvaylar 600V DC kullanırken, yeni tramvaylar 750V DC çalışma gerilimi kullanmaktadır. Şekil 2.10'da Bağcılar – Kabataş Tramvayı gösterilmektedir [26].



Şekil 2.10 Bağcılar – Kabataş tramvayı [14]

2.2.4 Monoray

Monoray, özel olarak yapılmış yüksek yapılı kolon ve kirişler vasıtasıyla cadde seviyesinin üzerinde kendine özgü bir yol boyunca hareket eden elektrikli raylı bir araçtır. Monoraylar, kapalı kutu şeklinde asılı veya aracın altından asılı ya da rayın üstüne yerleştirilmiş olarak iki farklı tipe ayrılan demiryoludur. Monoraylar, lastik tekerleklerin daha yüksek eğimleri ve keskin virajları aşma konusunda raylı araçlara göre daha avantajlı bir konuma sahiptir. 20'lik eğimleri tırmanabilen monoray araçları bulunmaktadır [27].

Bindirmeli tip monoray sistemleri bugüne kadar en çok devreye alınan sistemlerdir. Bu tipler görsel olarak şehirlerde çevreye en uyumlu sistemlerdir çünkü süspansiyon sistemlerinin altında motorlu taşıtlar için yeterli dikey açıklık olması daha olasıdır. İtme tipi monoray, dar bir beton veya çelik hat üzerinde hareket eden araçlardan oluşur. Aracın taşıyıcı lastik tekerlekleri ray kirişinin üzerinden geçer ve kılavuz lastik tekerlekler aynı kirişin her iki tarafına basar. Bazı farklı konfigürasyonlar geliştirilmiş olsa da temel prensip aynıdır. Şekil 2.11'de gösterilmiştir. ABD'nin Las Vegas'daki monoray sistemi gösterilmektedir [28].



Şekil 2.11 Las Vegas'daki monoray sistemi [1]

2.2.5 Banliyö treni

Banliyö treni genellikle şehir sınırları içerisinde çalışmaktadır. Banliyö trenlerinin hareket süresi 8 ila 15 dakika arasında değişmektedir. Ray genişliği diğer raylı sistemlerle aynıdır; 1435 mm ve besleme gerilimi 25kV 'tur. İşletme maliyetleri makul ve enerji tüketimi düşüktür. Bir banliyö treni örneği olan Marmaray, Halkalı'dan Gebze'ye 43 duraktan oluşmaktadır ve 12 Mart 2019'dan beri hizmet vermektedir. Şekil 2.12'de Marmaray adı verilen bir banliyö treni gösterilmektedir [29].



Şekil 2.12 Halkalı – Gebze banliyö treni [4]

3

METRO ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİNDE KULLANILAN STANDARTLAR VE TASARIM KRİTERLERİ

Bu bölüm, metro elektrifikasyon sistemlerinin tasarım ve işletmesinde uygulanan uluslararası standartlar ve teknik kriterleri kapsamlı şekilde ele almaktadır. Güvenlik, hizmet kalitesi ve çevresel uyumluluk gibi temel tasarım gereklilikleriyle birlikte, 750 V DC, 1500 V DC ve 3000 V DC sistemlerin teknik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca EN, IEC ve IEEE standartlarına göre trafo merkezleri, doğrultucu üniteleri, katener hatları, topraklama ve koruma sistemleri gibi bileşenlerin tasarım ve yerleşimi de analiz edilmiştir. Geri dönüş akımı, ray izolasyonu, yıldırımdan korunma ve enerji kalitesi yönetimi gibi konular da teknik standartlar çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bölüm, metro sistemlerinin güvenli ve sürdürülebilir şekilde tasarımı için gerekli mühendislik esaslarını sunmaktadır.

3.1 Metro Elektrifikasyon Sistemlerinde Kullanılan Standartlar

Bir metro elektrifikasyon sisteminin tasarlanması sırasında, demiryolu işletmeciliğinin gerekliliklerini karşılamak için belirli kriterler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Güvenlik
- Yüksek hizmet kalitesi
- Çevresel koşullara uyumluluk

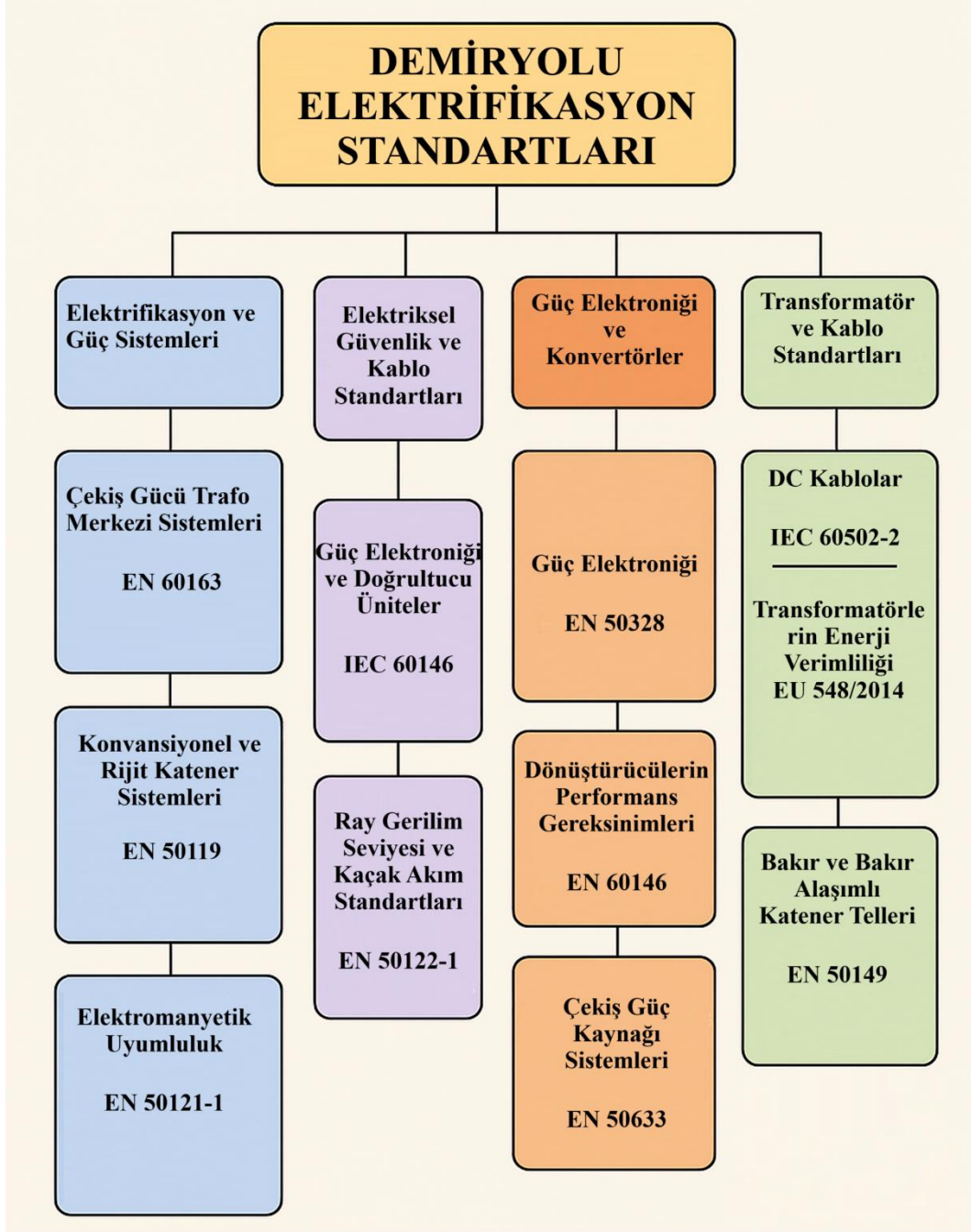
Metro elektrifikasyon sistemlerinin güvenliğini, yüksek hizmet kalitesini ve çevresel koşullara uyumluluğunu sağlamak amacıyla; enerji iletim altyapısından koruma sistemlerine kadar tüm bileşenlerin IEC, EN ve IEEE gibi uluslararası standartlara uygun şekilde tasarlanması ve işletilmesi kritik öneme sahiptir.

IEEE 1653.3 standardı, özellikle yangın riski ve elektrik çarpması gibi tehlikeleri en aza indirerek güvenliği sağlamaya odaklanmaktadır. Örneğin, tramvay

hatlarında üçüncü rayın yerde bulunması, insanların güvenliği açısından riskli olduğu için bunun yerine havaî hat sistemleri tercih edilir.

Hizmet kalitesinin yüksek olması, trenlere sağlanan gerilimin mümkün olduğunca sabit tutulmasını gerektirir. Ayrıca, sistemin arızalara karşı dayanıklı olması önemlidir. Örneğin, bir trafo merkezinin devre dışı kalması, trenlerin sefer sıklığını ve yolculuk süresini önemli ölçüde etkilememelidir.

Elektrifikasyon sisteminin demiryolu altyapısının diğer bileşenleriyle uyumlu olması da büyük önem taşır. Mevcut tren filosu genellikle altyapıya uygun şekilde tasarlanmıştır, ancak yeni trenler devreye alındığında, enerji sisteminin bu araçları besleyip besleyemeyeceği değerlendirilmelidir. Bu kapsamda akım toplama sistemleri, elektromanyetik uyumluluk, güç seviyeleri ve gerilim değerleri dikkate alınmalıdır [30]. Raylı sistem elektrifikasyonuna ilişkin standartlar; bir yandan enerji iletim ve dağıtım altyapısını tanımlayan Güç Sistemleri, diğer yandan tesisat ve kablo donanımının güvenliğini temin eden Elektriksel Güvenlik, hareketli ve sabit ekipmanlarda kullanılan Güç Elektroniği ve Doğrultucular ile nihayetinde trafo ve güç kablolarını kapsayan Transformatör ve Güç Kablosu Standartları olmak üzere dört ana sınıfa ayrılır. Bu sınıflandırma, her bir ekipman grubunun işlevsel gereksinimlerine uygun olarak sistematik bir çerçevede ele alınmış ve aşağıdaki Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Ülkemizde kullanılan standartların sistemler bazında gruplandırılması

Ayrıca, güç besleme sisteminin iletişim ve sinyalizasyon sistemleriyle etkileşimi göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrik sisteminden kaynaklanabilecek olası parazitlerin analiz edilmesi, sinyalizasyon ve haberleşme sistemlerinin sorunsuz çalışmasını sağlamak açısından kritik bir faktördür. Tablo 3.1’de ülkemizde kullanılan raylı sistem elektrifikasyon standartları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.1 Raylı sistemlerde kullanılan standartlar

Doküman ID	Başlık
EN 50119	Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektrikli çekiş havai katener hatları
EN 50121-1	Demiryolu uygulamaları - Elektromanyetik uyumluluk - Bölüm 1: Genel
EN 50122-1	Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi - Bölüm 1: Elektrik çarpmasına karşı koruyucu hükümler
EN 50122-2	Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi - Bölüm 2: DC çekiş sistemlerinin neden olduğu kaçak akımların etkilerine karşı önlemler
EN 50122-3	Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi - Bölüm 3: AC ve DC çekiş sistemlerinin karşılıklı etkileşimi
EN 50163	Demiryolu çekiş sistemleri için gerilim seviyelerini belirler
EN 50328	Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Trafo merkezleri için elektronik güç dönüştürücüleri
EN 50329	Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Çekiş transformatörleri
EN 50388	Elektrifikasyon ve enerji besleme sistemleri ile trenler arasındaki uyumluluğu düzenler
EN 50633	Demiryolu çekiş güç kaynağı sistemleri için tasarım kriterlerini belirtir

Şehir içi raylı sistemlerin elektrifikasyon yapıları ülkeler arasında bazı teknik farklar taşısa da, genel eğilim güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik ekseninde uluslararası standartlara uyumlu çözümler geliştirmek yönündedir. Çin, Japonya ve Hindistan gibi ülkelerde metro hatlarında ağırlıklı olarak 750 V veya 1.500 V DC sistemler tercih edilirken; Avrupa ve ABD’de ise 600–750 V DC üçüncü ray sistemleri ve bazı yeni hatlarda 25 kV 50/60 Hz AC besleme öne çıkmaktadır. Katener yapılarında tünellerde rijit sistemler, açık alanda esnek çok telli sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kablo standartları ülkelere göre JIS, GB/T, IS, UL veya EN/IEC normlarına dayandırılmakta, kontak teller genellikle gümüş veya magnezyum alaşımlı bakırdan seçilmektedir. Ray gerilim sınırlama ve kaçak akım

kontrolü için çoğu ülkede EN 50122-2 veya muadili standartlar temel alınmakta, yalıtımlı traversler ve SCMS (izleme sistemleri) ile güvenlik sağlanmaktadır.

Tablo 3.1 Raylı sistemlerde kullanılan standartlar (devamı)

IEC 60502	1 kV ($U_m = 1,2$ kV) ila 30 kV ($U_m = 36$ kV) arası anma gerilimleri için ekstrüde izolasyonlu güç kabloları ve aksesuarları - Bölüm 1: 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) ve 3 kV ($U_m = 3,6$ kV) anma gerilimleri için kablolar
EN 61000-2	Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Ortam - Endüstriyel tesislerde düşük frekanslı iletilen bozulmalar için uyumluluk seviyeleri
EN 60332-3-24	Yangın koşulları altında elektrik ve optik fiber kabloları üzerinde testler - Bölüm 3-24: Dikey monte edilmiş demet kablolar veya tellerin dikey alev yayılımı için test - Kategori C
IEC 60332-3-24	Demiryolu araçları için yangına dayanıklı kabloların gereksinimlerini belirtir
IEC 60146	Güç elektronik dönüştürücülerin performans gereksinimlerini belirtir
IEEE 1653.3	Raylı Taşıma Çekiş Gücü Sistemleri Modellemesi için IEEE Kılavuzu
EN 61000-4-7	Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Bölüm 4: Test ve ölçüm teknikleri; bölüm 7: güç kaynağı sistemleri ve bunlara bağlı ekipmanlar için harmonik ve ara harmonik ölçümleri ve enstrümantasyonu üzerine genel kılavuz
EN 61000-4-15	Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Bölüm 4-15: Test ve ölçüm teknikleri - Flicker ölçer - İşlevsel ve tasarım özellikleri
EN 61000-4-30	Elektromanyetik uyumluluk (EMC) - Bölüm 4-30: Test ve ölçüm teknikleri - Güç kalitesi ölçüm yöntemleri

Alt istasyon mimarilerinde ise hemen her ülkede çift trafolu, ring topolojili, yedek beslemeli çözümler kullanılmakta; SCADA sistemleriyle IEC 61850 üzerinden haberleşme sağlanmaktadır. Elektriksel güvenlik açısından Çin ve Hindistan gibi ülkeler kendi iç yönetmeliklerine dayanırken, Avrupa ülkeleri CENELEC'in EN 50122-1/50126-8-9 standartlarını; ABD ise NFPA 130 ve IEEE normlarını uygulamaktadır. Doğrultucu ünitelerde genellikle 12/24 puls diyot veya IGBT teknolojileri kullanılarak IEC 60146 Class VI güç kalitesi seviyeleri hedeflenmektedir. Enerji geri besleme sistemleri, harmonik filtreleme, yedek invertör yapıları ve topraklama sistemleri çoğu sistemde standart hale gelmiştir. Bu çerçevede, ülkeler farklı teknik çözümler benimsemiş olsalar da, altyapılar genel

olarak güvenli, esnek ve entegre edilebilir sistem mimarileri üzerine kurulmaktadır. Aşağıdaki Tablo 3.2’de Çin, Japonya, ABD, Hindistan ve Avrupa gibi ülkelerin akım toplama sistemi, kablo türleri ve standartları, gerilim seviyesi ve frekans, katener sistemi tipi, ray gerilim sınırlama ve kaçak akım, yedeklilik çözümleri, elektriksel güvenlik standartları, doğrultucu üniteleri ve kontrol kriterlerinde tercihlerini gösteren bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.2 Ülke bazında kullanılan uluslararası standartlar

Ülke	Akım / Gerilim	Kablo & Kontak	Katener / 3. Ray	Yedeklilik & Topoloji	Güvenlik Standardı	Redresör Tipi
Çin	750 V-1 500 V DC; 25 kV 50 Hz AC	XLPE (Cu/Al) + Cu-Ag kontak	Esnek çift telli; tünelde rijit	Çift trafolu ring besleme	GB/T + EN 50122	12/18 puls diyot/IGBT
Japonya	600/750 V-1 500 V DC; 20 kV AC	JIS XLPE (Cu/alaşım)	Esnek-rijit (tünel)	Çift trafo + otomatik transfer	JIS/IEC 60364 serisi	6/12 puls diyot/IGBT
ABD	600-750 V DC; 25 kV 60 Hz AC	UL-listeli XLPE (Cu/Al)	3. Ray metro; LRT’de OCS	Çift barlı, çift trafolu	NFPA 130, IEEE Std 80	6/12/24 puls SCR/IGBT
Hindistan	750 V DC; 25 kV 50 Hz AC	IS XLPE (Cu/Al) + Al bar	Al taşıyıcı + tünelde rijit	Dual-feed ring besleme	CEA, IEC 60364	12+ puls SCR
Avrupa	750 V DC; 1 500 V DC; 25 kV 50 Hz AC	EN 50288/50395 XLPE (Cu)	Çift telli; tünelde rijit	Çift trafo, ring topoloji	EN 50122-1/50126, IEC	12/24 puls redresör

3.2 Ülkemizde Kullanılan Metro Elektrifikasyon Tasarım

Kriterleri

Metro elektrifikasyon sistemleri dünya genelinde farklılık göstermektedir. Bunun temel sebepleri tarihsel gelişim ve elektrikli motorların geçmişte belirli gerilim ve frekanslarla sınırlı olmasıdır. Günümüzde birçok eski sistem hala kullanılmaktadır, çünkü mevcut sistemleri değiştirmek oldukça maliyetlidir ve her sistemin kendine özgü avantajları vardır.

Günümüzde kullanılan başlıca elektrifikasyon sistemleri şunlardır:

- 750 V DC
- 1500 V DC
- 3000 V DC

Üçüncü ray tercih edilen metro sistemlerinde genellikle 750 V DC kullanılır. Rijit katener tercih edilen sistemlerde ise 1500 V DC tercih edilmektedir.

DC taşıma sistemlerinin en önemli dezavantajlarından biri, elektrik enerjisinin evrensel olarak şebeke sağlayıcıları tarafından alternatif akım (AC) formunda üretilmesidir. Bu durum, DC taşıma sistemlerinde demiryolu işletmecisinin kendi dönüştürme tesislerini kurmasını gerektirir [31]. İletken ray veya katener sistemlerinde çekilen yüksek akım seviyeleri nedeniyle sistem gerilimi önemli dalgalanmalara maruz kalabilmektedir. Bu sorunu minimize etmek amacıyla, hat boyunca yerleştirilen trafo merkezleri belirli aralıklarla konumlandırılmaktadır. Ancak, farklı sistemler karşılaştırıldığında, bu durumun toplam yatırım maliyetlerini artırdığı açıktır.

AC sistemleri daha yüksek gerilimde çalışır. En büyük avantajları, düşük akım nedeniyle gerilim düşümünün daha az olması ve daha az trafo merkezi ihtiyacıdır. Ancak, AC sistemlerinde trafo merkezleri daha büyük alan kaplar ve elektrifikasyon riskleri daha fazladır [32].

Trenlere elektrik iletimi iki yöntemle sağlanır:

- Üçüncü ray sistemi: Rayların arasında iletken bir ray bulunur. Genellikle 750 V veya daha düşük gerilim kullanılır. Düşük gerilim nedeniyle akım yüksektir, bu da enerji kayıplarını artırır ve trafo merkezlerinin sık yerleştirilmesini gerektirir.
- Katener (havaî hat) sistemi: Elektrik, trenin pantografı ile temas eden üstten geçen iletken tellerle iletilir. Üçüncü raya kıyasla daha yüksek hızlara (100 km/h üstü) uygundur.

Katener sistemleri trenin hızı ve gerilim seviyesine göre değişiklik gösterir. Telin düzgün temas etmesi için haberci tel ve askı telleriyle dengelenmiş olması gerekir [33].

3.3 Trafo Merkezi Tasarım Kriterleri

EN 50329 standardı, metro sistemlerinde kullanılan cer trafoların güvenlik ve performans özelliklerini belirler. Bu kapsamda, trafoların aşırı yüklenme, ani gerilim dalgalanmaları ve mekanik titreşim gibi zorlu koşullara karşı dayanıklılığı, izolasyon ve ısı yönetimi özellikleri titizlikle test edilir. Trafonun, metro işletme şartları altında stabil enerji dağıtımını sürdürebilmesi için gerekli performans, verimlilik ve güvenlik gereksinimleri bu standart çerçevesinde sağlanır [33].

EN50163 standardı, metro hatlarında enerji iletiminde kullanılan trafoların nominal kapasite, gerilim regülasyonu ve izolasyon özellikleri gibi performans kriterlerini düzenler. Trafoların dinamik yük değişimlerine uyum sağlayarak kesintisiz enerji dağıtımını gerçekleştirmesi, termal yönetim ve verimlilik gibi unsurlar bu standardın öne çıkan gereksinimlerindedir. Bu sayede, sistem entegrasyonu ve genel enerji dağıtım güvenliği sağlanarak metro hatlarının istikrarlı çalışması desteklenir [34].

VDE 0532 standardı, metro hatlarında kullanılacak cer trafoların Almanya’da geçerli kalite, güvenlik ve performans kriterlerine uygunluğunu garanti altına alır. Bu standart, trafoların izolasyon direnci, ısı performansı, mekanik dayanıklılığı ve kısa devre durumlarında gösterdiği davranış gibi parametreleri titizlikle belirler. VDE 0532’ye uygun trafolar, zorlu çalışma koşullarında yüksek verimlilik ve uzun ömürlü performans sergileyerek metro sistemlerinde güvenli enerji dağıtımını destekler. Elektrifikasyon sisteminin tasarım aşamasında, trafo merkezinin ayrıntılı elektriksel performansının dikkate alınması gerekmektedir [35].

EU No 548/2014 standardı, metro hatlarında kullanılacak cer trafolarının enerji verimliliği, termal performansı ve çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine uygun tasarlanmasını şart koşar. Bu kapsamda, trafoların nominal ve yük kayıplarının minimize edilmesi, ısı kayıplarının kontrol altında tutulması ve böylece yüksek verimlilik elde edilmesi öngörülür. Ayrıca, trafoların gerçek çalışma koşullarında (örneğin, titreşim, ani yük değişimleri ve çevresel etkiler) performansını sürdürebilmesi için gerekli mekanik dayanıklılık, elektromanyetik uyumluluk ve ses seviyelerinin düşük tutulması da önem taşır. EU No 548/2014, aynı zamanda, trafoların uzun ömürlü ve güvenilir çalışmasını destekleyecek şekilde, uygun izolasyon ve soğutma mekanizmalarının entegrasyonunu ve sürdürülebilir tasarım kriterlerinin uygulanmasını zorunlu kılar [36].

Performans, işletmeci firma tarafından belirlenen çekiş yüküne ve operasyonel takvimin sürdürülebilmesi için gerekli olan yedeklilik seviyesine bağlıdır. Ayrıca, gelecekteki sistem genişletmeleri, artan tren yükleri ve farklı tipte araçların kullanımı gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Çekiş trafo merkezi tasarımında dikkate alınması gereken başlıca özellikler şunlardır:

1. Çekiş trafo merkezi gücü
2. Çekiş enerjisi besleme ve dönüştürme düzenlemeleri
3. DC çekiş besleme gerilimi
4. DC çekiş gerilim regülasyonu
5. DC kısa devre arıza akımı karakteristiği
6. Çekiş doğrultucu ünitesinin güç faktörü
7. AC giriş akımında oluşan harmonikler ve giriş besleme gerilimindeki bozulmalar

Tipik olarak, tam yük akımı altında gerilim regülasyonu doğrusal karakteristik içinde % 6'ya kadar değişebilir. Çalışma aralığında belirlenen maksimum ve minimum besleme gerilim değerleri, sistemin performansını etkileyen kritik parametrelerdir [37].

Çekiş Trafo Merkezlerinin Konumlandırılması ve Aralığı Etkileyen Faktörler:

Demiryolu sistemlerinde trafo merkezlerinin en uygun konumlarını belirlemek için detaylı bir analiz gereklidir. Bu amaçla, gerilim düzenlemesi ve kısa devre durumunun hesaplanmasını içeren basit bir matematiksel yaklaşım uygulanmaktadır. Çalışma gerilimi 600V, 750V, 1500V veya 3000V olarak belirlendikten sonra, trafo merkezlerinin kesin yerleşimi teknik performansa göre kararlaştırılmaktadır. Ancak, nihai kararın verilmesinde teknik faktörlerin yanı sıra çeşitli operasyonel ve fiziksel faktörler de dikkate alınmalıdır. Bunlar arasında arazi erişilebilirliği, kavşak ve makas noktalarının konumu, trafo merkezi binasına kadar uzanan yol bağlantısının sağlanması, ray gerilimi ve bakım ekipmanlarının taşınmasını kolaylaştıracak lojistik unsurlar yer almaktadır.

Ekonomik açıdan en uygun trafo merkezi aralıkları genellikle şu şekilde belirlenmektedir:

- 750 V DC için 0,7-1,3 km
- 1500 V DC için 1,3-3,5 km
- 3000 V DC için 4-6 km

Metro hatları ve yük taşımacılığı için kullanılan enerji dağıtım gerilimleri genellikle 1500 V veya 3000 V DC olup, AC elektrifikasyon sistemlerine kıyasla daha az yalıtım ve açıklık gerektirir [30]. Katener sisteminin tasarımında en belirleyici faktörlerden biri mekanik dayanıklılıktır.

Eğer enerji ihtiyacı mevcut katener sisteminin kapasitesini aşarsa, iletim hattı boyunca paralel besleme hatlarının eklenmesi gerekmektedir. Bu paralel beslemeler, akım paylaşımının dengeli olması amacıyla belirli aralıklarla katener sistemine bağlanmaktadır.

3000 V DC sistemleri genellikle ana hat taşımacılığında kullanılmakta olup, daha geniş trafo merkezi aralıklarına olanak tanımaktadır. 750 V DC sistemleri daha çok tramvay hatlarında, 1500 V DC sistemleri ise genellikle şehir içi raylı toplu taşıma sistemlerinde tercih edilmektedir [31].

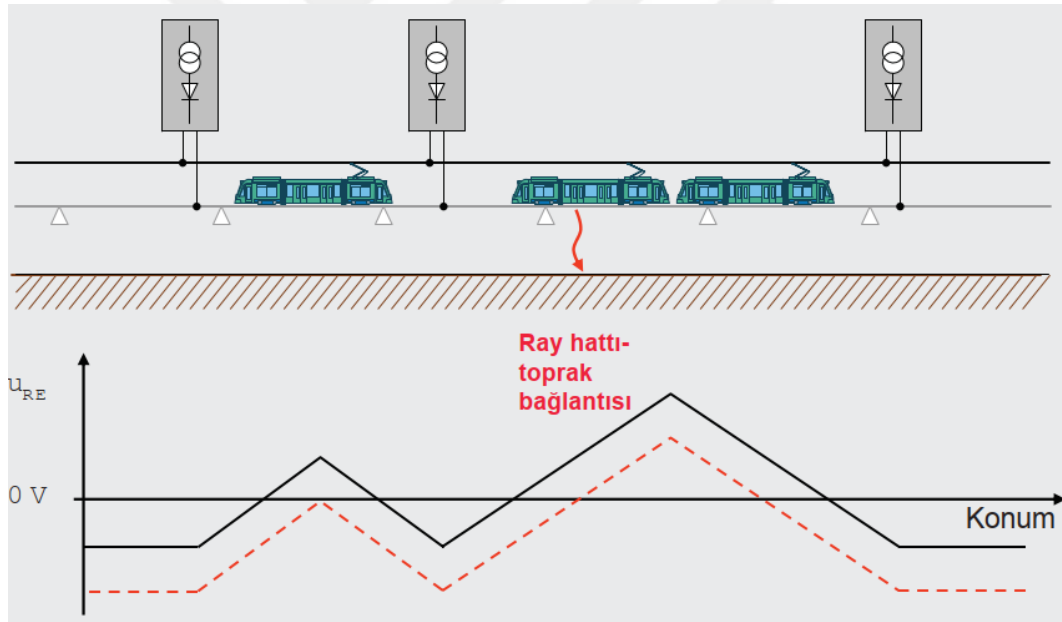
EN 50122-1 standardı, demiryolu sistemlerinde elektriksel güvenliği sağlamak amacıyla DC ray gerilim seviyelerinin üst sınırlarını ve tehlikeli seviyelerini tanımlamaktadır. Bu standart, raylar ve toprak arasındaki potansiyel farkın insan sağlığı ve ekipman güvenliği açısından oluşturabileceği riskleri değerlendirerek, sınır değerleri belirler. Bu bağlamda, ray akım dönüş yollarının ve izolasyon önlemlerinin güvenlik gerekliliklerine uygun olarak tasarlanması ve uygulanması esas alınmaktadır [39].

IEEE 1653.3 standardı ise, tehlikeli ray gerilim seviyelerini dikkate alarak cer gücü (çekiş gücü) trafolarının konumlandırılmasına yönelik kriterler sunmaktadır. Bu standart, güç besleme sistemlerinin planlanmasında güvenli gerilim seviyelerinin korunmasını sağlamak amacıyla cer trafolarının optimum yerleşimini belirlemeye yönelik teknik gereklilikleri içermektedir. Böylece, ray hattı boyunca gerilim düşümü ve tehlikeli potansiyel farkları minimize edilerek, hem yolcu güvenliği artırılmakta hem de sistemin operasyonel verimliliği yükseltilmektedir. Trafo

merkezlerinin yerleşim aralıkları, çekiş yükleri ve iletken sistemindeki maksimum izin verilebilir gerilim düşüşüne bağlı olarak belirlenmektedir. Bu değerlendirme, hem gidiş hem de dönüş iletkenlerindeki gerilim kayıplarının sistem verimliliğini ve tren işletmesini ciddi şekilde olumsuz etkilemeyecek düzeyde tutulmasını gerektirir. DC sistemlerinde genellikle % 15 ila % 30 arasında bir gerilim düşüşüne izin verilirken, daha düşük yüzdelerin tercih edilmesi önerilmektedir [30].

Sistemde kabul edilebilir maksimum gerilim düşüşü değerlendirilirken, özellikle ray dönüş sistemlerinin kullanıldığı durumlarda şu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Besleme uzunluğu arttıkça ray potansiyeli de yükselir. Bu durum, yolcular ve demiryolu personeli açısından güvenlik riskleri oluşturabileceğinden sınırlandırılmalıdır. Aşağıdaki Şekil 3.1’de ray gerilim seviyesinin trenin istasyona yakınlığına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Ray gerilim seviyesinin tren konumuna göre değişimi [39]

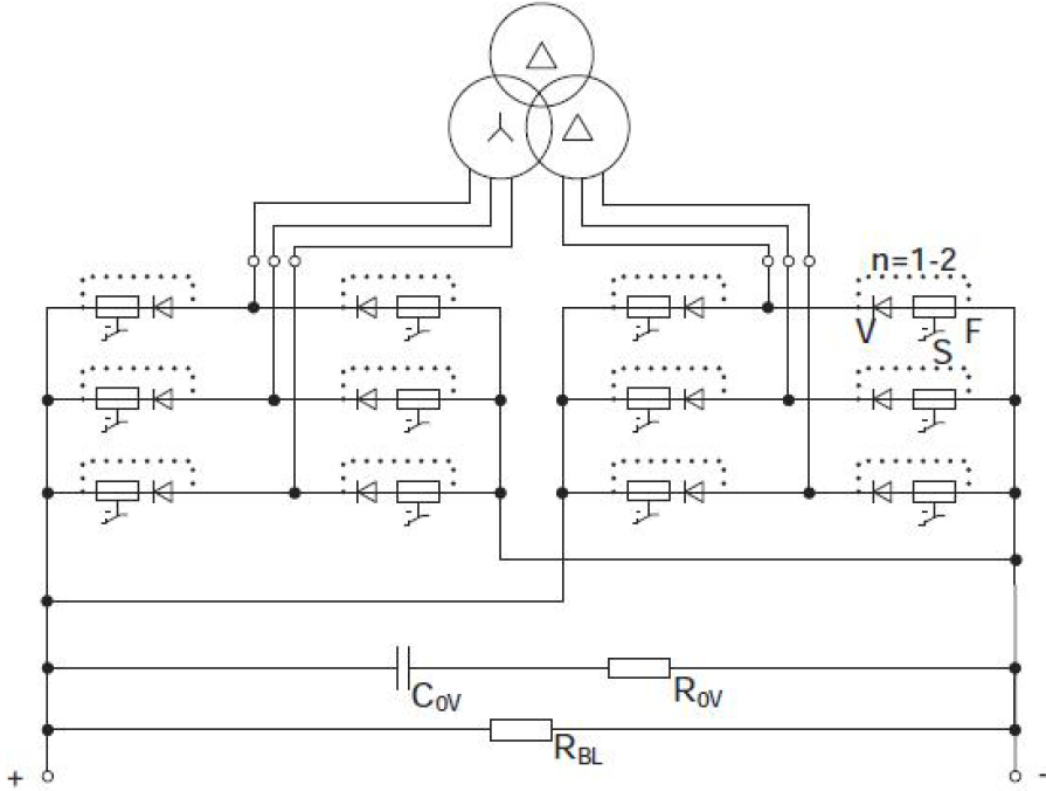
- 750 V DC üçüncü ray sistemlerinde işletme esnasında ray potansiyeli genellikle toprağa göre 30 V civarındadır.
- 1500 V DC katener sistemlerinde işletme esnasında ise ray potansiyeli genellikle 30-60 V arasında değişmektedir.
- Daha yoğun işletme koşulları ve besleme modlarında bu değerlerin üzerine çıkılması mümkündür.

- Ray potansiyelinin artması, aynı zamanda elektro-korozyon riskini de artırmaktadır.

Bu nedenle, trafo merkezleri arasındaki mesafeler belirlenirken hem sistem performansı hem de güvenlik kriterleri dikkate alınmalıdır [39].

3.4 Doğrultucu Tasarımı Kriterleri

IEC 60146 standardı, metro hatlarında kullanılacak DC doğrultucu ünitelerinin güvenlik, performans ve çevresel etkilere karşı dayanıklılık açısından tasarlanmasını öngörür. Bu standart kapsamında, doğrultucuların nominal ve maksimum gerilim/akım değerleri, ısıl performansları, kısa devre durumlarına karşı koruma mekanizmaları ve harmonik bozulma gibi elektriksel parametreleri belirlenir. Class VI çalışma tipi kapsamında, doğrultucu ünitelerinin aşırı yük, ani gerilim dalgalanmaları ve çevresel etkilere (titreşim, sıcaklık değişimleri gibi) karşı dayanıklı, güvenli devre dışı bırakma ve arıza durumlarında sistemin genel güvenliğini bozmadan çalışmaya devam edebilecek şekilde tasarlanması esastır. Aşağıdaki Şekil 3.2’de 12 darbeli doğrultucu devresi bulunmaktadır.



Şekil 3.3 12 pulse doğrultucu devresi [40]

EN50328 standardı, metro hatlarında kullanılan DC doğrultucu ünitelerinin sistem verimliliği ve güvenliği açısından detaylı gereksinimleri ortaya koyar. Bu standarda göre, Class VI çalışma tipinde seçilecek doğrultucular; yüksek enerji verimliliği, düşük harmonik bozulma, etkili ısınma kontrolü ve elektromanyetik uyumluluk gibi kriterlere sahip olmalıdır. Ayrıca, arıza durumlarında güvenli devre dışı bırakma, mekanik titreşimlere ve çevresel zorluklara (sıcaklık, nem gibi) karşı dayanıklılık sağlanarak, metro sistemlerinde kesintisiz ve emniyetli bir performans sergilemeleri hedeflenmektedir.

Doğrultucuların temel işlevi, üç fazlı alternatif akımı doğru akıma dönüştürmektir. Geçmişte cıva ark doğrultucuları kullanılmış olsa da, günümüzde genellikle doğal havalandırılmalı silikon doğrultucular tercih edilmektedir. Silikon plaka alanının artması sayesinde, neredeyse kısa devreye karşı dayanıklı doğrultucular geliştirilmiştir [41].

Doğrultucuların doğal havalandırma ile çalışması, hareketli parçaların bulunmamasını sağlamakta ve bu durum güvenilirliği artırırken, işletme maliyetlerini düşürmekte ve bakım ihtiyacını en aza indirmektedir. Disk tipi diyot doğrultucular, düşük iletim kayıpları sayesinde oldukça verimli olup, yüksek sıcaklık dalgalanmalarına, aşırı akıma ve ters aşırı gerilimlere karşı dayanıklıdır.

Kapsül/disk yapısının kullanımı, geniş bir ortalama akım aralığına olanak tanımakta ve her kolda minimum sayıda bileşenin paralel bağlanmasını sağlamaktadır.

Besleme sisteminin gerilim seviyesi ve transformatör-doğrultucu düzenlemesi, karakteristik DC çıkış gerilimini belirler. Doğru akım gerilimi, tren işletme gereksinimlerine uygun olarak 650 V, 1500 V veya 3000 V DC olacak şekilde tasarlanmalıdır [40].

Çekiş güç sisteminin darbe karakteristiği, öncelikle transformatör sargı düzeni ve doğrultucu konfigürasyonu tarafından belirlenir. Üç fazlı bir AC besleme sisteminde, 6, 12 ve 24 darbeleri DC çıkış gerilimi sağlamak amacıyla farklı transformatör bağlantı düzenleri tercih edilebilir.

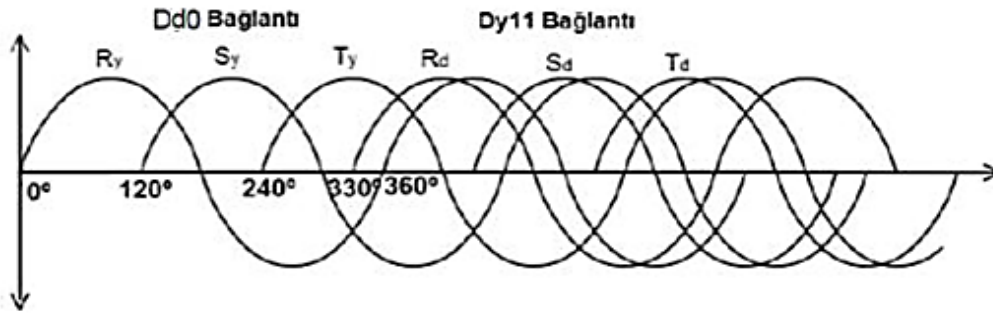
Bazı sistemlerde, farklı faz kaymalarına sahip iki ayrı doğrultucu ve transformatör sargıları kullanılarak alternatif yıldız/üçgen bağlantılar oluşturulabilir.

12 darbeleri bir doğrultucu, faz kaydırılmış ve ayrı beslenen iki adet 6 darbeleri sistemin paralel bağlanması ile elde edilebilir. Bu düzenleme, besleme sisteminde gerekli

30° faz kaymasını sağlayarak 12 darbeli bir dalgalanma oluşmasına olanak tanır. Aşağıdaki Şekil 3.3'te cer trafolarının bağlantı grubuna göre faz farkı bulunan sekonder ve tersiyer bağlantıları ile 30° faz kaymasının sağlandığı AC dalga grafiği gösterilmiştir.

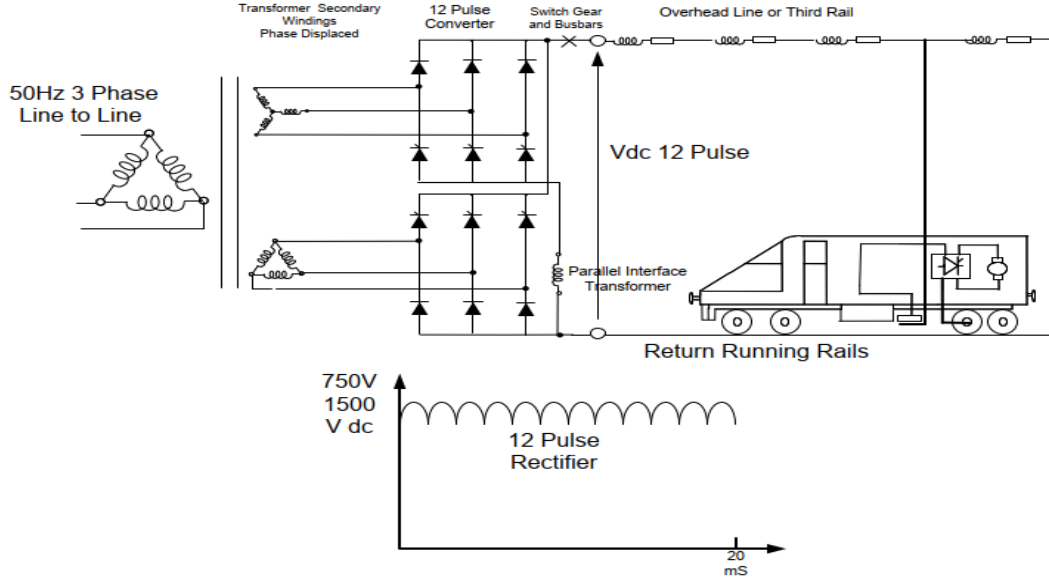
Primer Sargı Bağlantısı	Sekonder Sargı Bağlantısı	Bağlantı Grubu	Faz Farkı
Üçgen Bağlantı	Üçgen Bağlantı	Dd0	0°
Yıldız Bağlantı	Üçgen Bağlantı	Yd11	330°
Üçgen Bağlantı	Yıldız Bağlantı	Dy11	330°
Yıldız Bağlantı	Zig-Zag Bağlantı	Yz5	150°

Grup Açısı (Derece °)	0	150	180	330
Grup Açısı Numarası	0	5	6	11



Şekil 3.4 Dd0Dy11 cer trafosunun sekonder çıkış sinyali [40]

Bu düzenleme, besleme sisteminde gerekli 30° faz kaymasını sağlayarak 12 darbeli bir dalgalanma oluşmasına olanak tanır.



Şekil 3.5 12 pulse doğrultulmuş sinyal ve devre şematığı [31]

Transformatörün tasarım ve üretim aşamalarında sargıların düzeni, kısa devre reaktansı, komütasyon reaktansı ve sargı direncinden kaynaklanan yük kayıplarını belirler. Bu tasarım parametreleri;

- DC kısa devre arıza akımı seviyesini,
- DC gerilim regülasyon seviyesini,
- Transformatör verimliliğini,
- Trafo ve doğrultucu güç faktörünü,
- Besleme tarafında oluşan harmonik seviyesini

doğrudan etkilemektedir [40].

3.4.1 Doğrultucu Koruma Sistemi

Doğrultucu koruma sistemi, elektriksel arızaların donanım bileşenlerine zarar vermesini önlemek amacıyla çeşitli koruma yöntemlerini içermektedir.

3.4.1.1 Kısa Devre Koruması

Doğrultucular, aşırı akım ve kısa devre durumlarına karşı termal röleler ve aşırı akım zaman röleleri ile korunmaktadır. Bu röleler, doğrultucunun AC girişini keserek sistemin aşırı yüklenmesini veya hasar görmesini önler.

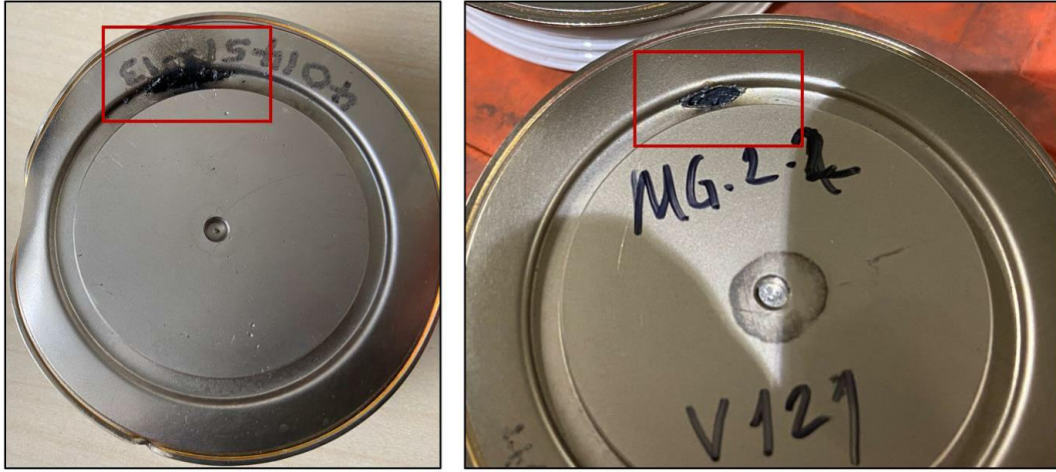
3.4.1.2 İç Kısa Devreler

Doğrultucu içerisinde kısa devre, doğrultucu kollarından birinin arızalanması sonucunda meydana gelir. Bu durum, transformatörde iki fazlı bir arıza akımı oluşturur ve arızalı doğrultucu kolunda ters akım akışına neden olur. Arıza, hat tarafında bulunan diyot sigortası tarafından kesilir ve arızalı diyot izole edilir. Diyot sigortasında yer alan bir mikro anahtar, sigortanın patladığını belirleyerek sistemin durumu hakkında bilgi sağlar.

Diyotun akım kapasitesi yeterince yüksekse, bazı durumlarda ayrı bir sigorta kullanılması gerekmeyebilir.

3.4.1.3 Aşırı Gerilimler

AC besleme hattından veya DC çekiş sistemi üzerinden kaynaklanan aşırı gerilimler genellikle güç sisteminin anahtarlanması veya rejeneratif fren sonucu ortaya çıkar. Aşağıdaki Şekil 3.5'te aşırı gerilimden delinmiş diyotların görüntüsü paylaşılmıştır.



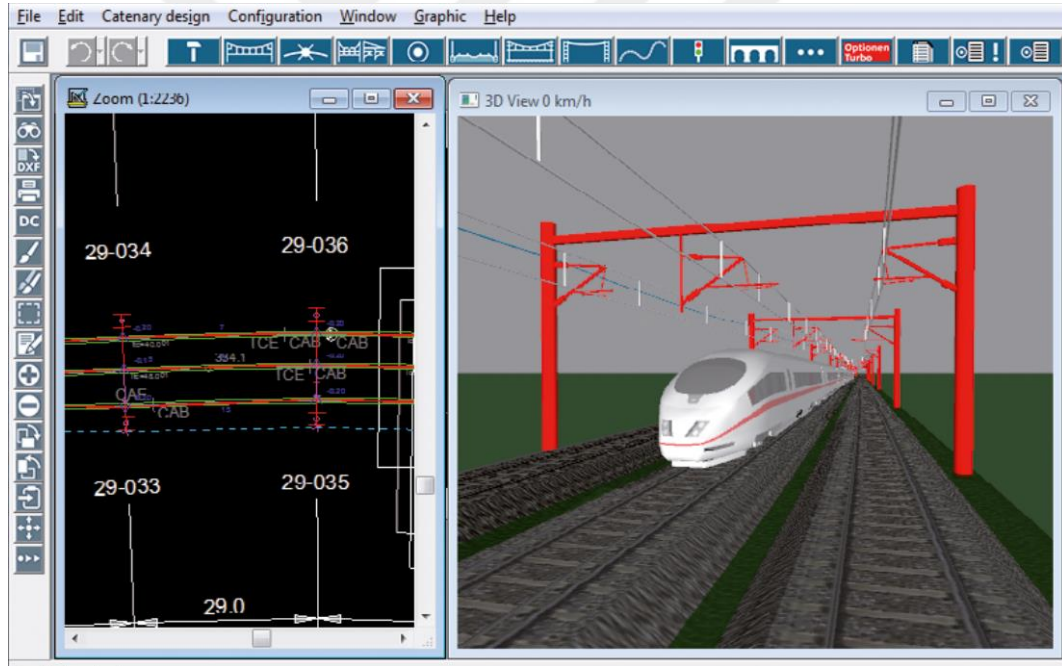
Şekil 3.6 Aşırı gerilimde delinen doğrultucu ünite diyotları [42]

Bu aşırı gerilimler, doğrultucunun DC tarafında bulunan direnç-kapasitör ağı sayesinde zayıflatılır.

Ayrıca, doğrultucu ve besleme kablolarının yıldırımdan korunması gerekmektedir. Bunun için açık hatta bulunan katener hatlarına bağlı aşırı gerilim sınırlayıcıları (parafudrlar) kullanılarak koruma sağlanır [26].

3.5 Katener Hattı Tasarımı

Havai hat sisteminin tasarımı, güç besleme sisteminin elektriksel karakteristikleri ile uyumlu olmalıdır. Bu kapsamda, EN 50163 standardına göre belirlenen gerilim ve frekans aralığı ile EN 50388 standardına uygun pantograf üzerindeki ortalama faydalı gerilim ve kısa devre akımı detayları dikkate alınmalıdır. Kısa devre süresi, EN 50633 standardına göre belirlenen koruma tasarımına uygun olmalı ve yedek koruma mekanizması kullanılıyorsa işletme süresi ile uyumlu olmalıdır [33]. Sürekli, arıza ve kısa devre durumları için gerekli akım değerleri belirlenmeli ve alternatif akım (AC) için empedans, doğru akım (DC) için ise direnç sınır değerleri sağlanmalıdır. Bu değerler, pantograf gerilim profiline uyum sağlamak, elektriksel koruma sisteminin doğru çalışmasını temin etmek ve güvenlik sınırlarına uygun etkin dokunma gerilimi seviyelerini korumak amacıyla belirlenmelidir. Şekil 3.6'da Sicat katener sistem tasarımı ekran görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 3.7 Katener tasarım programı Sicat ekran görüntüsü [43]

İletken ray veya katener güç besleme sistemleri, belirlenen gerilim sınırları içinde çalışacak şekilde tasarlanmakta olup, çekiş ünitelerinin sağlanan gerilimi güvenli bir şekilde yönetebilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, çekiş motorları ve kontrol ekipmanlarının, enerji besleme ağının maksimum çalışma gerilimine uygun şekilde yalıtılmış olması zorunludur [38].

DC sistemlerinde kullanılan çekiş motorları genellikle 600/750 V için tasarlanmakta ve 600/750 V DC enerji beslemelerinde paralel bağlantılı olarak çalıştırılmaktadır. 1500 V DC sistemlerinde ise motorlar genellikle 750 V gerilime uygun olarak sarılmakta ve seri-paralel çiftler halinde bağlanmaktadır. 3000 V DC besleme sistemlerinde ise motorlar genellikle 1500 V için sarılmakta ve tam gerilimde iki motor seri bağlanarak çalıştırılmaktadır. Bu nedenle, 3000 V DC sistemlerinde kullanılan motorlar daha büyük çaplı olup, çoklu üniteli araçlarda düşük tabanlı gövde altına yerleştirilmesi daha zor olmaktadır. Tarihsel olarak bakıldığında, DC besleme gerilim seviyeleri genellikle DC çekiş motorlarının kontrol gereksinimlerini karşılamak üzere belirlenmiştir. Tablo 3.3'te kontak telinin EN 50119 standardına göre 90° sıcaklıkta akım taşıma kapasitesini ve 40° sıcaklıkta taşıyıcı ray ile beraber akım taşıma kapasitesini göstermektedir [34].

Tablo 3.3 EN50119 standardına göre kontak teli akım taşıma kapasiteleri

Kontak teli EN 50119	Telin 90 °C nihai sıcaklığında sürekli akım taşıma kapasitesi	Kontak teli ile birlikte tüm sistemin iletken rayının sürekli akım taşıma kapasitesi
AC / BC 80 Cu-ETP / CuAg0.1	401 A	3301 A
AC / BC 100 Cu-ETP / CuAg0.1	465 A	3365 A
AC / BC 107 Cu-ETP / CuAg0.1	484 A	3384 A
AC / BC 120 Cu-ETP / CuAg0.1	523 A	3423 A
AC / BC 150 Cu-ETP / CuAg0.1	605 A	3505 A

Geçmişte, DC besleme sistemlerinin AC sistemlerine kıyasla en büyük avantajı, daha az karmaşık bir çekiş kontrol mekanizması gerektirmesiydi. Ancak, yüksek güçlü GTO (kapı kapamalı tristörler), IGBT (yalıtlımlı kapılı bipolar transistörler) ve mikroişlemci teknolojilerinin gelişimiyle birlikte üç fazlı tahrik sistemleri hem AC hem de DC elektrifikasyon sistemlerinde yaygınlaşmaktadır. Üç fazlı tahrik sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, DC gerilim değeri çekiş mühendisliği açısından bir zorunluluk olmaktan çıkmıştır. Çekiş giriş konvertörlerinin inverter tahrik sistemine iletilen DC bağlantı gerilimini ayarlayabilmesi sayesinde, yeni nesil üç fazlı tahrik sistemleriyle farklı besleme gerilim seviyelerinin kullanılması mümkün hale gelmiştir [33].

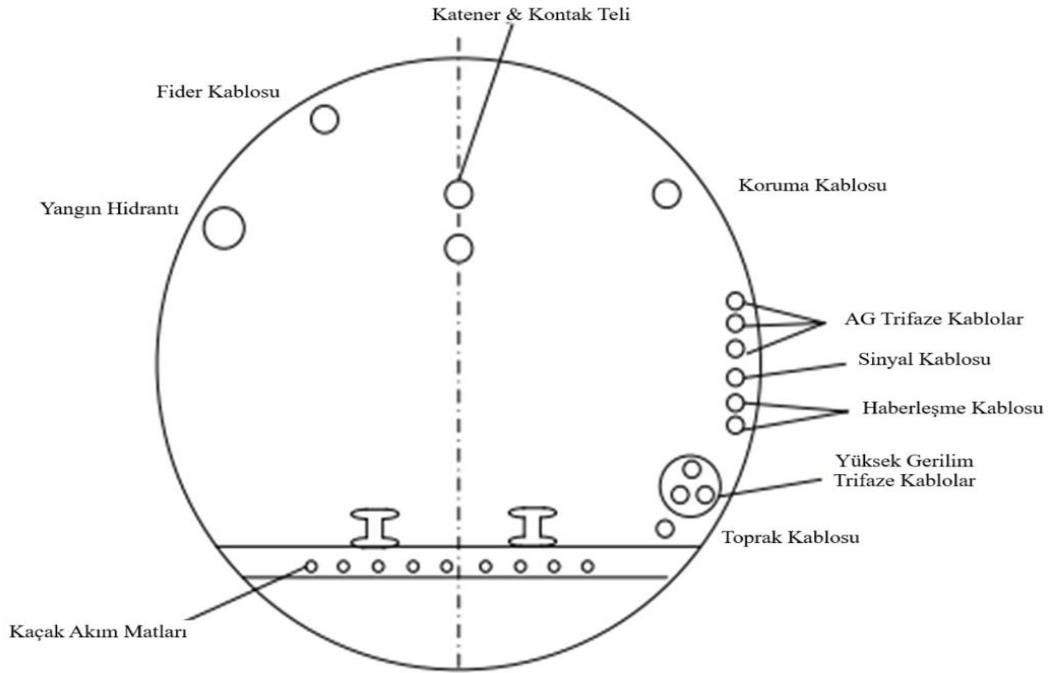
3.5.1 Katener Hattı ile İlişkili Manyetik Alanlar

- Trenlerin geçişi sırasında manyetik alan 1-100 A/m arasında değişir.
- Kısa devre durumlarında, manyetik alan seviyesi 600 A/m'ye kadar çıkabilir.

Avrupa Standartları (EN 61000-2 ve BS EN 50121), DC manyetik alanlarının veya güç frekansı harmoniklerinin elektronik cihazlara olan etkileri konusunda net sınırlar belirlememektedir.

Güç frekansı harmoniklerinden kaynaklanan manyetik alanlar, demiryolu ortamında önemli bir etkiye sahip olabilir.

- Bu harmonik alanlar, sistem çevresindeki elektrikli ekipmanları etkileyebilir.
- Ayrıca, güç sisteminin ürettiği harmonik bileşenler, hat kenarında bulunan kablolara endüklenebilir ve istenmeyen etkiler oluşturabilir



Şekil 3.8 İletkenlerin ve ray altı donatının gösterildiği tünel kesiti [44]

3.6 İletken Seçim Kriterleri

Metro hatları DC kabloları seçiminde IEC 60332-3-24 ve IEC 60502-1 standartları aranmaktadır. IEC 60332-3-24, kabloların yangın durumunda alev yayılımını sınırlama yeteneğini test eden bir standart olup, metro hatlarında kullanılan güç

kablolarının minimum CAT C sınıfı özellikte olmasını şart koşar. Bu kriter, kabloların yangın anında alevin yayılmasını kontrol altına alarak yangının büyümesini engelleyebilmesini sağlar. Böylece, özellikle yer altı tesislerinde ve kapalı alanlarda meydana gelebilecek yangın durumlarında, kabloların güvenlik ve performans açısından kritik bir rol oynaması garanti altına alınmış olur.

IEC 60502-1 standardı, güç kablolarının elektriksel, mekanik ve termal performans özelliklerini belirlerken; kabloların işletme süresince karşılaşılabileceği maksimum gerilim artışları, mekanik darbeler ve aşırı yüklenme koşullarına dayanıklı olmalarını öngörür. Bu kapsamda, kabloların 1,8/3 kV izolasyon seviyesinde imal edilmiş, ekranlı yapıda olması ve yer altı tesislerinde darbeli yük şartlarına uygunluğu esas alınır. Bu özellikler, metro hatlarında kabloların aşırı ısınma veya gerilim düşümü gibi problemlere yol açmadan, sürekli ve güvenilir performans göstermesini sağlar [45]. Şekil 3.8'de metro hattında tava üzerinde döşenmiş kablolar gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Tavaya döşenmiş DC kablolar [4]

İletken sisteminin kesit alanı arttıkça, elektriksel direnç azalır ve belirli bir yük altında izin verilebilecek gerilim düşüşü için daha uzun besleme mesafeleri elde edilebilir. Ancak, iletken kesit alanı büyüdükçe yatırım maliyeti de doğrudan artış gösterir. Ayrıca, kesit alanı büyüdükçe ağırlık da artar ve özellikle katener sistemlerinde taşıyıcı yapılara binen yük yükselir.

Yere monteli enerji toplama sistemlerinde (örneğin üçüncü ray sistemlerinde) iletken rayın kesit alanı genellikle taşıyıcı ray ile benzer boyuttadır. Ancak, hat

üzerindeki yoğun bölgelerde veya kavşak noktalarında daha büyük kesit alanına sahip iletkenler tercih edilebilir.

DC katener sistemlerinde, kesit alanını sınırlayan en önemli faktörlerden biri, her bir taşıyıcı izolatörün taşıyabileceği yüküdür. Bu nedenle, mekanik dayanıklılık belirleyici olurken, DC sistemlerinde elektriksel iletkenlik de dikkate alınması gereken temel bir unsurdur. Hat akımı, katener sisteminin akım taşıma kapasitesini aştığında, destek yapılarına ek besleme kabloları yerleştirilerek enerji iletimi sağlanmalıdır [46].

3.7 Geri Dönüş Akımı Sistemi

EN 50122-1:2022 standardına göre ray geri dönüş devresi (negatif dönüş devresi), elektrik çekiş sistemlerinde akımın güvenli ve kesintisiz şekilde geri dönebilmesi için sürekli, düşük empedanslı ve güvenilir bir yol sunmalıdır. Standardın 3.3 bölümünde tanımlanan "return circuit" kavramı, doğrudan temasın mümkün olduğu alt kümesini ifade eder. Bu bağlamda, raylar ya da özel tasarlanmış geri dönüş iletkenleri, akımın minimum gerilim düşüşüyle ve yüksek iletkenlikte taşınmasını sağlayacak şekilde, tüm hat boyunca kesintisiz bağlantılarla ve uygun çift yönlü (rail-to-rail, track-to-track) bağlantılarla donatılmış olmalıdır [47].

Ayrıca, EN 50122-1 standardı negatif geri dönüş devresinde çevresel ve mekanik etkilere karşı dayanıklılık, korozyon direnci ve stray (kaçak) akımların kontrolü gibi kriterlere de vurgu yapar. Devrenin tasarımında, özellikle ray eklerinde ve bağlantı noktalarında düşük dirençli bağlantıların sağlanması, sistemin genel topraklama ve eş potansiyel bağlanması şemasına uygun olarak gerçekleştirilmesi gerekir. Böylece, hem çekiş sistemlerinin güvenilir çalışması hem de elektriksel şok risklerinin minimize edilmesi sağlanır. Bu gereklilikler, standardın elektrik güvenliği ve koruyucu önlemler konusundaki hükümlerine dayanmaktadır.

Demiryolu sistemlerinde genellikle çeker akımın dönüş yolu, tren tekerlekleri ve raylar aracılığıyla DC trafo merkezine yönlendirilir.

Eğer raylar, traverslerden yalıtılmamışsa, akım belirli noktalardan dışarı çıkabilir ve başka bir noktadan geri dönebilir (kaçak akım).

Modern demiryolu sistemleri, bu tür kaçak akımları önlemek ve metal yapıların korozyona uğramasını engellemek için yüksek yalıtımlı raylar kullanır [42].

- Raylar, Avrupa Standardı EN 50122-2'ye uygun olarak traversler veya beton pedler üzerinde yalıtım pedleri ile yalıtılmaktadır.
- Açık hat kesitlerinde yalıtımsız raylar için tipik değer 0,5 S/km, kapalı kesitlerde ise 2,5 S/km olarak belirlenmiştir.
- Ekstra yalıtım malzemeleri (ray montaj pedleri veya polimerik yalıtım) kullanılarak yalıtım seviyesi artırılabilir. Ancak, yalıtım malzemeleri zamanla aşınabilir ve yalıtım seviyesi düşebilir.
- Kapalı hat kesitlerinde (örneğin, gömülü ray sistemlerinde) yalıtım seviyesi daha da artırılabilir.
- Ray balastının (özellikle ıslak olduğunda) raylara temas etmesi, yalıtım seviyesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, hat bakım çalışmalarında ray ile balast arasındaki teması en aza indirmek önemlidir [48].

3.8.1 Ray Potansiyelleri ile İlgili Riskler

Rayların toprak ile yalıtılması, kaçak akımları en aza indirir. Ancak bu, raylar ile toprak arasında farklı gerilim seviyelerinin oluşmasına neden olur.

Bu gerilim farklılıkları, yolcular ve demiryolu personeli için potansiyel bir elektrik çarpması riski doğurabilir.

- Tehlikeli temas gerilimlerini azaltmak için, ray belirli bir gerilim seviyesini aşarsa toprağa kısa devre edilerek gerilim düşürülebilir.
- Bu topraklama mekanizması, hızlı algılama ve otomatik müdahale sistemleriyle çalışmalıdır.
- Ray potansiyeli belirli bir sınırı aştığında, tristör, GTO (Gate Turn-Off) cihazı veya kontaktör kullanılarak gerilim kısa devre edilerek sıfırlanabilir.

Ray potansiyelleri, tren raylarında oluşan elektriksel potansiyel farkları nedeniyle hem insan güvenliği hem de altyapının korunması açısından ciddi riskler doğurabilir. EN 50122-1, EN 50122-2 ve EN 50122-3 standartları, bu risklerin minimize edilmesi için uygulanması gereken temel prensipleri belirler. Bu standartlar; rayların uygun izolasyonu, topraklama, geri dönüş devresi bütünlüğü

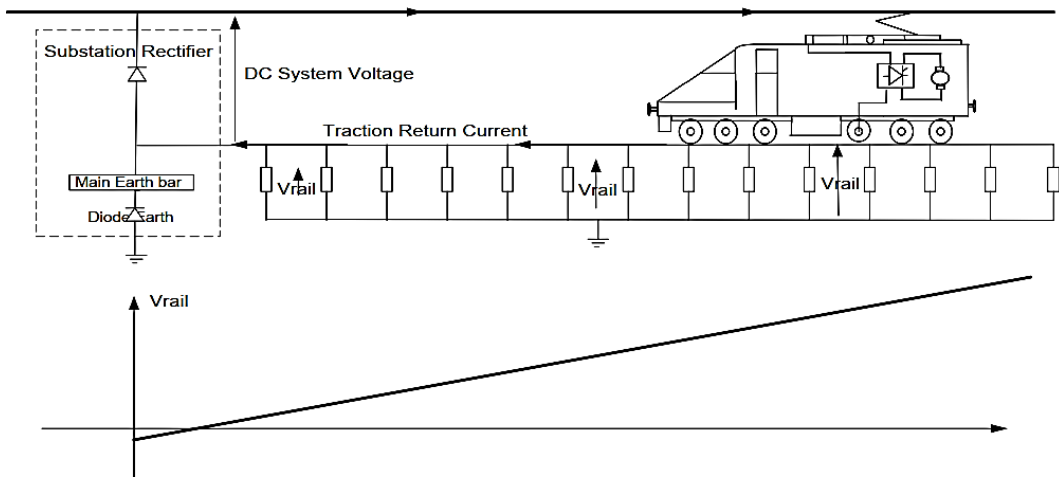
ve AC-DC etkileşimleri çerçevesinde, stray akımların neden olabileceği tehlikeleri önlemeye yönelik tasarım, izleme ve ölçüm kriterlerini ortaya koyar [48].

Aşağıdaki maddeler, ray potansiyelleriyle ilgili risklerin değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken temel kriterlerdir:

- **İzolasyon Kalitesi:** Rayların, toprakla doğrudan temasını engelleyecek şekilde yalıtılmış olması; böylece stray akımların ve tehlikeli potansiyel farklarının oluşmaması [47].
- **Stray Akım Ölçütleri:** Tek ray hattı başına ortalama stray akımın I_{max} değerinin $2,5 \text{ mA/m}$ 'i aşmaması; bu değer, çift raylarda ve daha fazla ray içeren sistemlerde uygun katsayılarla değerlendirilmelidir.
- **İletkenlik:** Ray ile toprak arasındaki iletkenliğin açık formasyonlarda $\leq 0,5 \text{ S/km}$, kapalı formasyonlarda ise $\leq 2,5 \text{ S/km}$ değerlerinin altında tutulması.
- **Periyodik İzleme:** Ray potansiyelindeki değişikliklerin, periyodik ve/veya sürekli ölçümlerle izlenmesi; böylece izolasyon bozulmaları, stray akım artışları veya diğer risk faktörleri erken tespit edilerek gerekli önlemlerin alınması [47].

3.9 Metro Hattı Topraklama Sistemleri

Bu yöntemde, DC çekiş trafo merkezinde bir diyot kullanılarak raylar, trafo merkezinin lokal topraklamasına bağlanır.



Şekil 3.11 Diyotlu topraklama sisteminde ray potansiyeli [23]

Bu sistemin temel özellikleri şunlardır:

- Raydan kaçak akım olmadığında, kaçak akımlar minimum seviyede kalır.
- Rayda kaçak akım oluşursa, diyot bu akımı trafo merkezine geri yönlendirir.
- Diyot, uzak topraklama noktalarına tek yönlü bir bağlantı sağlar.
- Negatif ray potansiyeli oluştuğunda, diyot iletken hale gelir (özellikle trafo merkezlerinde ve rejeneratif frenleme yapan trenlerde).

Ancak rejeneratif frenleme yapan trenlerin negatif ray potansiyeli üretmesi, diyotun sürekli iletimde kalmasına neden olabilir. Bu, diyot topraklama sisteminin bazı durumlarda verimli çalışmasını zorlaştırabilir [49].

3.9.1 Metro Hatlarında Yıldırımdan Koruma

BS EN 50122-1 standardı, demiryolları için özel yıldırımdan korunma tasarımlarını içermediğinden, aşağıdaki standartlardan yararlanılmıştır:

- BS EN 50522: 1 kV AC'yi aşan güç tesislerinin topraklaması
- BS EN 62305: Yıldırımdan korunma – Bölüm 3: Yapıların fiziksel zarar görmesi ve yaşam güvenliği

Eğer yıldırım sınırlayıcı, ray topraklama sistemine bağlanıyorsa, yakın çevredeki sinyalizasyon, telekomünikasyon ve alçak gerilim (LV) toprak bağlantılarının ray sistemine doğrudan bağlanmaması gerekmektedir.

Bu, olası gerilim farklarını ve elektromanyetik girişimi önlemek için kritik bir önlemdir [50 – 51].

3.10 Enerji Kalitesi ve Kompanzasyon Sistemi

Metro hatlarında kullanılan reaktif güç kontrol sisteminde, elektrik piyasası müşteri hizmetleri yönetmeliği ve EN 50160, EN 61000-4-30, EN 61000-4-7, EN 61000-4-15 standartlarına uygunluk talep edilmektedir. Kurulacak sistem, işletmenin tüm koşullarında (yüksek yük veya yüksüz durumlar dahil) rezonans riski oluşturmadan çalışabilmeli, 0.1 ms örnekleme hızına sahip enerji analizörleri ile AG panolarındaki sistem bazlı tüketimleri (HVAC, aydınlatma, yürüyen merdiven, UPS vb.) ayrı ayrı ölçmeli, harmonik analizi yapabilmeli ve değerler limit aşımı

gösterdiğinde anında uyarı verebilmelidir [52 – 53]. Şekil 3.11’de kompanzasyon sisteminin görünümü sunulmuştur.



Şekil 3.12 Kompanzasyon sistemi [38]

4

MAHMUTBEY – YILDIZ METRO HATTININ ELEKTRİFİKASYON SİSTEMİNİN TASARIMI

Kent içi ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliğinde önemli bir yer tutan metro hatları, enerji altyapılarının etkinliği ve verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu kapsamda, İstanbul'un Avrupa yakasında yer alan ve şehir içi ulaşım ağına entegre edilen M7 Mahmutbey–Yıldız Metro Hattı, elektrikli raylı sistemlerde modern elektrifikasyon teknolojilerinin uygulanabilirliğini gösteren örnek bir projedir. Hat boyunca yer alan istasyonlar, yolcu yoğunluğu, topografya ve çevresel faktörler doğrultusunda elektriksel altyapının tasarımı detaylı mühendislik analizleri gerektirmektedir. Bu bağlamda; trafo merkezlerinin sayısı ve konumlandırılması, doğru akım (DC) kabloların kesitleri, seçilen katener tipi ve doğrultucu sistemler, hem sistem güvenliği hem de enerji verimliliği açısından belirleyici parametrelerdir [54, 55].

Bu bölümde, Mahmutbey–Yıldız metro hattının elektrifikasyon sistemine ait tüm teknik bileşenler sistematik bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Elektrik enerjisinin üretiminden trenlere iletimine kadar olan süreçte; trafo merkezlerinin ve kablo hatlarının kapasite planlaması, kaçak akım izleme sistemleri, iç ihtiyaç transformatörleri ve enerji analizleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, acil durum senaryoları da dikkate alınarak ETAP yazılımı ile gerçekleştirilen yük akışı ve sistem simülasyonları aracılığıyla, hat üzerindeki enerji kayıpları, trafo yüklenmeleri, kablo üzerinde oluşan aktif güç kayıpları analiz edilmiştir. Bu analizlerin sonuçları, sadece teknik uygunluk açısından değil, aynı zamanda sistemin ilk yatırım ve işletme maliyetleri bağlamında da optimizasyon fırsatlarını ortaya koymakta; metro elektrifikasyon projelerinde bütüncül tasarım yaklaşımının gerekliliğini vurgulamaktadır.

4.1 M7 Mahmutbey – Yıldız Metro Hattı

M7 hattı, İstanbul'un artan ulaşım ihtiyacına cevap vermek amacıyla, 2010'lu yılların sonlarında planlama aşamasına alınmıştır. Şehrin özellikle batı bölgelerindeki ulaşım sorunlarını hafifletmek üzere hazırlanan projede, modern

toplu taşıma anlayışı benimsenmiştir. Planlama aşamasını takiben, projenin fizibilite çalışmaları ve detaylı tasarım süreçleri tamamlanmış; inşaat çalışmalarına başlanmıştır.

Avrupa yakasında faaliyete geçen ilk tam otomatik sürücüsüz metro sistemi olan M7 Yıldız-Mahmutbey hattı, tamamlandığında Kabataş ile Esenyurt arasında hizmet verecektir. İlk etapta devreye alınan Mecidiyeköy-Mahmutbey bölümü, Şişli, Kağıthane, Eyüpsultan, Gaziosmanpaşa, Esenler ve Bağcılar ilçelerinde yaşayan yaklaşık 3 milyon kişiye ulaşmaktadır. Hattın ikinci etapında yer alan Fulya ve Yıldız istasyonları, 2 Ocak 2023 tarihinde hizmete girerek Beşiktaş ilçesi ile entegrasyonu sağlamıştır.

4.1.1 İstasyon Yapıları

M7 Yıldız-Mahmutbey metro hattı, çeşitli toplu taşıma sistemleriyle entegre olacak şekilde tasarlanmıştır:

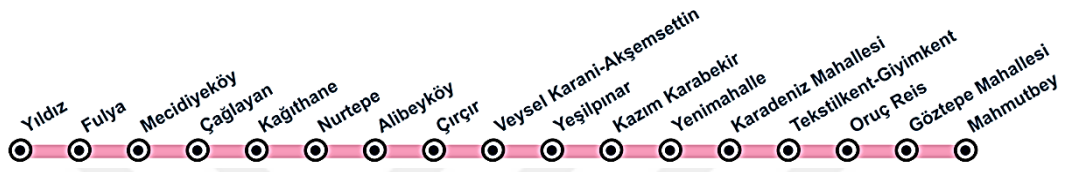
- Mecidiyeköy İstasyonunda M2 Yenikapı-Hacıosman Metro Hattı ve metrobüs hattı ile,
- Alibeyköy İstasyonunda T5 Eminönü-Alibeyköy Tramvay Hattı ile,
- Kağıthane İstasyonunda M11 Gayrettepe-İstanbul Havalimanı Metro Hattı ile,
- Karadeniz Mahallesi İstasyonunda T4 Topkapı-Mescid-i Selam Tramvay Hattı ile,
- Mahmutbey İstasyonunda M3 Kirazlı-Kayaşehir Merkez Metro Hattı ile,

bağlantı sağlanmaktadır [53].

Tablo 4.1’de M7 hattı hakkında işletme bilgileri sunulurken, istasyon şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

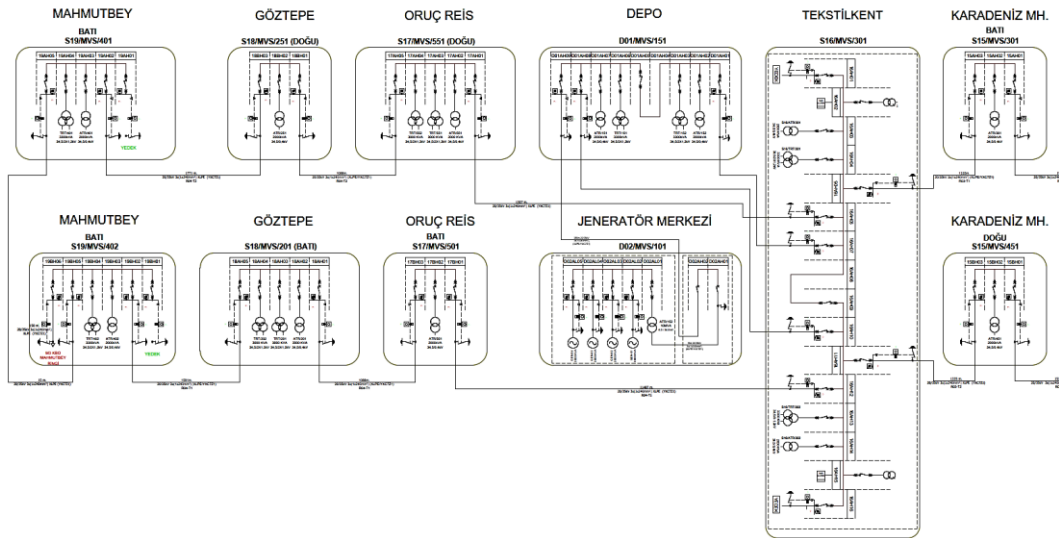
Tablo 4.1. M7 Hattı işletme bilgileri

İşletme Bilgileri	
Hat Uzunluğu:	20 km
İstasyon Sayısı:	17
Araç Sayısı:	80
Tek Yönde Sefer Süresi:	36 dakika
İşletme Saatleri:	06.00 - 00.00
Sefer Sıklığı (açılıшта):	6 dakika (pik saatte)
Araç Yolcu Kapasitesi:	2.160 (1 set)
Tek Yönde Saatlik Yolcu Taşıma Kapasitesi:	70000
Günlük Ortalama Yolcu Sayısı:	80000
Günlük Sefer Sayısı:	176 Sefer/Tek Yön



Şekil 4.1 M7 hattı istasyon şeması [55]

Şekil 4.2’de M7 hattının Mahmutbey ile Karadeniz istasyonları arasındaki OG enerji dağıtım sisteminin tek hat şemasını göstermektedir.



Şekil 4.2 M7 hattı kısmi OG tek hat şeması [55]

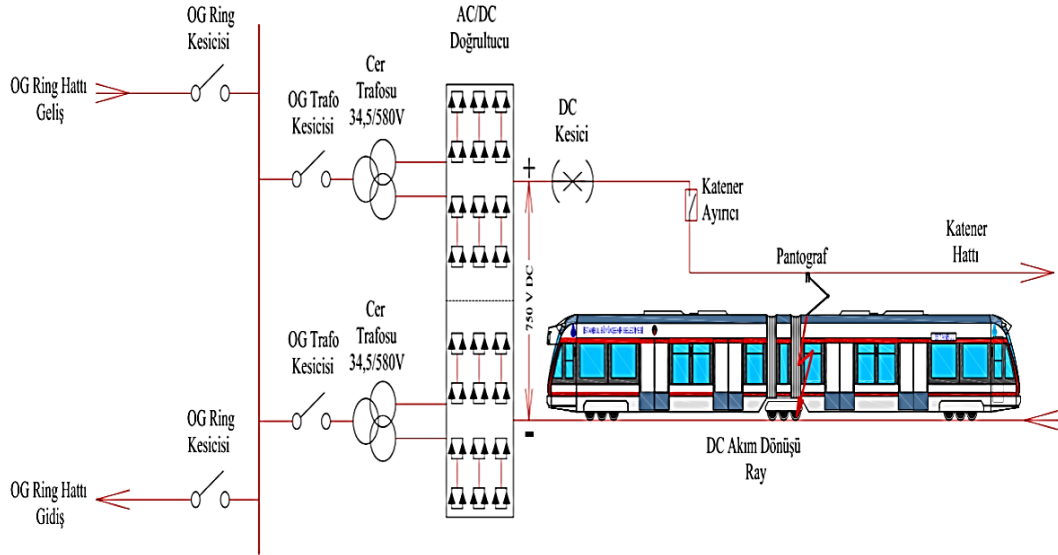
4.1.2 İstasyon Yapıları

M7 Yıldız-Mahmutbey metro hattı toplamda 17 istasyondan oluşmaktadır. Bu istasyonlardan Kağıthane ve Alibeyköy, viyadük üzerine inşa edilmiş olup, geri kalan 15 istasyon tamamen yer altındadır.

Engelli yolcuların tüm ihtiyaçları göz önünde bulundurularak tasarlanan bu hatta; kabartmalı zemin kılavuz yollar, engelli tuvaletleri, 225 yürüyen merdiven ve 108 asansör bulunmaktadır. Yolcu güvenliğini sağlamak amacıyla 1192 kamera yerleştirilmiştir. Araçlarda, yalnızca işitme cihazı kullanan engelli bireylerin algılayabileceği frekansta yayın yapan İndüksiyon Döngü Sistemi kullanılmaktadır. Ayrıca, hat üzerinde yer alan Platform Ayırıcı Kapı Sistemleri (PAKS) tamamen yerli üretim olup, ithal ürünlere kıyasla %50 maliyet tasarrufu sağlamaktadır [53, 56].

4.1.3 M7 Mahmutbey – Yıldız Metro Hattı Elektrifikasyon Sistemi

Metro hattının orta gerilim (OG) elektrifikasyon sistemi, M7 hattında yer alan 17 transformatör merkezi, 3 Teiaş indirici merkezi ve istasyonlar arasındaki orta gerilim kablolarından oluşmaktadır.



Şekil 4.3 Raylı sistem elektrifikasyonu [31]

Orta gerilim elektrifikasyon sistemini oluşturan transformatör merkezlerinin basitleştirilmiş şeması Şekil 4.3'de sunulmuştur. Şekil 4.4'te ise raylı sistem elektrifikasyonuna dair bir örnek gösterilmektedir. Transformatör merkezleri ve TEİAŞ'a ait indirici merkezler, kolay anlaşılabilir bir gösterim için belirli kodlarla ifade edilmiştir. Sistemin numaralandırılmış tek hat şeması aşağıda yer almaktadır [57].



Şekil 4.4 M7 hattı orta gerilim elektrifikasyonunun diyagramı

Tablo 4.2'de M7 hattındaki istasyonlarda bulunan cer ve servis trafosu güçleri istasyon bazlı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 4.2 M7 hattı transformatör merkezleri toplam kurulu gücü

Transformatör Merkezi No	İstasyon Adı	Cer Trafosu Gücü (kVA)	Servis Trafosu Gücü (kVA)
TM1	Yıldız	2* 3300	2*2000
TM2	Fulya	2* 3300	2*2000
TM3	Mecidiyeköy	2* 3300	3*2000
TM4	Çağlayan	2* 3300	2*2000
TM5	Kağıthane	-	2*1600
TM6	Nurtepe	2* 3300	2*2000
TM7	Alibeyköy	-	2*1600
TM8	Çırçır	2* 3300	2*2000
TM9	Veysel Karani	2* 3300	2*2000
TM10	Yeşilpınar	-	2*2000
TM11	Kazım Karabekir	2* 3300	2*2000
TM12	Yenimahalle	2* 3300	2*2000
TM13	Karadeniz	-	2*2000
TM14	Tekstilkent	2* 3300	2*2000
TM15	Oruç Reis	2* 3300	2*2000
TM16	Göztepe	2* 3300	2*2000
TM17	Mahmutbey	2* 3300	2*2000
Toplam		85800	68400

4.1.3.1 Katener Sistemi

M7 Mahmutbey – Yıldız metro hattında yaklaşık 48 km uzunluğunda depo sahası dahil rijit katener sistemi bulunmaktadır. Katener sisteminin özellikleri aşağıdaki gibidir:

Sicat SR = Sicat Standard Rigid

Havai İletken Ray Sistemi

- 80 km/sa işletme hızı
- DC Sistemler için gerilim seviyesi: 1.5 kV DC
- 140 km/sa' e kadar uygulanabilir tasarım hızı

Tablo 4.3 kontak telinin EN 50119 standardına göre 90° sıcaklıkta akım taşıma kapasitesini ve 40° sıcaklıkta taşıyıcı ray ile beraber akım taşıma kapasitesini göstermektedir [58].

Tablo 4.3 EN50119 standardına göre kontak teli akım taşıma kapasiteleri [59]

Kontak teli EN 50119	Telin 90 °C nihai sıcaklığında sürekli akım taşıma kapasitesi	Kontak teli ile birlikte tüm sistemin iletken rayının sürekli akım taşıma kapasitesi
AC / BC 80 Cu-ETP / CuAg0.1	401 A	3301 A
AC / BC 100 Cu-ETP / CuAg0.1	465 A	3365 A
AC / BC 107 Cu-ETP / CuAg0.1	484 A	3384 A
AC / BC 120 Cu-ETP / CuAg0.1	523 A	3423 A
AC / BC 150 Cu-ETP / CuAg0.1	605 A	3505 A

4.1.4 Katener İzolasyon Seviyesi

Katener hattı sisteminde izolasyon seviyesi, hattın çalışma gerilimine ve atmosferik şartlara göre belirlenir. Yüksek gerilimli AC veya DC sistemlerde, izolasyon hem elektriksel kaçakları önlemek hem de personel ve ekipman güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. İzolasyon seviyesi belirlenirken aşağıdaki faktörler dikkate alınmaktadır:

- Nominal gerilim ve maksimum işletme gerilimi
- İç ve dış aşırı gerilimler (yıldırım darbesi, anahtarlama darbeleri)
- Kirlenme seviyesi ve çevresel koşullar (tuz, toz, nem vb.)
- Yalıtım malzemesinin yaşlanma karakteristikleri
- Min. hava boşlukları ve kaçak yolu uzunlukları (krepaj aralığı)

Standart olarak EN 50124-1 normu dikkate alınarak, uygun yalıtım seviyesi seçilmiştir [58].

4.1.4.1 İletkenlerin Sürekli ve Geçici Durumlarda Akım Taşıma Kapasiteleri

Katener sisteminde kullanılan iletkenlerin (örneğin, bakır ya da alüminyum-çelik karışımı) sürekli ve geçici durumlarda taşıyabileceği akım miktarları, sistemin performansını ve güvenliğini doğrudan etkiler.

- Sürekli Akım Kapasitesi (Continuous Current Rating): Belirli bir çevresel sıcaklık altında, iletkenin aşırı ısınmadan sürekli taşıyabileceği maksimum

akımdır. Genellikle çevre sıcaklığı (örneğin 40°C), güneş ışınımı, rüzgar hızı gibi parametrelerle birlikte değerlendirilir.

- Geçici Akım Kapasitesi (Short-time Thermal Rating): Kısa süreli aşırı yüklenme durumlarında, iletkenin zarar görmeden taşıyabileceği akımdır (örneğin 1 saniyelik kısa devre akımı) [60].

Bu hesaplamalar yapılırken termal sınırlar, iletkenin kesiti, ısı yayılımı koşulları ve tolerans katsayıları dikkate alınır.

• İletim Kayıpları ve Gerilim Düşümleri

Katener hattında iletim kayıpları ve gerilim düşümleri, sistem verimliliği açısından büyük önem taşır.

- İletim Kayıpları: Joule (I^2R) kayıpları olarak da bilinen bu kayıplar, iletken üzerinden geçen akım ve iletkenin direnci ile doğru orantılıdır. Hattın uzunluğu, iletken tipi ve kesiti bu kayıpları etkiler.
- Gerilim Düşümü: Tren yüküne bağlı olarak besleme noktasından itibaren oluşan potansiyel farktır. Özellikle uzun mesafeli DC sistemlerde dikkatle analiz edilmelidir [58].

• DC Kısa Devre Dayanımları

Katener sistemleri, özellikle DC sistemlerde, kısa devre durumlarında yüksek akımlara maruz kalır. Bu tür arızalara karşı sistemin tasarımı, hem elektriksel hem de mekanik olarak dayanıklı olmalıdır.

- Termal Dayanım: İletkenlerin ve bağlantı elemanlarının kısa devre sırasında oluşan ısıya dayanması gerekir. Bu, genellikle birkaç yüz milisaniye ile birkaç saniye arasında süren bir olaydır.
- Mekanik Dayanım: Kısa devre akımı, iletken üzerinde elektromekanik kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetler, taşıyıcı yapıları ve izolatörleri zorlayabilir.
- Koruma Sistemleri: Hızlı çalışan devre kesiciler, röleler ve sigortalar aracılığıyla kısa devrelerin sistem üzerinde minimum etkiyle sonuçlanması sağlanır [59].

4.1.4.2 Mekanik Tasarım Kriterleri

Kontak Teli Yüksekliği: Ray üstünden pantografa temasın sağlıklı olması için belirlenen yükseklik; M7 Mahmutbey – Yıldız projesinde 4,2–5,3 m aralığında seçilmiştir.

Dezekman Aralığı: Pantograf ile kontak teli arasındaki dezeksman ayarı (zig-zag hareketi); sıcaklık genleşmesi ve titreşimleri tolere edecek şekilde -200mm ve +200 mm olarak ayarlanmıştır.

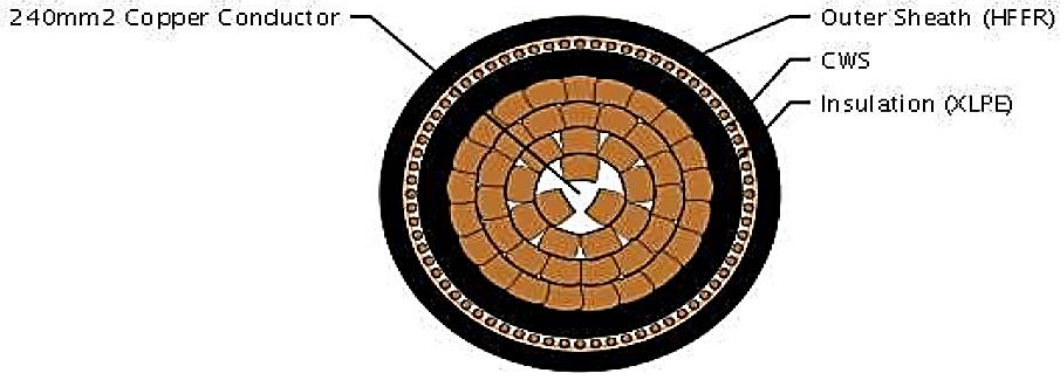
Mesnet Aralıkları: Katener direkleri arasındaki yatay mesafe; düz hatlarda 50–60 m, kurp bölgelerinde 20–30 m olacak şekilde düzenlenmiştir.

Etap Uzunlukları: Besleme noktaları arasındaki maksimum mesafe; 1,5 kV DC’de 1,5–2,5 km aralığında planlanmıştır [60].

4.1.5 Projede Kapsamında Seçilen DC kablolar

Proje kapsamında DC kabloları seçiminde IEC 60502-1 ve IEC 60332-3-24 standardına uygun, güç kablolarının minimum CAT C sınıfı özellikte olması şartlarına dikkat edilmiştir. Kabloların sahada kurulumu esnasında minimum 330 derece bükme/dönüş açısı ile devreye alınması ve sabitlenmesi çok önemlidir. Kablo dönüş açısına ilişkin minimum gereksinimlere uyulması, kablo hasarlarını, iletim kayıplarını ve arıza risklerini azaltarak sistemin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmaktadır.

M7 Mahmutbey - Yıldız metro hattında, IEC 60502-1 standardına uygun olarak seçilen güç kabloları, 1,8/3 kV izolasyon seviyesinde üretilmiş ve ekranlı yapıda tasarlanmış olup, yeraltı tesislerindeki darbeli yük şartlarına özel dayanıklılık göstermektedir; bu kapsamlı standart, kabloların elektriksel, mekanik ve termal performans gereksinimlerini belirleyerek işletme süresince karşılaşılabilecekleri maksimum gerilim artışları, fiziksel darbeler ve aşırı yüklenme koşullarına karşı dayanıklı olmalarını sağlamakta, böylece metro sisteminde aşırı ısınma veya gerilim düşümü gibi problemler yaşanmadan sürekli ve güvenilir bir performans elde edilmekte, sonuç olarak işletme güvenilirliğinin artması, bakım ihtiyaçlarının azalması ve sistemin hizmet ömrünün uzaması sağlanmaktadır. Şekil 4.5’de resimde metro hattında kullanılan kablonun kesit görüntüsü paylaşılmıştır [61 - 62].



Şekil 4.5 M7 Metro hattında kullanılan DC kablo kesiti

Proje kapsamında devreye alınması kabul edilen bütün DC kablolarında DC Sistem kabloları çekim ve montaj usulleri ile kablo taşıyıcıları; hem teknik şartname madde gerekliliklerini ve hem de Uluslararası Standart içeriklerini sağlamaktadır. Bu doğrultuda IEEE 1185-2019 standarına uygunluk gözetilmiştir.

F.1- Madde 4.9 & 8.1.1 Kablolar, zarar görmelerini engellemek için üretici tarafından verilen minimum bükülme yarıçap ölçümlerine göre montaj ve çekme işleri yapılmalıdır.

F.2- Madde 8.2.5.2 kablo sabitlemelerinin; olası kısa devre durumlarında kablolar arası oluşacak Elektrodinamik Mekanik Kuvvet hesapları uyarınca; şartname mesafelerini geçmeyecek şekilde referans alınarak; ayrı kuvvet hesapları ile DC Kablolar için hesap ve saha uygulamaları yapılmalıdır.

F.3- Madde 6.3 Montaj Gereklilikleri:

6.3.a- Kablolar çekme kuvvetleri ile yanıl basınç ve kuvvetleri azaltmak için tek bir yön ve güzergâhta olacak şekilde çekilmelidir.

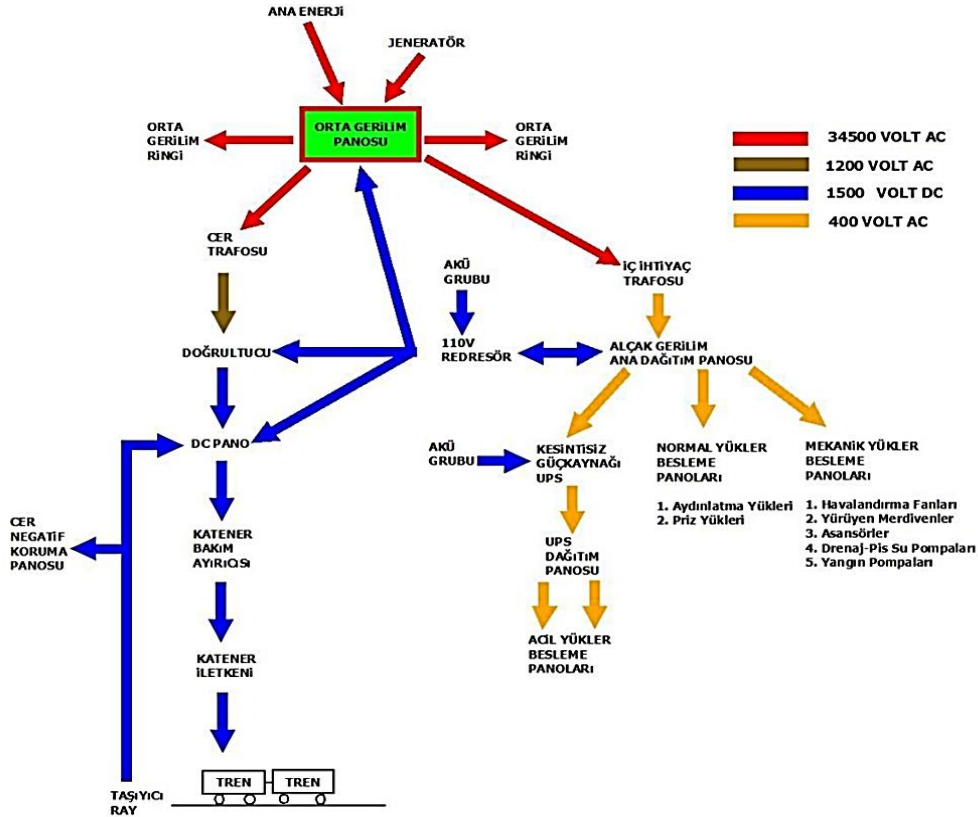
6.3.b- Kablo tava ve merdiven içinde çekilmelidir. Kablo güzergâhında kablolarla zarar verebilecek keskin ve aşındırıcı köşe vb. durumlar ortadan kaldırılmalıdır.

Orta gerilim kablo sistemlerinde, doğru akım kablolarında uygulanan uluslararası standartlara ve devreye alma protokollerine aynı titizlikle riayet edilmiştir [62].

4.1.6 Transformatör Merkezleri

M7 metro hattında yer alan 17 istasyon ve toplam 41 km uzunluğundaki (gidiş-geliş dahil) katener hattının enerji beslemesi, hattın farklı noktalarına konumlandırılmış 13 cer (çekiş gücü) transformatör merkezi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu transformatör merkezlerinde 34,5 kV AC orta gerilim kabloları bulunmakta olup,

merkezler birbirine orta gerilim enerji kablolarıyla bağlanarak radyal ring şebeke yapısı oluşturulmuştur. Bu sistem sayesinde, TEİAŞ'a ait 154/34,5 kV giriş besleme noktalarından birinde oluşabilecek enerji kesintisi durumunda, ring kesici hücreleri aracılığıyla manevra yapılarak farklı bir indirici merkezden enerji sağlanabilmektedir. Böylece sistemin güvenilirliği ve yedekliliği artırılmıştır. Şekil 4.6'da transformatör merkezi ve indirici merkezlerin orta gerilim diyagramı verilmiştir [31,55].



Şekil 4.6 Metro hattının OG, DC ve AG enerji besleme şeması [31]

Proje kapsamında 35 tane iç ihtiyaç transformatörü kullanılmaktadır. Metro sistemlerinde enerji dağıtımını için yüksek gerilim (34.5 kV) kullanılmaktadır. İç ihtiyaç transformatörleri, bu gerilimi alçak gerilim seviyelerine (400 V) dönüştürerek aydınlatma, havalandırma, yürüyen merdiven, asansör, haberleşme ve sinyalizasyon, iletişim sistemleri ve diğer yardımcı ekipmanlara gereken enerjiyi sağlamaktadır. Şekil 4.7'de muhafazasız IP00 bir iç ihtiyaç trafosunun görseli sunulmuştur.



Şekil 4.7 İç ihtiyaç transformatörü [63]

Tablo 4.4'te ise 2000 kVA kapasiteli iç ihtiyaç transformatörünün teknik özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 4.4 2 MVA İç ihtiyaç transformatör bilgileri

Parametre	Birim	Değer
Nominal Güç	MVA	2
Gerilim	kV	34.5/0.4
Bağlantı şekli	-	Dyn11
Uk	%	8.22
X/R	-	11.39
Boşta kayıplar	kW	4.345
Yükte kayıplar	kW	14.376

Tablo 4.5'te 1600 kVA gücündeki iç ihtiyaç transformatörünün teknik özellikleri sunulmuştur.

Tablo 4.5 1.6 MVA İç İhtiyaç transformatör bilgileri

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

Tablo 4.6 İstasyon bazlı servis transformatörü sayıları ve yük oranları

Transformatör Merkezi No	İstasyon Adı	Servis Trafosu Gücü (kVA)	Ortalama Yük Oranı (%)
TM1	Yıldız	2*2000	7,84
TM2	Fulya	2*2000	8,92
TM3	Mecidiyeköy	3*2000	11,45
TM4	Çağlayan	2*2000	9,73
TM5	Kağıthane	2*1600	10,68
TM6	Nurtepe	2*2000	7,16
TM7	Alibeyköy	2*1600	10,27
TM8	Çırçır	2*2000	9,34
TM9	Veysel Karani	2*2000	8,45
TM10	Yeşilpınar	2*2000	11,24
TM11	Kazım Karabekir	2*2000	7,97
TM12	Yenimahalle	2*2000	7,92
TM13	Karadeniz	2*2000	8,63
TM14	Tekstilkent	2*2000	6,95
TM15	Oruç Reis	2*2000	6,41
TM16	Göztepe	2*2000	9,87
TM17	Mahmutbey	2*2000	10,56
Toplam		68400	9,02

Metro sistemlerinde kullanılan iç ihtiyaç transformatörlerinin yüksek kapasiteli seçilmesi, beraberinde kablo kesitlerinin de artırılmasını gerektirmektedir. Bu durum, iletim hatlarında reaktif güç bileşenlerinin artışına yol açmaktadır. Reaktif yüklerin artması, kompanzasyon sistemlerinden tedarik edilmesi gereken reaktif güç miktarını da doğrudan artırmakta ve enerji verimliliğini olumsuz etkilemektedir.

Metro hattındaki enerji analizörlerinden alınan enerji verileri (Tablo 4.6), transformatörlerin ortalama % 9,02 yük oranında çalıştığını göstermektedir. Bu değer, transformatör kapasitelerinin ihtiyaç duyulanın çok üzerinde seçildiğini ve sistemin "güvenli bölge" kavramı ile aşırı dizayn edildiğini ortaya koymaktadır. Transformatörlerin nominal kapasitelerinin % 9,02 yük seviyesine göre belirlenmesi, hem işletme maliyetlerini (enerji kayıpları, reaktif güç kompanzasyonu) hem de ilk yatırım maliyetlerini (trafo, kablo, kompanzasyon ekipmanları) artırmaktadır.

4.1.7 Seçilen Doğrultucu Sistemi

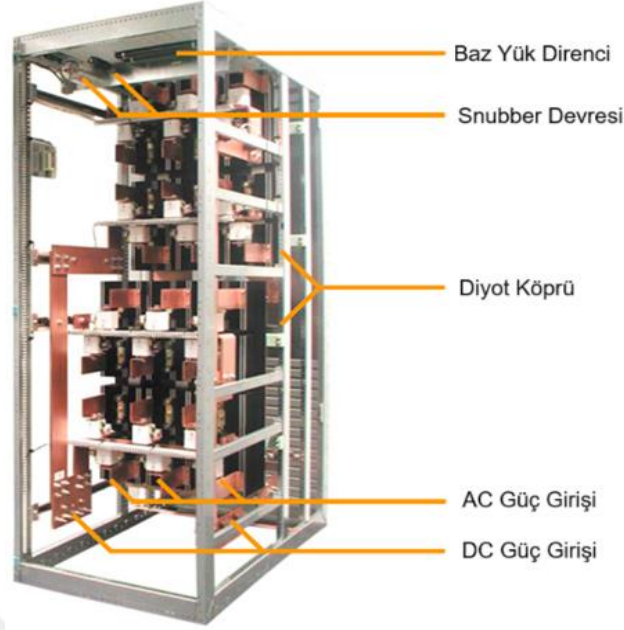
M7 Mahmutbey-Yıldız Metro Hattı için seçilen DC doğrultucu ünitesi, IEC 60146 Class VI ve EN 50328 standartlarına tam uyumlu olup, nominal 1500V DC çıkış

gerilimine sahiptir. Ünite, % 150 aşırı yük kapasitesi (2 saat), $I_{sc} \leq 15 \times I_{nom}$ kısa devre koruması ve ± 10 % gerilim dalgalanma toleransı ile donatılmış olup, THD \leq %5 harmonik distorsiyon limiti sınırlamalarını karşılamaktadır. IP20 koruma sınıfında tasarlanan sistem, -5° C ile $+40^{\circ}$ C operasyon sıcaklığı aralığında, % 95'e kadar bağlı nemde çalışabilmekte, nominal yükte $\eta \geq 95\%$ verimlilik sağlamaktadır. Redundant kontrol sistemi, SCADA entegrasyonu ve gerçek zamanlı veri toplama özellikleriyle donatılmış ünite, IEC 60146-1-1 Sınıf 1 mekanik dayanım kriterlerini karşılamaktadır. M7 hattında kullanılan doğrultucu ünitenin teknik verileri Tablo 4.7'de paylaşılmıştır [55].

Tablo 4.7 Doğrultucu ünitenin teknik verileri

Teknik Parametreler	Birim			
Nominal gerilim (Un)	V	600/750	1500	3000
Diyotların pik ters gerilimleri	V	2200	4000 (4600)	4000 (4600)
Maksimum tasarım akımı (IdN) ¹	A	5220	3780	3230
Maksimum ağırlık	kg	850	850	2* 850
Genişlik	mm	800	800	2* 900
Yükseklik	mm	2200	2200	2200
Derinlik ¹	mm	1400 (1200)	1400 (1200)	1400 (1200)
Maksimum ortam sıcaklığı ²	°C	40	40	40
Maksimum kurulum yüksekliği	m	1000	1000	1000
Koruma derecesi (IEC 60529)	-	IP20	IP20	IP20

Şekil 4.8'de işletmede olan M7 hattında kullanılan DC doğrultucu ünitenin dahili devreleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8 DC doğrultucu ünite ve devreleri [43]

4.1.8 M7 Metro Hattında Seçilen Kaçak Akım İzleme Sistemi

M7 Mahmutbey - Yıldız metro hattındaki kaçak akım izleme sistemi, öncelikle EN 50122-1 (Raylı sistemlerde elektriksel güvenlik gereksinimleri) standardına uygun olarak seçilmiş olup, IEC 61010-1 (Ölçme, kontrol ve laboratuvar kullanımına yönelik elektriksel donanım için güvenlik gereksinimleri) standartlarını karşılamaktadır. Sistem ayrıca, EN 50124-1 (Raylı sistemlerde izolasyon koordinasyonu) ve VDE 0664-100 (Kaçak akım koruma cihazları için gereksinimler) standartlarına uygun olarak tasarlanmış ve monte edilmiştir.



Şekil 4.9 Kaçak akım izleme sistemi ekran görüntüsü [55]

4.2 M7 Metro Hattı Enerji Sisteminin ETAP Modeli

Gerçekleştirilen tez çalışmasında M7 metro hattının elektrik dağıtım sistemi, ETAP yazılımı kullanılarak detaylı bir şekilde modellenmiştir. Bu kapsamda, TEİAŞ 154/34,5 kV indirici merkezler, hat boyunca konumlandırılmış cer gücü sistemleri ve istasyonların iç tüketimini karşılayan transformatörler, ayrıca tüm bağlantı kabloları gerçek teknik verileriyle sisteme aktarılmıştır. Çalışma özellikle Yıldız ile Mahmutbey arasındaki hat kesimini incelemektedir.

4.2.1 M7 Metro Hattı ETAP Modelinin Teknik Detayları

ETAP simülasyon yazılımında, M7 metro hattının elektrik dağıtım sisteminin kapsamlı bir modeli oluşturulmuştur. Bu modelde toplam 26 adet 3,3 MVA gücündeki cer transformatörü, çeşitli kapasitelerdeki iç ihtiyaç transformatörleri (31 adet 2 MVA ve 4 adet 1,6 MVA) ile birlikte 3 adet 60 MVA kapasiteli TEİAŞ 154/34,5 kV indirici transformatör ünitesi dijital ortama aktarılmıştır.

Modelleme çalışması, sadece transformatörleri değil, aynı zamanda bu transformatör merkezleri arasındaki orta gerilim kablo bağlantı ağını da içermektedir. Sistemde kullanılan bakır iletkenli orta gerilim kablolarının elektriksel özellikleri, ETAP programının malzeme kütüphanesinden seçilerek gerçek fiziksel değerlerle uyumlu hale getirilmiştir.

Bu detaylı model üzerinde gerçekleştirilen yük akış analizi, M7 hattının elektrik dağıtım sisteminin farklı işletme koşullarındaki davranışını ve enerji tüketim karakteristiklerini ortaya koymaktadır.

4.2.2 M7 Hattı Elektrifikasyon Sisteminde Kullanılan Kablo Tipleri

M7 metro hattının orta gerilim şebekesi elektrifikasyon sisteminde temel olarak standart bir kablo tipi tercih edilmiştir. Hat boyunca ana besleme için 3*(1*240) mm² kesitli XLPE izolasyonlu orta gerilim kabloları kullanılmaktadır. Bu kabloların elektriksel özellikleri ve parametreleri, ETAP yazılımının standart veri tabanından alınmıştır.

Şekil 4.10'da görülebileceği üzere, ETAP programının malzeme kütüphanesindeki 240 mm² kesitli kablo seçimi ve teknik özellikleri detaylı şekilde tanımlanmıştır.

Prys BS6622		Non-Mag.		50 Hz		Code : 240	
XLPE		100 %		33 kV		3/C CU 240 mm ²	
Option		Units		Project Frequency			
Pos.	<input checked="" type="radio"/> Lib	Zero	<input checked="" type="radio"/> Lib	<input checked="" type="radio"/> Ohms per	1000	km	50 Hz
	<input type="radio"/> Calc		<input type="radio"/> Calc	<input type="radio"/> Ohms			
Library Impedance							
	R	X	L	Z	X/R	R/X	Y
→ Pos.	98	109	0,3469578	146,578	1,112	0,899	0
→ Zero	155,82	276,86	0,8812729	317,697	1,777	0,563	0

Şekil 4.10 240 mm² kablo ETAP modeli

Yapılan analizlerde bazı özel senaryolar için değerlendirmeye alınan alternatif kablo tipi olarak 3*(1*120) mm² kesitli XLPE orta gerilim kablosunun teknik parametreleri de modele dahil edilmiştir. Bu kablonun elektriksel karakteristikleri ve ETAP programındaki modeli Şekil 4.11'de detaylı olarak gösterilmiştir.

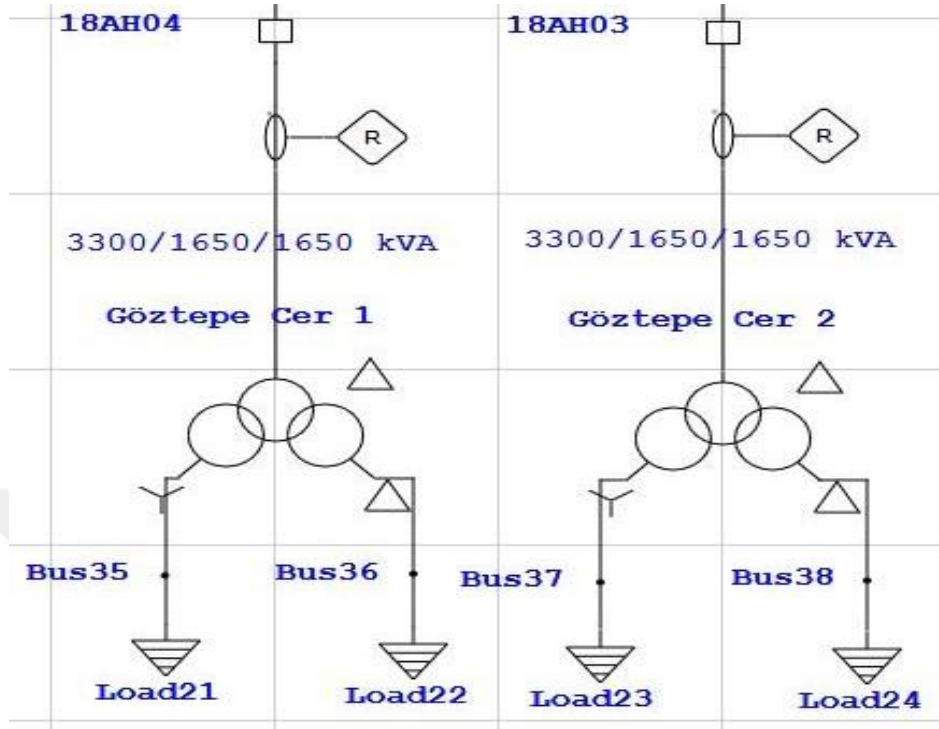
Sizing - Phase		Sizing - GND/PE		Reliability		Routing		Remarks		Comment	
Info		Physical		Impedance		Configuration		Loading		Capacity	
BS6622		Non-Mag.		50 Hz		Code : 120					
XLPE		100 %		33 kV		1/C CU 120 mm ²					
Option		Units		Project Frequency							
Pos.	<input checked="" type="radio"/> Lib	Zero	<input checked="" type="radio"/> Lib	<input checked="" type="radio"/> Ohms per	1000	m	50 Hz				
	<input type="radio"/> Calc		<input type="radio"/> Calc	<input type="radio"/> Ohms							
Library Impedance											
	R	X	L	Z	X/R	R/X	Y				
→ Pos.	0,196	0,137	0,0004361	0,23913	0,699	1,431	0,0000575				
→ Zero	0,31164	0,34798	0,0011077	0,46713	1,117	0,896	0				

Şekil 4.11 120 mm² kablo ETAP modeli

4.2.3 M7 Hattı Cer Transformatörlerinin ETAP Modellemesi

M7 Metro hattında kullanılan cer transformatörleri, elektrik dağıtım sisteminin önemli bileşenlerini oluşturmaktadır. ETAP simülasyon yazılımının standart kütüphanesinde spesifik olarak cer transformatörleri için hazır bir marka seçeneği bulunmadığından, bu özel ekipmanların modellemesi tüm teknik parametreleri ile manuel olarak gerçekleştirilmiştir. M7 hattı boyunca standart olarak 3,3 MVA gücünde cer transformatörleri kullanılmaktadır. Şekil 4.12 görüldüğü üzere, 3,3

MVA gücündeki cer transformatörünün ETAP programındaki modellemesi detaylı şekilde yapılmıştır.



Şekil 4.12 Cer transformatörünün ETAP programındaki modellemesi

Tablo 4.8'de 3300 kVA gücündeki cer transformatörünün teknik özellikleri ve etiket bilgileri listelenmiştir.

Tablo 4.8 3300 kVA cer transformatörünün teknik özellikleri

Parametre	Birim	Değer
Nominal Güç (Primer)	MVA	3.3
(Sekonder 1)	MVA	1.65
(Sekonder 2)	MVA	1.65
Gerilim (Primer)	kV	34.5
(Sekonder 1)	kV	1.2
(Sekonder 2)	kV	1.2
Bağlantı Grubu	Dd0Dy11	
Yükte Kayıplar	kW	13.82
Boşta Kayıplar	kW	7.294

Ayrıca, Şekil 4.13'te bu transformatör modeline ait empedans değerleri ve ETAP programında tanımlanmış parametreleri sunulmuştur.

Reliability		Remarks		Comment		
Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Protection	Harmonic
3,3 1,65 1,65 MVA			34,5 1,2 1,2 kV			
Impedance ----- Positive ----- ----- Zero ----- % Z X/R % Z X/R MVA Base PS 11,4 25 20 28,6 3,3 PT 11,4 26,6 10 28,6 3,3 ST 17 47 14 60 3,3					Z Variation @ - 5 % Tap 0 % @ + 5 % Tap 0 %	
No Load Losses (Unbalanced Load Flow only) % FLA kW % G % B Positive 0,5 7,294 0,221 0,448 Zero 0,5 7,294 0,221 0,448					Z Tolerance ± 0 %	
<input type="checkbox"/> Buried Delta Winding		<input type="checkbox"/> Zero Seq. Impedance				

Şekil 4.13 Transformatör modeline ait empedans değerleri

4.2.4 M7 Hattı İç İhtiyaç Transformatörlerinin ETAP Modellemesi

Metro İstanbul A.Ş.'nin işletmesindeki M7 metro hattında, istasyonların ve hattın iç enerji ihtiyacı orta gerilim hücrelerine bağlı 34,5/0,4 kV transformatörler vasıtasıyla karşılanmaktadır. Bu iç ihtiyaç transformatörlerinin alçak gerilim çıkışları, istasyonlardaki havalandırma sistemleri, harmonik filtreli alçak gerilim kompanzasyon üniteleri, istasyon ekipmanları ve aydınlatma sistemleri gibi çeşitli yükleri beslemektedir.

Simülasyon modelinde, cer transformatörlerinde olduğu gibi, bu transformatörler için de üreticinin sağladığı gerçek etiket değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.14'te 2 MVA, Şekil 4.15'de 1 MVA ve Şekil 4.16'da 630 kVA gücündeki iç ihtiyaç transformatörlerinin ETAP programında tanımlanmış olan elektriksel özellikleri ve parametre değerleri görülmektedir.

2000 kVA IEC Dry AN 60 C						34,5 0,4 kV	
Impedance						Z Base	
	%Z	X/R	R/X	%X	%R	kVA	
Positive	78,25	0,023	43,478	1,799	78,229	2000	
Zero	76,25	0,023	43,478	1,753	76,23	AN 60	
Typical Z & X/R			Typical X/R				

Şekil 4.14 2 MVA İç ihtiyaç transformatörünün elektriksel verileri

1000 kVA IEC Dry AN 60 C						34,5 0,4 kV	
Impedance						Z Base	
	%Z	X/R	R/X	%X	%R	kVA	
Positive	23,25	0,075	13,333	1,739	23,185	1000	
Zero	23,25	0,075	13,333	1,739	23,185	AN 60	
Typical Z & X/R			Typical X/R				

Şekil 4.15 1 MVA İç ihtiyaç transformatörünün elektriksel verileri

630 kVA IEC Dry AN 60 C						34,5 0,4 kV	
Impedance						Z Base	
	%Z	X/R	R/X	%X	%R	kVA	
Positive	10,25	0,161	6,211	1,629	10,12	630	
Zero	10,25	0,161	6,211	1,629	10,12	AN 60	
Typical Z & X/R			Typical X/R				

Şekil 4.16 630 kVA İç ihtiyaç transformatörünün elektriksel verileri

4.3 M7 Metro Hattı Enerji Sisteminin ETAP Analizi

M7 Mahmutbey - Kabataş Metro Hattı için yük akış analizi ilk olarak normal işletme koşulları dikkate alınarak dokuz farklı senaryo kapsamında gerçekleştirilmiştir. Senaryolar trafo güçlerini değiştirerek ve kablo kesitlerini düşürerek 3 aşamada ve toplamda 9 adet senaryodan oluşmaktadır. Birinci aşamada,

- Mevcut transformatör güçleri ile (2 MVA ve 1,6 MVA) mevcut kablo kesiti (240 mm^2) modellenerek analiz edilmesi
- Mevcut transformatör güçleri ile (2 MVA ve 1,6 MVA) düşürülmüş kablo kesiti (185 mm^2) modellenerek analiz edilmesi
- Mevcut transformatör güçleri ile (2 MVA ve 1,6 MVA) düşürülmüş kablo kesiti (120 mm^2) modellenerek analiz edilmesi şeklinde 3 adet senaryo oluşturulmuştur.

İkinci aşamada,

- 1 MVA transformatör güçleri ile mevcut kablo kesiti (240 mm^2) modellenerek analiz edilmesi
- 1 MVA transformatör güçleri ile düşürülmüş kablo kesiti (185 mm^2) modellenerek analiz edilmesi
- 1 MVA transformatör güçleri ile düşürülmüş kablo kesiti (120 mm^2) modellenerek analiz edilmesi şeklinde 3 adet senaryo oluşturulmuştur.

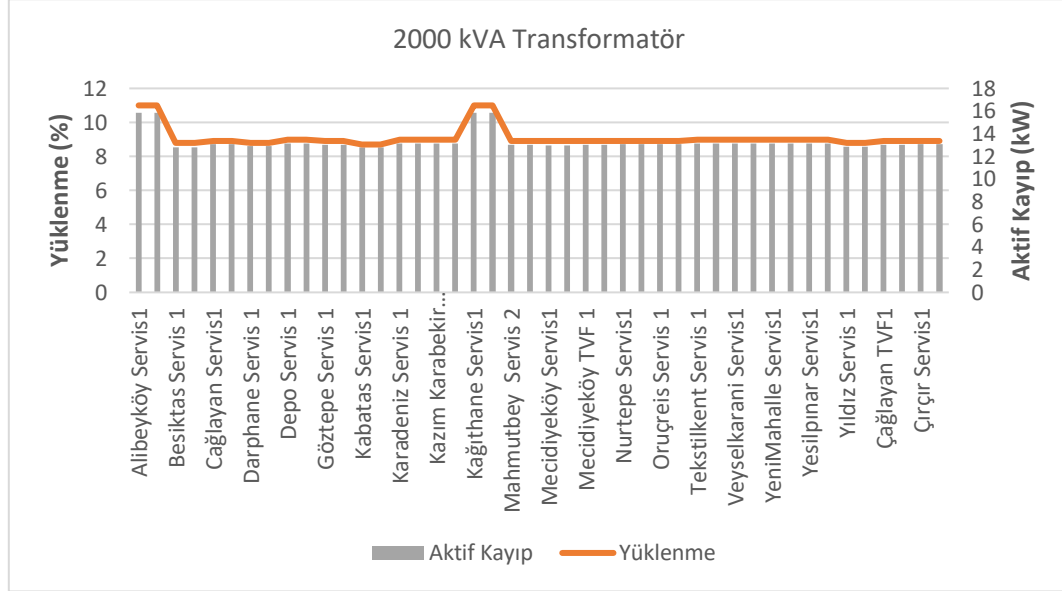
Üçüncü aşamada ise,

- 0,63 MVA transformatör güçleri ile mevcut kablo kesiti (240 mm^2) modellenerek analiz edilmesi
- 0,63 MVA transformatör güçleri ile düşürülmüş kablo kesiti (185 mm^2) modellenerek analiz edilmesi
- 0,63 MVA transformatör güçleri ile düşürülmüş kablo kesiti (120 mm^2) modellenerek analiz edilmesi şeklinde 3 adet senaryo oluşturulmuştur.

Son olarak acil durum besleme senaryosundaki yükler de dikkate alınarak mevcut durum ve 0,63 MVA transformatör gücü ile 120 mm^2 kablo kesiti kullanılan durum ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1 Mevcut İç İhtiyaç Transformatörleri ile Kayıp Analizi

İç ihtiyaç transformatörlerinin 2000 kVA ile 1600 kVA ve kablonun sırasıyla 240, 185 ve 120 mm² seçilerek yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17’de 2000 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıpların değişimini göstermektedir.

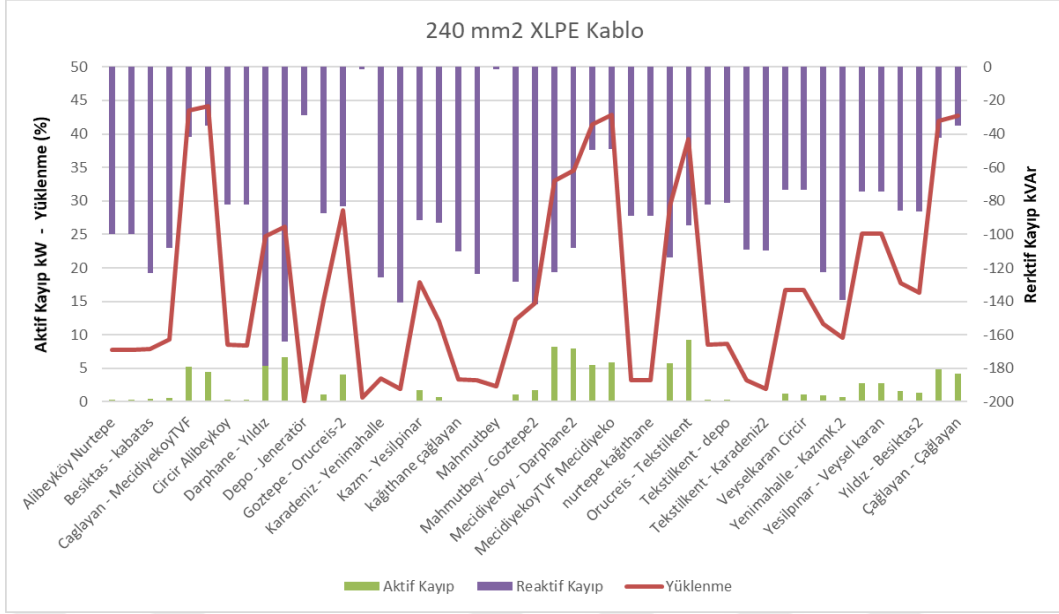


Şekil 4.17 2000 kVA ve 1600 kVA transformatörler için istasyon bazlı aktif kayıplar grafiği

Grafik incelendiğinde 2000 kVA transformatör seçilmiş olan mevcut durumda istasyonlardaki yüklenme oranları minimum % 8 civarında iken maksimum % 10 civarına çıkmıştır. Bu değerler sistem işletim değerleri ile de uyumluluk göstermektedir. Yine aktif kayıplarda minimum 13 kW civarındayken maksimum 17 kW civarındadır.

4.3.1.1 Senaryo 1

240 mm² kesit kablo seçildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.18’de verilmiştir.

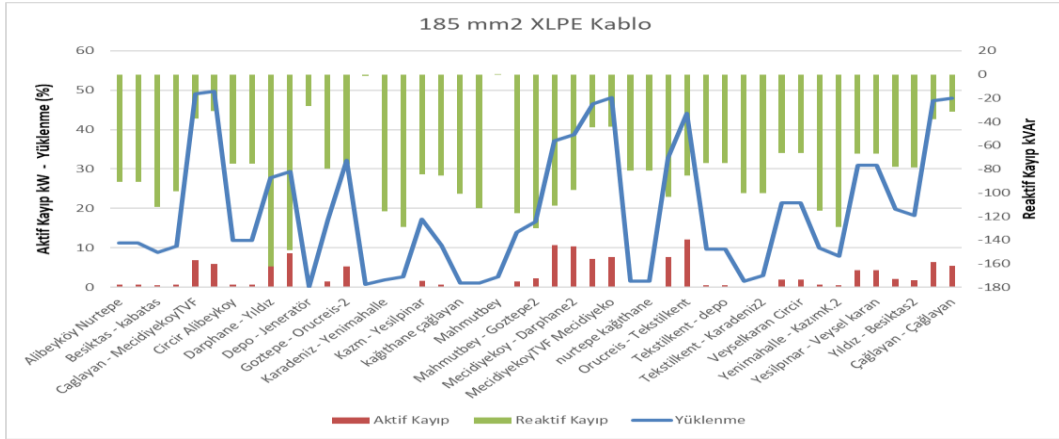


Şekil 4.18 Senaryo 1'e göre yük akışı analizi grafiği

Şekilden görüldüğü üzere 240 mm² kablo seçilmesi durumunda ortaya çıkan aktif kayıplar 10 kW değerine ulaşırken, reaktif kayıpların -30 ile -190 kVAR arasında değiştiği, kablo yüklenme oranının ise %44'e kadar yükseldiği gözlemlenmiştir.

4.3.1.2 Senaryo 2

185 mm² kesitli kablo dikkate alındığında elde edilen sonuçlar aşağıdaki Şekil 4.19'da verilmiştir.

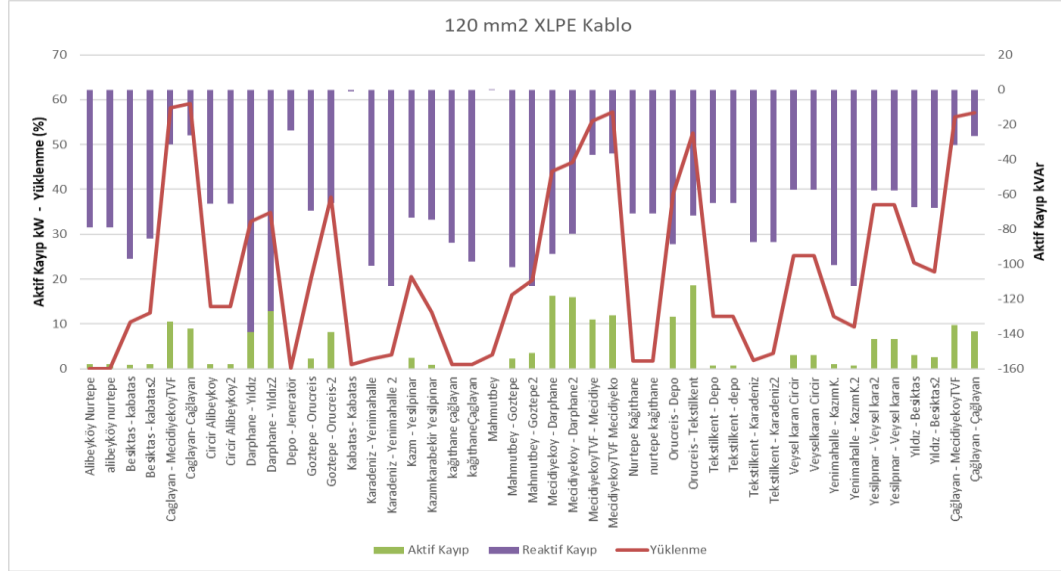


Şekil 4.19 Senaryo 2'e göre yük akışı analizi grafiği

Şekil 4.19 incelendiğinde, 185 mm² kablo seçilmesi durumunda ortaya çıkan aktif kayıpların 11 kW değerine ulaştığı, reaktif kayıpların 0,1 ile -150 kVAR arasında değiştiği, kablo yüklenme oranının ise %50'ye kadar yükseldiği gözlemlenmiştir.

4.3.1.3 Senaryo 3

120 mm² kesitli kablunun kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.20’de verilmiştir.



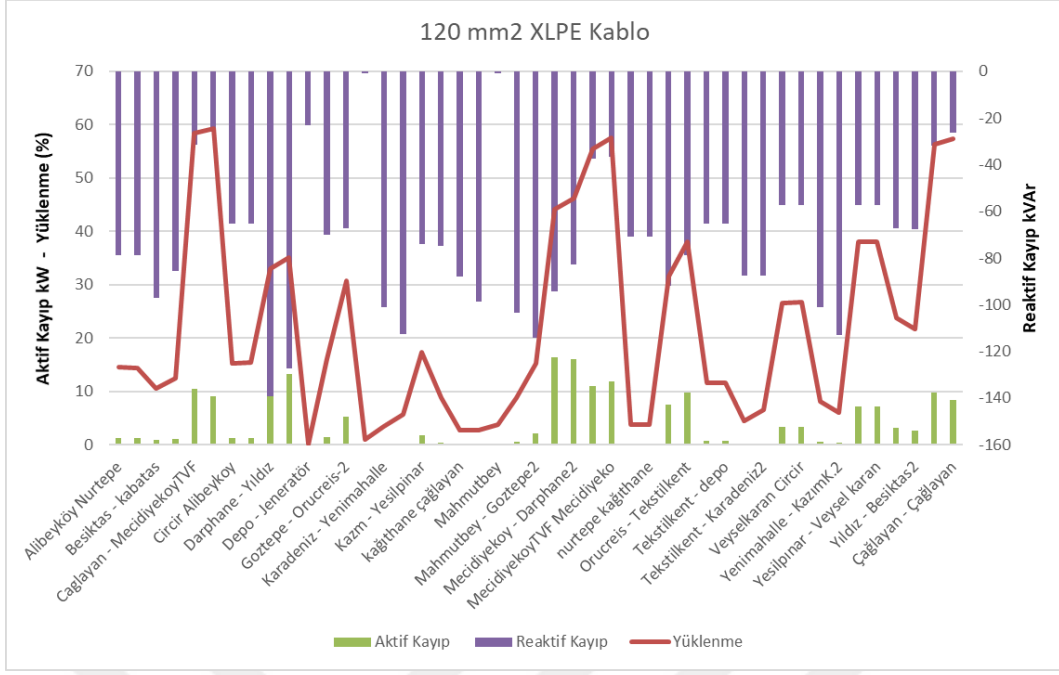
Şekil 4.20 Senaryo 2’ e göre yük akışı analizi grafiği

Şekilden de görüldüğü üzere 120 mm² kablo seçilmesi durumunda ortaya çıkan aktif kayıplar 19 kW değerine kadar çıkmışken, reaktif kayıpların 0,1 ile – 130 kVAR arasında değiştiği, kablo yüklenme oranının ise % 59’a kadar yükseldiği gözlemlenmiştir.

Kablo kesiti 120 mm²’den 240 mm²’ye çıkarıldıkça hem aktif hem reaktif kayıplarda belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Artan kesit, iletken direncini düşürerek enerji iletimindeki kayıpları minimize etmiş ve gerilim düşümünü azaltmıştır. Aynı zamanda yüklenme oranları da düşerek termal sınırlar içerisinde güvenli işletme aralığına çekilmiştir. Bu durum, sistem verimliliğini artırırken kablunun termik ve elektriksel performansını iyileştirmiştir.

4.3.2 İç İhtiyaç Transformatörlerinin 1000 kVA Seçilmesi ile Kayıp Analizi

M7 Metro hattında bulunan 35 adet iç ihtiyaç transformatörünün tamamının 1000 kVA olması durumunda kabloların yine sırasıyla 240, 185 ve 120 mm² kesitli seçilmesi durumları için yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21’de 1000 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıplarını göstermektedir.



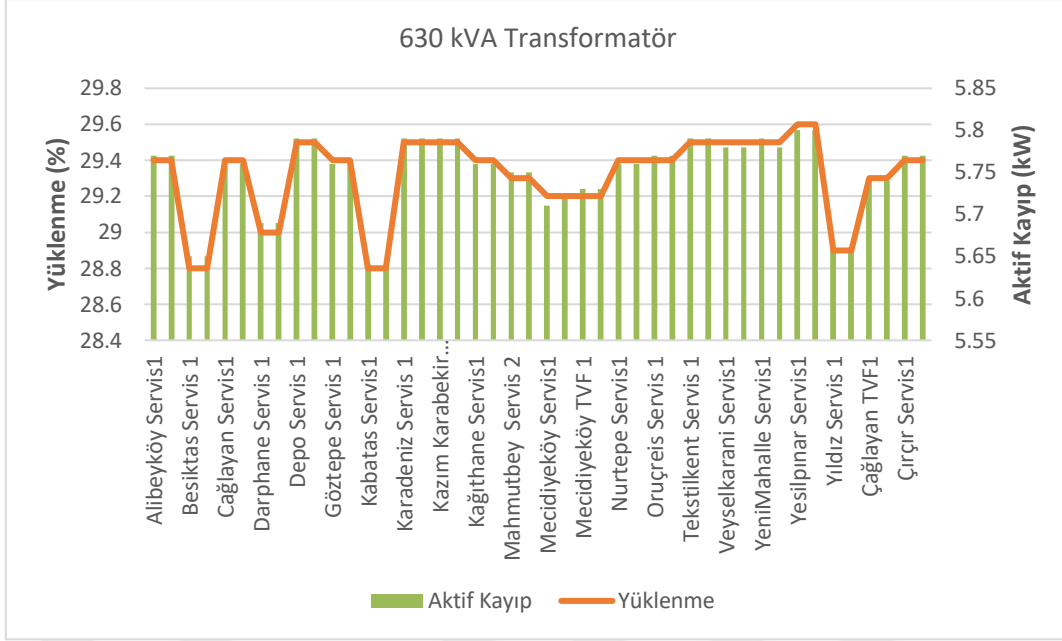
Şekil 4.24 Senaryo 6'e göre yük akışı analizi grafiği

Şekil 4.24'te görüldüğü üzere 120 mm² kesitli kablo seçilmesi durumunda ortaya çıkan aktif kayıplar 17 kW olarak tespit edilmiştir. Reaktif kayıpların 0,1 ile – 140 kVAR arasında değiştiği ve kablo yüklenme oranının ise % 58'e kadar yükseldiği gözlemlenmiştir.

Kablo kesiti 120 mm²'den 240 mm²'ye çıkarıldığında, bazı hatlarda reaktif kayıp - 70 kVAR'dan -30 kVAR'a, aktif kayıp ise ~15 kW'tan ~5 kW seviyelerine düşmüştür. Yüklenme oranı, 120 mm² kabloda %60'lara kadar çıkarken, 240 mm² kabloda çoğu hatta %20–40 aralığına gerilemiştir. Bu kesit artışıyla birlikte iletken direncinin azalması, enerji kayıplarında yaklaşık %70'e varan azalma sağlamıştır.

4.3.3 İç İhtiyaç Transformatörlerinin 630 kVA Seçilmesi ile Kayıp Analizi

M7 Metro hattında bulunan 35 adet iç ihtiyaç transformatörünün tamamının 630 kVA olması durumunda kablo kesitlerinin yine sırasıyla 240, 185 ve 120 mm² seçilmesi durumları dikkate alınarak yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25'de 630 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıplarını göstermektedir.

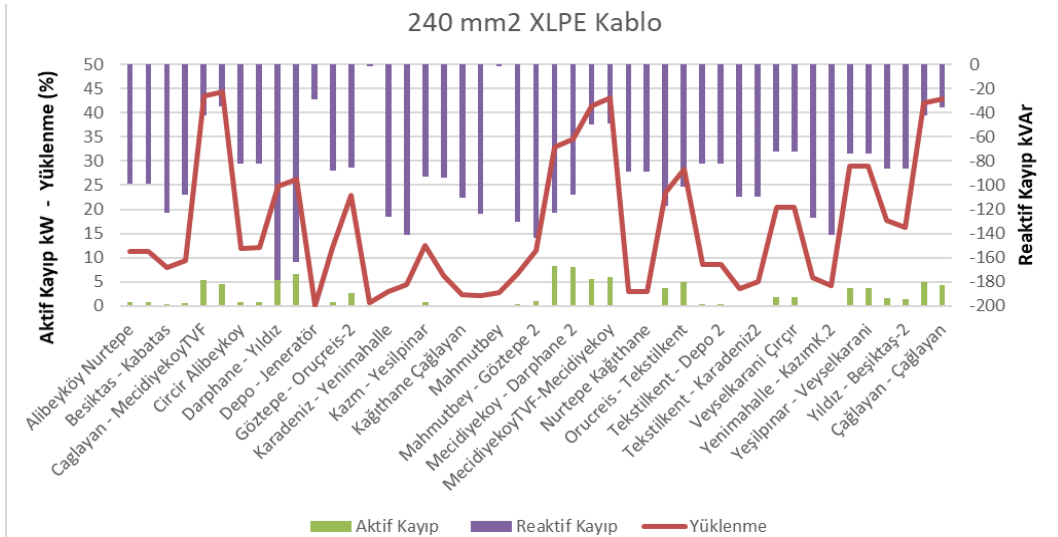


Şekil 4.25 630 kVA transformatör istasyon bazlı aktif kayıplar grafiği

Şekil 4.25 incelendiğinde 630 kVA transformatör seçilmiş olan mevcut durumda istasyonlardaki yüklenme oranları minimum % 28,8 ve maksimum % 29,6 olarak elde edilmiştir. Aktif güç kayıpları ise minimum 5,65 kW, maksimum 5,8 kW olarak belirlenmiştir.

4.3.3.1 Senaryo 7

240 mm² kesitli kablo kullanımı için elde edilen sonuçlar Şekil 4.26’da verilmiştir.



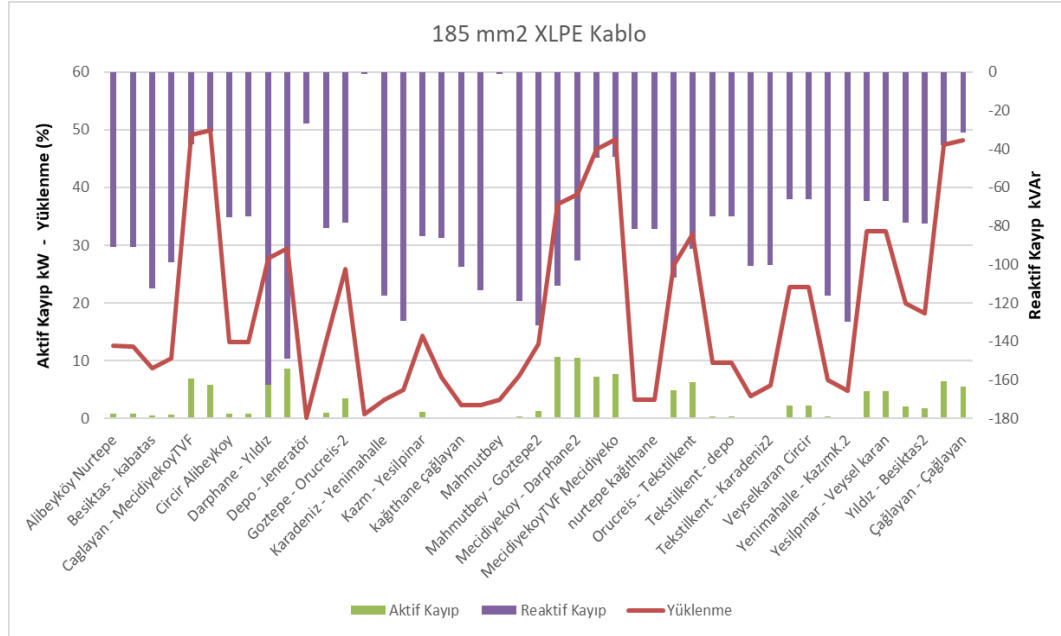
Şekil 4.26 Senaryo 7’e göre yük akışı analizi grafiği

Şekil 4.26’den görüldüğü üzere 240 mm² kesitli kablo kullanımı durumunda ortaya çıkan aktif kayıplar 8 kW değerinde belirlenirken, reaktif kayıpların 0,1 ile – 170

kVAR arasında değiştiği ve kablo yüklenme oranının ise %44'e kadar yükseldiği gözlemlenmiştir.

4.3.3.2 Senaryo 8

185 mm² kesitli kablo seçildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.27'de verilmiştir.

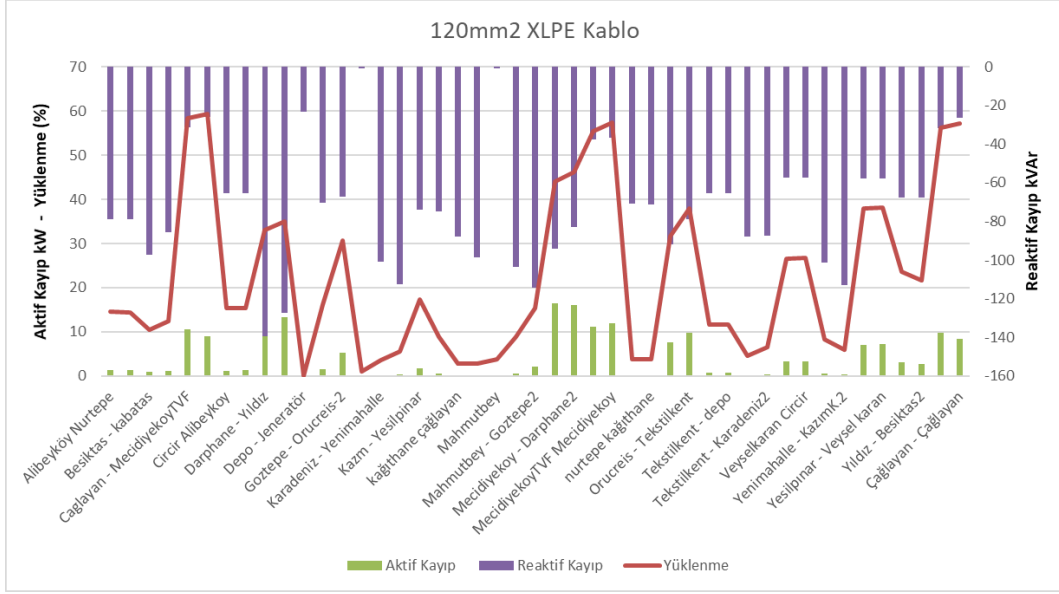


Şekil 4.27 Senaryo 8'e göre yük akışı analizi grafiği

Şekil 4.27'de grldği gzere 185 mm² kesitli kablo seçilmesi durumunda ortaya çıkan aktif kayıplar 10 kW değerinde, reaktif kayıpların 0,1 ile - 160 kVAR arasında ve kablo yüklenme oranının ise maksimum %50 değerinde olduğu gözlemlenmiştir.

4.3.3.3 Senaryo 9

120 mm² kesitli kablo kullanıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28 Senaryo 9'e göre yük akışı analizi grafiği

Şekil 4.28 incelendiğinde, 120 mm² kesitli kablo seçilmesi durumunda ortaya çıkan aktif kayıplar 18 kW değerinde, reaktif kayıpların 0,1 ile – 140 kVAR arasında ve kablo yüklenme oranının ise maksimum %59 değerinde olduğu gözlemlenmiştir.

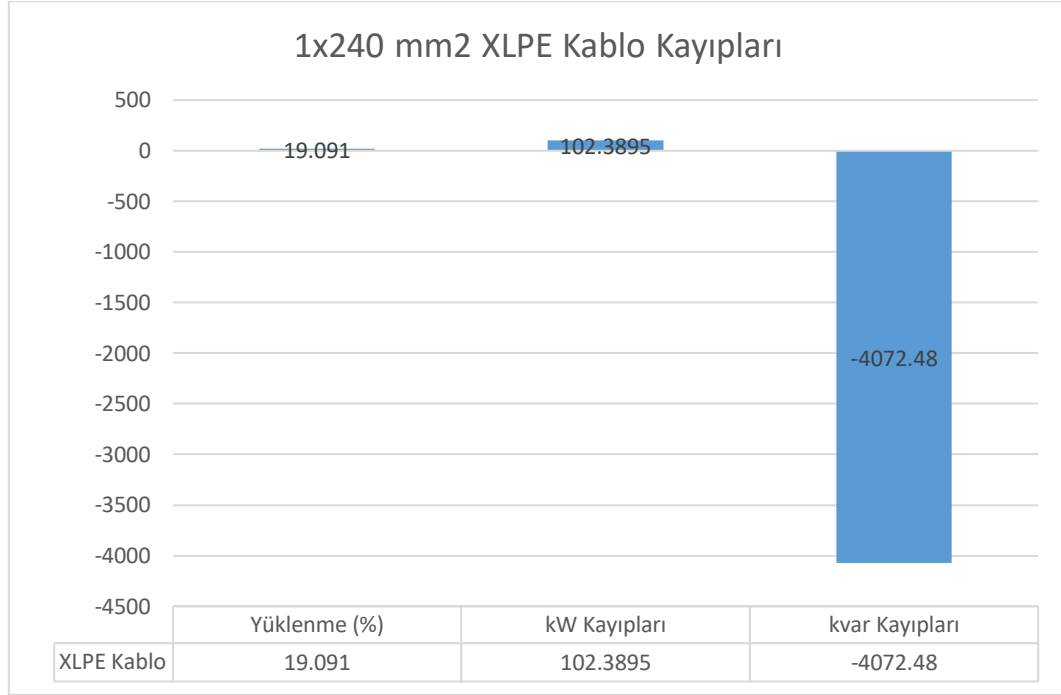
120 mm² kesitli kablolarla aktif ve reaktif kayıplar yüksek, yüklenme oranları ise birçok hatta yüksek seviyededir. 185 mm² kesitli kablolarla kayıplar belirgin şekilde azalırken yüklenme daha dengeli seviyelere çekilmiştir. 240 mm² kesitli kabloların kullanımı ise en düşük kayıp değerlerine sahip olup yüklenme oranları da minimum seviyelere inmiştir.

4.3.3.4 Senaryo 10 - Acil Durum (Yangın) Senaryosu

Acil durum (yangın) işletme senaryosu, metro istasyonlarında yangın gibi olağanüstü hallerde can güvenliğini sağlamak, duman tahliyesini gerçekleştirmek ve kritik sistemlerin kesintisiz çalışmasını temin etmek amacıyla devreye giren özel bir işletme modudur. Bu senaryoda, yangın algılandığında normal işletme yükleri arasında yer alan ve hayati öneme sahip olmayan kompresörler (TVC), jokey pompalar (FCP) ve tünel bakım prizleri gibi yükler otomatik olarak devre dışı bırakılır. Normal yük barası (LVS/N) kesilerek enerjinin, acil durumda ihtiyaç duyulan sistemlere yönlendirilmesi sağlanır.

Senaryo kapsamında, tüm yürüyen merdivenler çıkış yönünde çalışacak şekilde devreye alınır. Duman kontrolü ve tahliyesi için havalandırma sistemleri devreye alınırken, yönlendirme aydınlatmaları ve sesli uyarı sistemleri gibi hayati sistemler

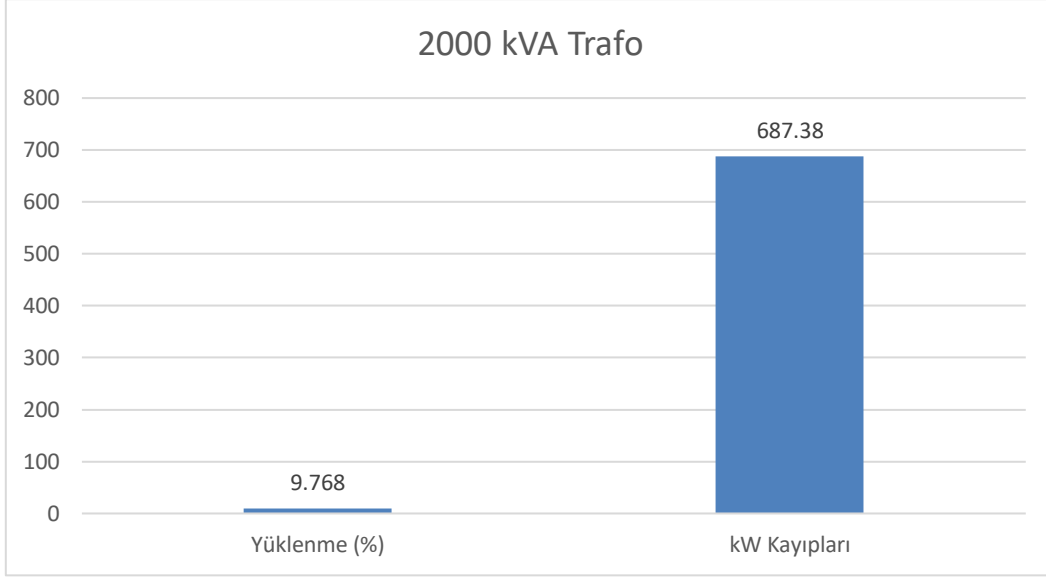
çalışmaya devam eder. Sistem, tek bir trafonun devre dışı kalması durumunda dahi, diğer trafonun hem kendi yükünü hem de karşı trafonun zorunlu barasını besleyebileceği şekilde projelendirilmiştir. Şekil 4.29'da her iki servis transformatörü aktif iken 240 mm² XLPE kabloların yüklenme oranları, aktif kayıpları ve reaktif kayıpları gösterilmiştir.



Şekil 4.29 Hat genelinde XLPE Kablo değerleri

Şekilde görüldüğü üzere 1x240 mm² kesitli XLPE kablo kullanılması durumunda, aktif güç kayıpları 102,39 kW seviyesinde gerçekleşmiş, reaktif güç kayıpları ise oldukça yüksek bir değer olan -4072,48 kVAR olarak kaydedilmiştir. Kablo yüklenme oranı ise yalnızca %19,091 seviyesindedir.

Bu veriler, 240 mm² kesitli kablonun sistemde oldukça düşük bir yüklenmeyle çalıştığını, buna rağmen reaktif kayıpların dikkat çekici biçimde yüksek olduğunu göstermektedir. Aktif kayıplar da kayda değer düzeydedir. Dolayısıyla sistem tasarımında yalnızca kesit artışı değil, reaktif güç kompanzasyonu gibi çözümler de değerlendirilmelidir. Şekil 4.30'da her istasyonda iki servis trafosu aktif iken, 2000 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıplarını göstermektedir.



Şekil 4.30 2000 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği

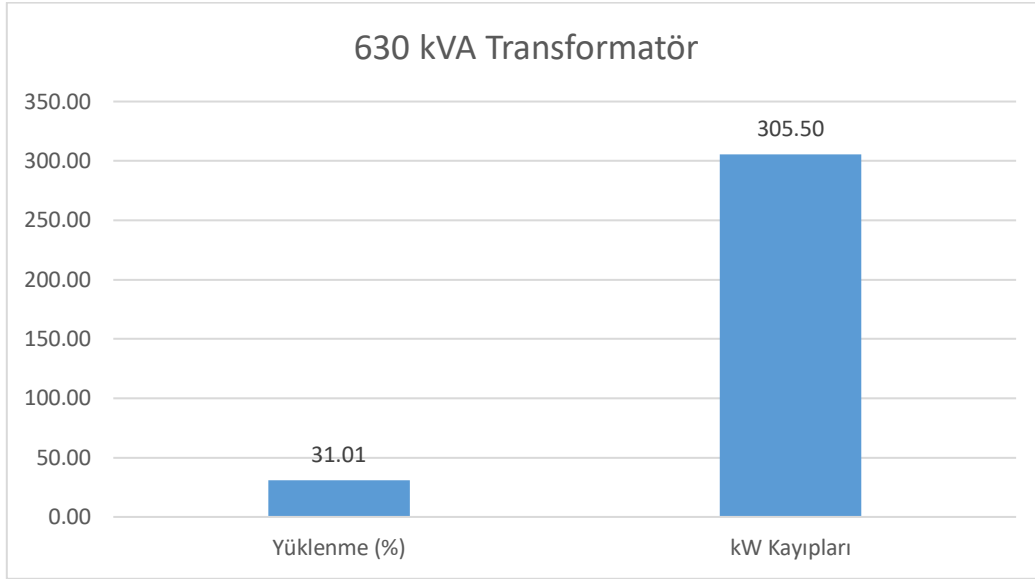
Şekil 4.30 incelendiğinde 2000 kVA transformatör seçilmiş olan mevcut durumda hat genelinde trafoların yüklenme oranları ortalama %9,8 değerinde iken aktif kayıplarda toplam 687,38 kW değerindedir. Şekil 4.31’de her istasyonda iki servis transformatörü aktif iken hat genelinde XLPE kabloların aktif, reaktif kayıpları ve yüklenme oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.31 Hat genelinde XLPE Kablo değerleri

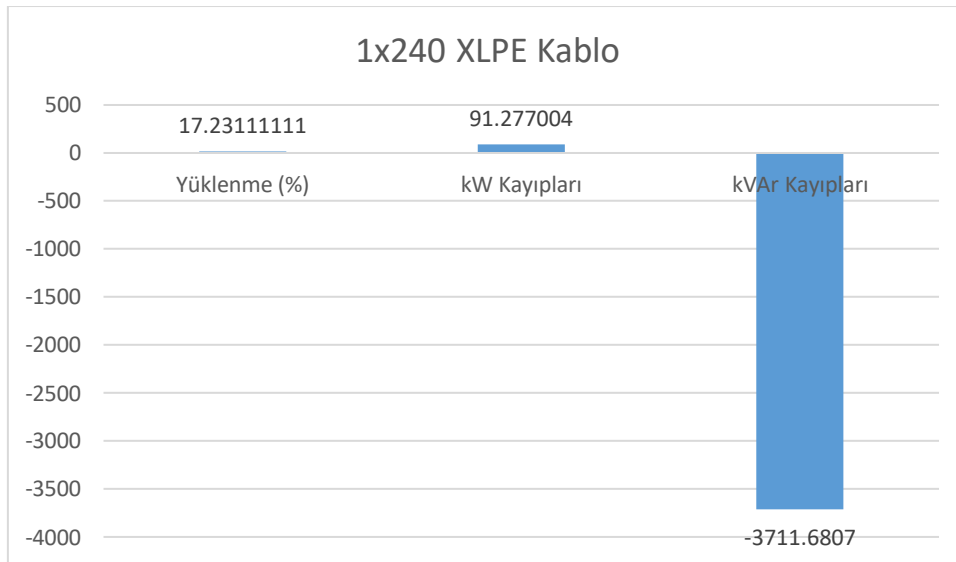
Şekilde görüldüğü üzere 1x240 mm² kesitli XLPE kablo kullanılması durumunda, aktif güç kayıpları 100,3 kW seviyesinde gerçekleşmiş, reaktif güç kayıpları ise oldukça yüksek bir değer olan -4078,77 kVAR olarak kaydedilmiştir. Kablo yüklenme oranı ise % 41,249 seviyesindedir.

Şekil 4.32’de her istasyonda iki servis trafosu aktif iken, 630 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıplarını göstermektedir.



Şekil 4.32 630 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği

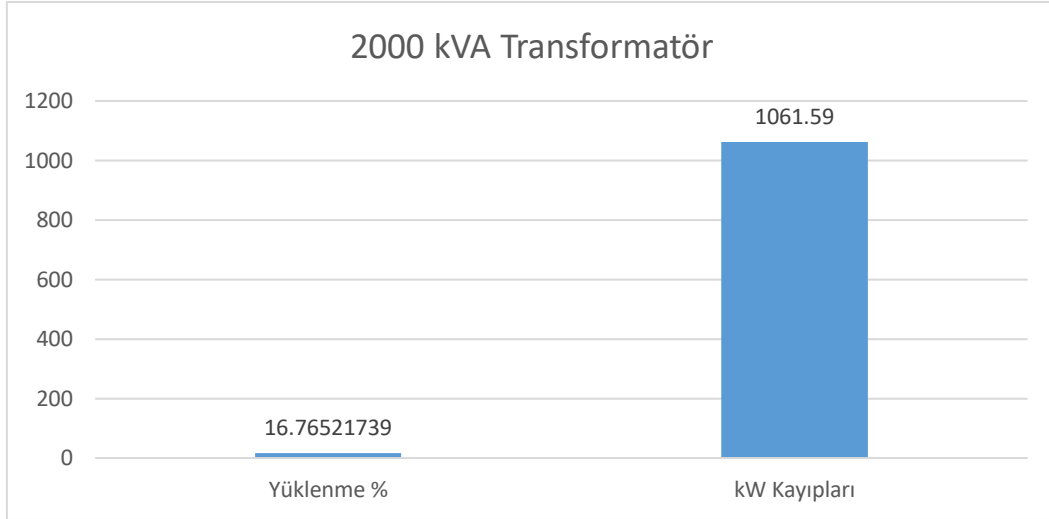
Şekil 4.32 incelendiğinde 630 kVA transformatör seçilmiş olan mevcut durumda hat genelinde trafoların yüklenme oranları ortalama % 31,01 iken aktif kayıplarda toplam 305,50 kW değerindedir. Şekil 4.33’de her istasyonda tek trafo aktif iken 240 mm² XLPE kabloların yüklenme oranları, aktif kayıpları ve reaktif kayıpları gösterilmiştir.



Şekil 4.33 Hat genelinde 1x240 mm² XLPE Kablo değerleri

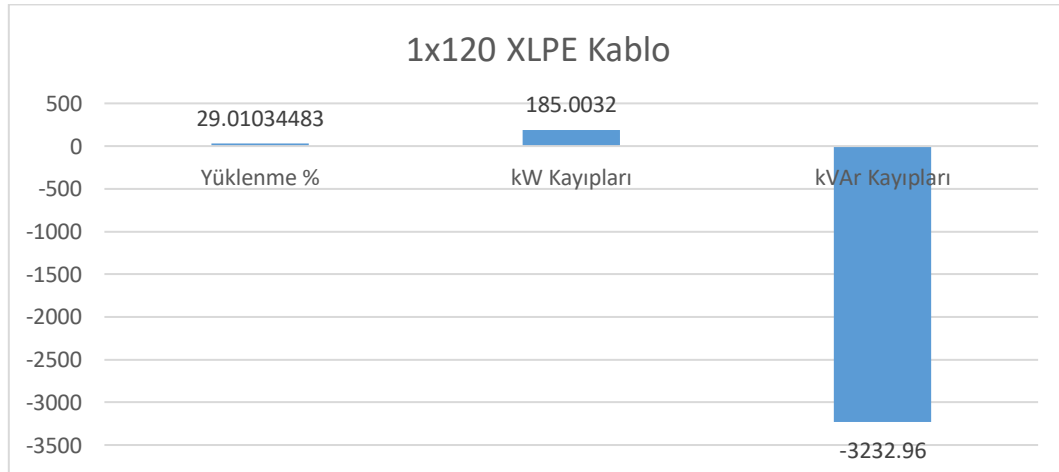
Şekilden de görüldüğü üzere 1x240 mm² kesitli XLPE kablo kullanılması durumunda, aktif güç kayıpları 91,277 kW seviyesinde gerçekleşmiş, reaktif güç

kayıpları ise -3711,68 kVAR olarak kaydedilmiştir. Kablo yüklenme oranı ise %17,231 seviyesindedir. Şekil 4.34’de her istasyonda bir servis trafosu aktif iken, 2000 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıplarını göstermektedir.



Şekil 4.34 2000 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği

Şekil 4.34 incelendiğinde 2000 kVA transformatör seçilmiş olan mevcut durumda hat genelinde trafoların yüklenme oranları ortalama % 16,76 iken aktif kayıplarda toplam 1061,59 kW değerindedir. Şekil 4.35’de her istasyonda tek trafo aktif iken 120 mm² XLPE kabloların yüklenme oranları, aktif kayıpları ve reaktif kayıpları gösterilmiştir.

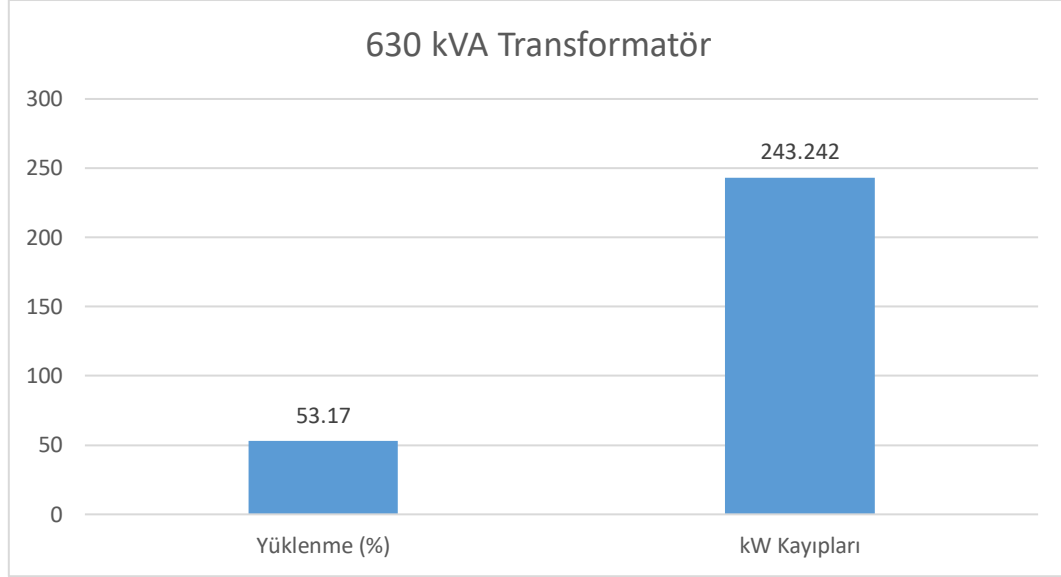


Şekil 4.35 Hat genelinde 1x120 XLPE Kablo değerleri

Şekilden de görüldüğü üzere 1x120 mm² kesitli XLPE kablo kullanılması durumunda, aktif güç kayıpları 185,03 kW seviyesinde gerçekleşmiş, reaktif güç

kayıpları ise -3232,96 kVAR olarak kaydedilmiştir. Kablo yüklenme oranı %29,01 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.36'da her istasyonda bir servis trafosu aktif iken, 630 kVA transformatör için mevcut yüklenme oranlarına göre aktif kayıplarını göstermektedir.



Şekil 4.36 630 kVA transformatörlerin hat geneli aktif kayıplar grafiği

Şekil 4.36 incelendiğinde 630 kVA transformatör seçilmiş olan mevcut durumda hat genelinde trafoların yüklenme oranları ortalama %53,17 iken aktif kayıplarda toplam 243,242 kW değerindedir.

Acil durum (yangın) senaryolarında, metro sistemlerinde kullanılan servis trafolarının yalnızca normal işletme yüklerinin değil, aynı zamanda yangın gibi olağanüstü durumlarda oluşabilecek kısa süreli yüksek yük taleplerini de karşılayabilmesi kritik önem taşır. Bu noktada Görev Sınıfı VI (Class VI) olarak tanımlanan transformatörlerin yüksek aşırı yük dayanımı özellikleri ön plana çıkar. Class VI transformatörler, %100 sürekli yükün yanı sıra, 2 saat boyunca %150 yük ve 1 dakika süreyle %300 yük taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu kapasite, özellikle yangın anında oluşan yük artışlarını güvenle karşılamaya imkân tanır. Buna göre incelenen senaryolar dikkate alındığında en düşük değerli konfigürasyon da dahi acil yüklerin sorunsuz beslenebileceği görülmüştür.

4.3.4 Tüm Senaryoların Kayıp Analizi

Trafo gücü ve kablo kesiti değişimlerinin sabit yük altındaki etkilerini üzerinde gerçekleştirilen analizler, sistem performansının yalnızca kapasite karşılamaya değil, aynı zamanda kayıpları minimize edecek şekilde bütüncül olarak optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Trafo gücü arttıkça yüklenme oranı azalsa da toplam aktif kayıplar artmış, özellikle büyük güçlü trafolarla düşük yüklenmede demir kayıplarının toplam yüke oranını yükseltmiştir. Kablo kesitinin artırılması ise direnç kaynaklı kayıpları azaltarak sistem verimliliğini anlamlı ölçüde yükseltmiştir. Bu nedenle, enerji iletim sistemlerinde trafo ve kablo seçimi birlikte değerlendirilerek, hem güvenli hem de verimli bir işletme için tasarım yapılmalıdır. Tablo 4.9’da 2000, 1000 ve 630 kVA transformatörlerin farklı kesitteki kablolar ile birlikte kullanımındaki toplam 17 istasyondaki aktif ve reaktif kayıpları gösterilmiştir.

Tablo 4.9 Transformatör ve XLPE kablo güç kayıpları

Trafo Gücü (kVA)	Kablo Kesiti (mm ²)	Maks. Yüklenme Oranı (%)	Trafo Aktif Kaybı (kW)	Trafo (kVAr)	Kablo Kaybı (kW)	Kablo (kVAr)
2000	240	10	569,35	13,095	100,6915	-4077,11
2000	185	10	574,94	13,222	131,3781	-3539,479
2000	120	10	584,78	13,45	202,8813	-3209,639
1000	240	18,4	357,06	26,777	93,0503	-4097,37
1000	185	18,4	356,61	27,106	121,4241	-3742,57
1000	120	18,4	355,91	27,046	185,1491	-3230,308

Tablo 4.9 Transformatör ve XLPE kablo güç kayıpları (devamı)

Trafo Gücü (kVA)	Kablo Kesiti (mm ²)	Maks. Yüklenme Oranı (%)	Trafo Aktif Kaybı (kW)	Trafo (kVAr)	Kablo Kaybı (kW)	Kablo (kVAr)
630	240	29	253,67	40,842	93,0384	-4101,07
630	185	29	253,4	41,048	121,3693	-3654,59
630	120	29	252,9	40,963	185,0032	-3232,96

4.4 Elektrifikasyon Sistemi Ekonomik Analizi

M7 metro hattına ait elektrifikasyon verileri ışığında hattın ekonomik analizi işletme maliyeti ve ilk kurulum maliyeti açısından incelenmiştir.

4.4.1 İşletme Maliyeti Açısından Analiz

Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde seçilen trafoların boyutları ile kablo kesitlerinin önemini, bir önceki bölümlerde yapılan ETAP analizleriyle tespit ettik. Bu analizler sonucunda elde edilen kayıpların işletme giderlerine etkisini, ticari birim fiyat üzerinden ve yalnızca trafolar değiştirilmiş haliyle inceleyeceğiz.

Metro hatları, yüksek enerji tüketimleri nedeniyle genellikle sanayi tarifesini üzerinden faturalandırılmaktadır. Bu bağlamda, 2025 yılı itibarıyla İstanbul'da metro hatları için elektrik birim fiyatı yaklaşık 4,37 TL/kWh olarak uygulanmaktadır [64].

2000 kVA transformatör için hazırlanan tablolar ile aynı şekilde 1000 kVA ve 630 kVA için de gerçekleştirdiğimizde elde edilen değerlerin tamamı aşağıdaki Tablo 4.10'da verilmiştir. Tabloda paylaşılan günlük aktif kayıp ortalama günlük değerdir. Yıllık maliyet, günlük ortalama kW değeri üzerinden 365 gün olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.10 Trafo gücüne göre (mevcut kablolar ile) günlük ve yıllık maliyet tablosu

Toplam Trafo Gücü (kVA)	Toplam Aktif Kayıp (kW)	Günlük Maliyet (TL/gün)	Yıllık Maliyet (TL/yıl)
2000	670,04	70.288,76	25.639.408,40
1000	450,11	47.205,57	17.231.331,05
630	346,71	36.379,74	13.282.602,60

Aynı trafo değerleri için 185 mm² olarak hesapladığımızda elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.11 de verilmiştir.

Tablo 4.11 Trafo gücüne ve 185 mm² kabloya göre günlük ve yıllık maliyet tablosu

Toplam Trafo Gücü (kVA)	Toplam Aktif Kayıp (kW)	Günlük Maliyet (TL/gün)	Yıllık Maliyet (TL/yıl)
2000	706,3181	74.016,08	27.015.867,44
1000	478,0341	50.144,37	18.804.684,68
630	374,7693	39.276,74	14.332.019,10

Aynı trafo değerleri için 120 mm² olarak hesapladığımızda elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.12 de verilmiştir.

Tablo 4.12 Trafo gücüne ve 120 mm² kabloya göre günlük ve yıllık maliyet tablosu

Toplam Trafo Gücü (kVA)	Toplam Aktif Kayıp (kW)	Günlük Maliyet (TL/gün)	Yıllık Maliyet (TL/yıl)
2000	787,6613	82.608,86	30.151.234,99
1000	541,0591	56.686,73	20.693.663,88
630	437,9032	45.867,34	16.743.580,10

4.4.2 Kurulum Maliyeti Açısından Analiz

Yapılan ETAP analizleri sonucunda, mevcut durumda kullanılan 2000 kVA'lık trafoların, hatlardaki düşük yüklenme oranlarına kıyasla gereğinden yüksek kapasiteli olduğu belirlenmiştir. Alternatif olarak önerilen 1000 kVA ve 630 kVA trafolar, hem yük taleplerini karşılamakta yeterli bulunmuş hem de daha düşük aktif güç kayıplarıyla çalıştıkları için enerji verimliliği açısından avantaj sağlamaktadır.

Buna ilaveten OG enerji iletim hattı için alternatif olarak seçilebilecek diğer kablo seçenekleri de düşünüldüğünde ilk yatırım maliyetinde ciddi tasarruf elde edilebileceği de anlaşılmaktadır. Aşağıda Tablo 4.13'de 2000 kVA, 1000 kVA ve 630 kVA transformatörlerin birim fiyatları ile OG XLPE kabloların birim fiyatları yaklaşık değerler üzerinden hesaplanarak verilmiştir. Kablo mesafesi hattın uzunluğu, çift ring olması ve depo sahası dikkate alınarak yaklaşık olarak hesap edilmiş ve 130 km olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.13 İlk kurulum maliyeti hesap tablosu

Trafo Gücü (kVA)	Trafo Birim Fiyat (€)	Toplam Trafo Maliyeti (€)	Kablo Kesiti (mm²)	Kablo Birim Fiyat (\$/m)	Toplam Kablo Maliyeti (\$)
2000	46.900	1.641.500	240	38	4.940.000
1000	40.200	1.407.000	185	25	3.250.000
630	37.500	1.312.500	120	19	2.470.000

Yukarda verilen değerler ile 10 farklı seçenekte işletme kurulabilmektedir.

5

SONUÇ

Bu çalışmada, raylı sistemlerde elektrifikasyon tasarım kriterleri teknik ve standartlar çerçevesinde kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Elektrifikasyon sistemine ait her bir ekipman, ilgili uluslararası standartlar olan IEEE, EN ve IEC normları doğrultusunda ayrı ayrı değerlendirilmiş; sistem bileşenlerinin teknik yeterliliği ve uygunluğu ayrıntılı olarak incelenmiştir. İstanbul M7 metro hattı özelinde seçilen elektrifikasyon ekipmanları, bu standartlar çerçevesinde teknik bazda karşılaştırılmış ve uyumlulukları değerlendirilmiştir. Ayrıca, diğer ülkelerde uygulanan raylı sistem elektrifikasyon standartları karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, uluslararası uygulamalarla benzerlik ve farklılıklar ortaya konmuştur. Devamında, M7 metro hattı için geliştirilen dokuz farklı senaryo kapsamında yük akışı analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler, Metro İstanbul A.Ş.'den temin edilen enerji analizör verileri ile karşılaştırılmış; yapılan simülasyonların gerçek işletme koşullarıyla tutarlılık gösterdiği teknik olarak doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, her bir senaryo için ilk yatırım maliyeti ile günlük ve yıllık bazda işletme maliyetleri hesaplanmış ve ekonomik açıdan en uygun trafo ve kablo kombinasyonları teknik ve mali kriterler ışığında belirlenmiştir.

Yapılan ekonomik analizler sonucunda, mevcut durumda kullanılan 2000 kVA trafo ve 240 mm² kesitli kablo kombinasyonuna kıyasla, 1000 kVA trafo ve 185 mm² kablo tercih edilseydi toplam ilk yatırım maliyetinde yaklaşık % 28,5 oranında, 630 kVA trafo ve 120 mm² kablo tercih edilseydi ise yaklaşık % 41,5 oranında tasarruf sağlanmış olacağı hesaplanmıştır. İşletme maliyetleri açısından ise yıllık enerji kayıpları dikkate alındığında, 1000 kVA trafo ve 185 mm² kablo kombinasyonu ile yaklaşık % 20,4; 630 kVA trafo ve 120 mm² kablo kombinasyonu ile yaklaşık % 28,5 oranında yıllık maliyet tasarrufu elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hem ilk yatırım hem de işletme sürecinde küçük kapasiteli trafolar ve uygun kesitte kabloların tercih edilmesinin, sistemin toplam maliyetini optimize etmede önemli bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan analizler sonucunda acil durum senaryolarının da daha düşük kapasiteli konfigürasyonlar ile karşılanabileceği gösterilmiştir.

Tüm teknik ve ekonomik analizler birlikte değerlendirildiğinde, yalnızca yatırım ve işletme maliyetleri değil, aynı zamanda sistem güvenilirliği ve sürekliliği de karar verme sürecinde kritik rol oynamaktadır. Özellikle İstanbul gibi yüksek nüfus yoğunluğuna ve karmaşık toplu taşıma altyapısına sahip büyükşehirlerde, metro hatlarının kesintisiz işletilmesi kamu hizmeti açısından hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda, bir orta gerilim (OG) ring kolunun devre dışı kalması veya iki ring kolunun aynı anda kaybedilmesi gibi senaryolarda işletme sürekliliğinin sağlanması, yalnızca enerji verimliliği değil, aynı zamanda yedeklilik ve sistem esnekliği açısından da güçlü bir altyapı gerektirmektedir. Dolayısıyla, her ne kadar düşük güçlü trafo ve daha küçük kesitli kablo seçenekleri ekonomik açıdan avantajlı görünse de, sistemin güvenli çalışmasını garanti altına alacak, arıza anında yedekli besleme olanağı sunan, 1000 kVA kapasiteli trafo ve 185mm² kesitli iletim kablolarının tercih edilmesi, kent içi raylı ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından daha uygun bir tasarım olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, yalnızca teorik hesaplamalara dayalı analizlerin ötesine geçilerek, sahadan elde edilecek gerçek zamanlı enerji tüketim verileriyle modellerin doğrulanması hedeflenebilir. Bu kapsamda, farklı metro hatlarından temin edilecek detaylı enerji analizör kayıtları, yük profilleri ve arıza senaryoları ile eşleştirilerek daha yüksek doğrulukta işletme simülasyonları geliştirilebilir. Ayrıca, enerji yönetimi stratejilerinin sahadaki performansını değerlendiren bütünlük bir karar destek sistemi oluşturulması, sistem tasarım ve işletme süreçlerine katkı sağlayacaktır.

Son olarak, yalnızca Avrupa menşeli standartlarla sınırlı kalmaksızın, Amerika Birleşik Devletleri (IEEE/ANSI), Japonya (JISC) ve Çin (GB/T) gibi gelişmiş ülkelerin uyguladığı normlar da dikkate alınarak, daha bütüncül ve karşılaştırmalı bir tasarım yaklaşımı benimsenmelidir. Bu sayede, uluslararası uygulamalarla uyumlu, teknik ve ekonomik açıdan optimize edilmiş sistem tasarımı ve ekipman seçimi gerçekleştirilerek, küresel ölçekte rekabetçi ve sürdürülebilir altyapı çözümlerine katkı sağlanabilir.

- [1] A. E. Şimşek, “Elektrikli raylı sistemlerin incelenmesi ve kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji kalitesi ve geri kazanımı,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [2] Massel, A. (2018). Operational criteria in the justification of electrification of railway lines. “MATEC Web of Conferences”, 180, 06005. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818006005>
- [3] Zhang, L., Li, X., Liang, S., & Han, D. (2022). Research on the influence of electric railway bilateral power supply on power system and countermeasures. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 137, 107769. doi:10.1016/j.ijepes.2021.107769
- [4] A. Yıldız, “Raylı Ulaşım Sistemlerinde Elektriksel Enerji Verimliliğinin Artırılması,” yüksek lisans tezi, Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018
- [5] A. Yıldız, “Kentsel raylı ulaşım sistemleri için akıllı enerji yönetim algoritması geliştirilmesi,” Doktora Tezi, Elektrik Müh. ABD, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2023.
- [6] E. Aksu ve M. Kaplan, “Raylı sistem araçlarında enerji verimliliğinin iyileştirilmesi,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 39, ss. 63–70, 2022.
- [7] R. B. Ulen, "Automated People Mover Systems," in *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art*, N. J. Ashford and M. E. Ben-Akiva, Eds., Oxford, UK: Pergamon, 2011, pp. 247–278.
- [8] A. Han, L. Yu, L. Wang, X. Jia, W. Sun ve Y. Bi, “Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics,” in *Proc. 1st Int. Conf. Electron. Instrum. Inf. Syst. (EIIS)*, Harbin, China, Jun. 2017.
- [9] White, R.D.. (2015). DC Electrification Supply System Design. 10.1049/ic.2015.0330
- [10] D. Seimbille, *Design of Power Supply System in DC Electrified Transit Railways - Influence of the High Voltage Network*, 2014.
- [11] Ö. Doğruer ve Ş. Kuşdoğan, “Demiryolu hatlarında elektrifikasyon sistem tasarımı ve uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Müh. ABD, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2019.
- [12] G. B. Worku ve A. B. Kebede, "Autotransformer fed traction power supply system: analysis, modeling and simulation," Addis Ababa Institute of Technology, [Online]. Available: <https://www.aait.edu.et> [Erişim: 27 Nisan 2025].
- [13] The design of railway electrification at interfaces between a.c. and d.c. electrified lines Dr R. D. White, F. Waterland, D. C. Knights Atkins Rail Limited A.I.C. on electromagnetic compatibility: London, 21-09-1999

- [14] M. T. Akçay, "Demiryollarında optimum elektrifikasyon sisteminin tasarımı, analizi ve enerji yönetimi," Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Müh. ABD, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, Şubat 2018.
- [15] M. T. Akçay, B. B. Albayrak, İ. Kocaarslan, A. Ersoy, and H. Tiryaki, "1500 V DC Beslemeli Bir Demiryolu Hattı Trafo Yerleşiminin Optimizasyonu ve Sultangazi-Arnavutköy Hattına Uygulaması," in Proc. Conference, 2019
- [16] Iliev, I.K.; Kryukov, A.V.; Suslov, K.V.; Cherepanov, A.V.; Hieu, N.Q.; Beloev, I.H.; Valeeva, Y.S. Modeling the Operating Conditions of Electric Power Systems Feeding DC and AC Traction Substations. *Energies* 2024, 17, 4692. <https://doi.org/10.3390/en17184692>
- [17] Z. Tian, N. Zhao, S. Hillmansen, S. Su, and C. Wen, "Traction Power Substation Load Analysis with Various Train Operating Styles and Substation Fault Modes," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2788, Jun. 2020. doi: 10.3390/en13112788
- [18] V. Sychenko, Y. Sokol ve Y. Voitovych, "AC/DC converter for DC traction power supply system with high-speed train operation," in *Proc. 2019 IEEE 6th Int. Conf. Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, May 2019, pp. 116–121. doi: 10.1109/ESS.2019.8764207.
- [19] X. Meng, Q. Zhang, Z. Liu, G. Hu, F. Liu, and G. Zhang, "Multiple Vehicles and Traction Network Interaction System Stability Analysis and Oscillation Responsibility Identification," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 6, pp. 6148-6162, Jun. 2024
- [20] N. Yan, J. Wang, A. Ping, R. Liu, R. Xiao, and H. Yan, "Simulation Study on Dynamic Distribution of Ground Fault Current in Low and Medium Speed Magnetic Levitation Traction Power Supply System," in 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1-6
- [21] H. Yang, X. Du, B. Chen, Y. Cao, L. Zheng, and H. Wang, "The Influence of Electrified Railway Traction Power Supply System on the Power Quality of Regional Power Grid," in 2023 IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE), Jinzhou, China, 2023, pp. 1
- [22] C. Lu, X. Li ve S. Chen, "Composite load equivalent modeling of traction power supply system," in *Proc. 2021 3rd Asia Energy and Electr. Eng. Symp. (AEEES)*, Chengdu, China, Mar. 2021.
- [23] Wang, J.; Han, Y.; Wang, X.; Zhan, X.; Li, L.; Chen, W. Research on Optimal Dispatch of Multi-energy Complementary Traction Power Supply System Based on PV Uncertainty. In Proceedings of the 10th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE), Nagoya, Japan, 8–10 September 2023
- [24] Y. Wang, J. Gao, F. Guo, and Q. Meng, "Optimal siting of shared energy storage projects from a sustainable development perspective: A two-stage framework," *J. Energy Storage*, vol. 79, p. 110213, 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.110213
- [25] Beloev, I., Davtyan, V., Kryukov, A., Grozev, D., Suslov, K., Kryukov, A., Shi, J., & Valeeva, Y. (2024). Modeling the operating conditions of traction

power supply systems incorporating renewable energy sources. Research Article. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4861026/v1>

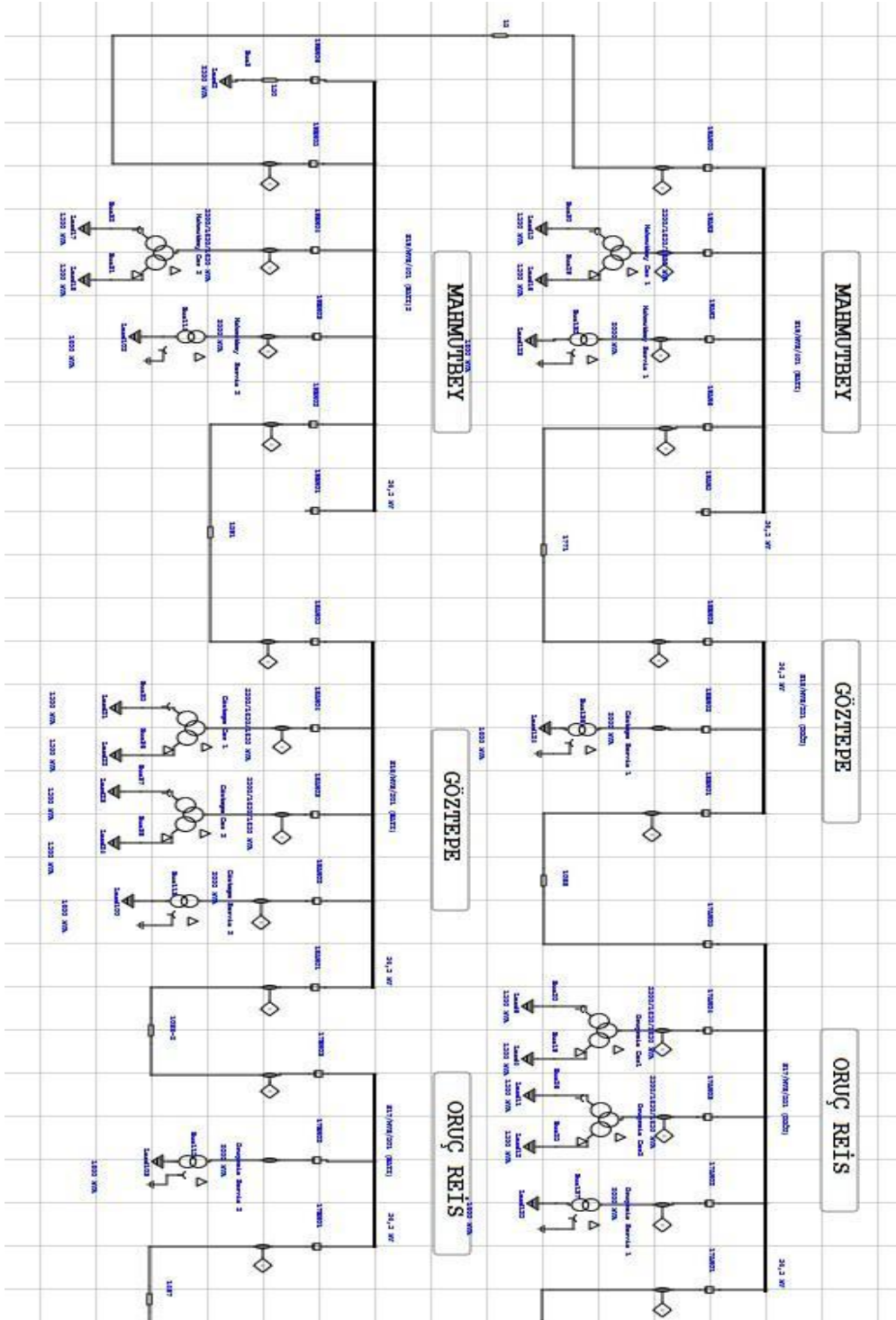
- [26] Wang, Y., Gao, J., Guo, F., & Meng, Q. (2024). Optimal siting of shared energy storage projects from a sustainable development perspective: A two-stage framework, North China Electric Power University, Beijing 102206, China
- [27] J. Guo, X. Wu, H. Liang, J. Hu, and B. Liu, "Digital-twin based power supply system modeling and analysis for urban rail transportation," in Proc. of the Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University
- [28] V. Nezevak and V. Cheremisin, "Prediction of Bandwidth Increase of Railways Areas at the Change Expense of The Direct Current Traction Power Supply System Characteristics by Implementation of Electric Storage Units," in 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 450-454
- [29] S. Yang, Y. Chen, Z. Dong ve J. Wu, "A collaborative operation mode of energy storage system and train operation system in power supply network," *Energy*, vol. 276, p. 127617, 2023.
- [30] IEEE Std 1653.3, "IEEE Guide for Rail Transit Traction Power Systems Modeling," IEEE, 2012.
- [31] F. Karakuş, "Raylı sistemlerde orta gerilim elektrifikasyon sisteminin modellenmesi ve besleme senaryolarının belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2017.
- [32] S. Çürükova Kale, O. Sönmez, Y. B. Demiroğlu, E. Sakallıoğlu ve B. Albozacı, "Çer transformatörlerinde boşta çalışma kayıplarının sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 19, ss. 171–183, Ocak 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1395174.
- [33] EN 50329, "Railway applications - Fixed installations - Traction transformers," European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).
- [34] EN 50163, "Railway applications - Supply voltages of traction systems," European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).
- [35] VDE 0532, "Güç Transformatörleri - Teknik Özellikler ve Deney Gereksinimleri," Alman Elektrik, Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Birliği (VDE), Berlin, Almanya, 2010.
- [36] Avrupa Birliği Komisyon Yönetmeliği (EU) No 548/2014, "Küçük, Orta ve Büyük Güç Transformatörleri için Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2009/125/EC Sayılı Direktifinin Uygulanmasına İlişkin Yönetmelik," Avrupa Birliği Resmi Gazetesi, L 152/1, 22 Mayıs 2014.
- [37] Y. Özupak ve M. S. Mamiş, "Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, no. 4(1), 2019

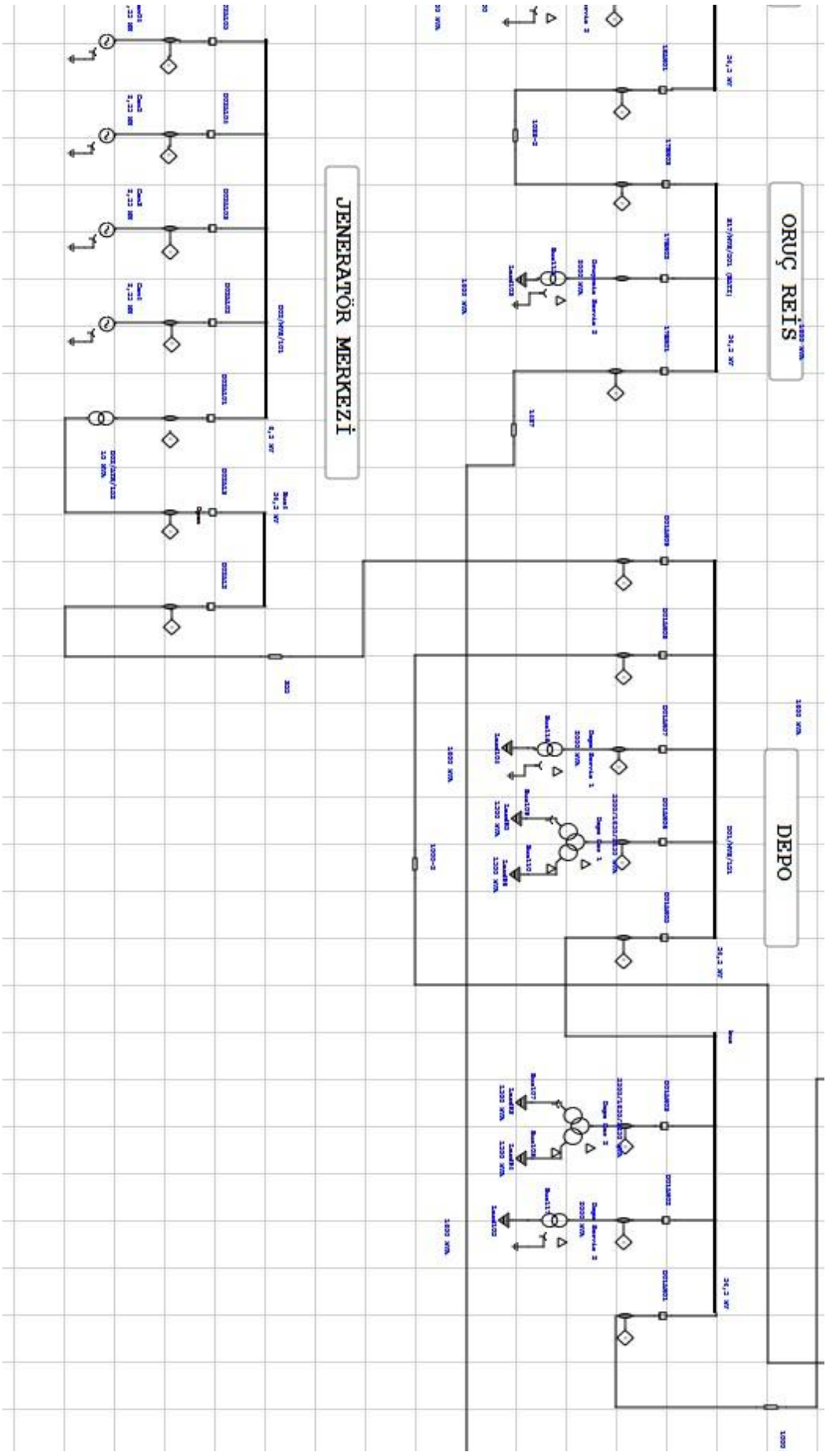
- [38] Ş. Kuşdoğan ve Ö. Doğruer, "Demiryolu elektrifikasyonunda katener sistem tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 14, ss. 130–142, Temmuz 2021. doi: 10.47072/demiryolu.871106.
- [39] EN 50122-1, "Demiryolu Uygulamaları - Sabit Tesisler - Elektrik Güvenliği, Topraklama ve Geri Dönüş Devresi - Bölüm 1: Elektrik Çarpmasına Karşı Koruyucu Önlemler," Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC), Brüksel, Belçika, 2011.
- [40] IEC 60146, "Yarı İletken Dönüştürücüler - Genel Gereksinimler ve Hat Komütasyonlu Dönüştürücüler," Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), Cenevre, İsviçre, 2009.
- [41] EN 50328, "Demiryolu Uygulamaları - Sabit Tesisler - Trafo Merkezleri İçin Elektronik Güç Dönüştürücüleri," Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC), Brüksel, Belçika.
- [42] S. Uluskan ve A. R. Atam, "Raylı Sistem Elektrifikasyonu Katener Sistemlerinde Pandül Verilerinin Yapay Sinir Ağları ile Tasarlanması", *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 17, ss. 161–173, Ocak 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1220992.
- [43] Siemens AG, "SICAT Master," Siemens AG, Product Information document. [Online] Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6533f158-4a08-432c-affc-4567b0004b6e/siemens-sicat-master-pi-en.pdf>. [Accessed: Apr. 27, 2025].
- [44] EN 61000-2, "Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) - Bölüm 2: Çevre," Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC), Brüksel, Belçika.
- [45] IEC 60332-3-24, "Yangın Koşullarında Elektrik ve Fiber Optik Kablolar Üzerinde Testler - Bölüm 3-24: Dikey Monte Edilmiş Kablo Demetlerinin Dikey Alev Yayılma Testi - Kategori C," Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), Cenevre, İsviçre.
- [46] IEC 60502-1, "Güç Kabloları - Anma Gerilimleri 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) ile 30 kV ($U_m = 36$ kV) Arası İçin Kablolar - Bölüm 1: Anma Gerilimleri 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) ve 3 kV ($U_m = 3,6$ kV) Olan Kablolar," Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), Cenevre, İsviçre.
- [47] Railway Fasteners, "Rail Nylon Insulator," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.railway-fasteners.com/rail-nylon-insulator.html> [Erişim tarihi: 27 Nisan 2025].
- [48] CENELEC, *Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi - Bölüm 1: Elektrik çarpmasına karşı koruyucu hükümler* (EN 50122-1:2022), Avrupa Standardı
- [49] CENELEC, *Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi - Bölüm 2: Doğru akım çekişli sistemlerin neden olduğu kaçak akımların etkilerine karşı koruyucu hükümler* (EN 50122-2:2022), Avrupa Standardı
- [50] CENELEC, *Demiryolu uygulamaları - Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi - Bölüm 3: AC ve DC çekiş sistemlerinin karşılıklı etkileşimi* (EN 50122-3:2022), Avrupa Standardı

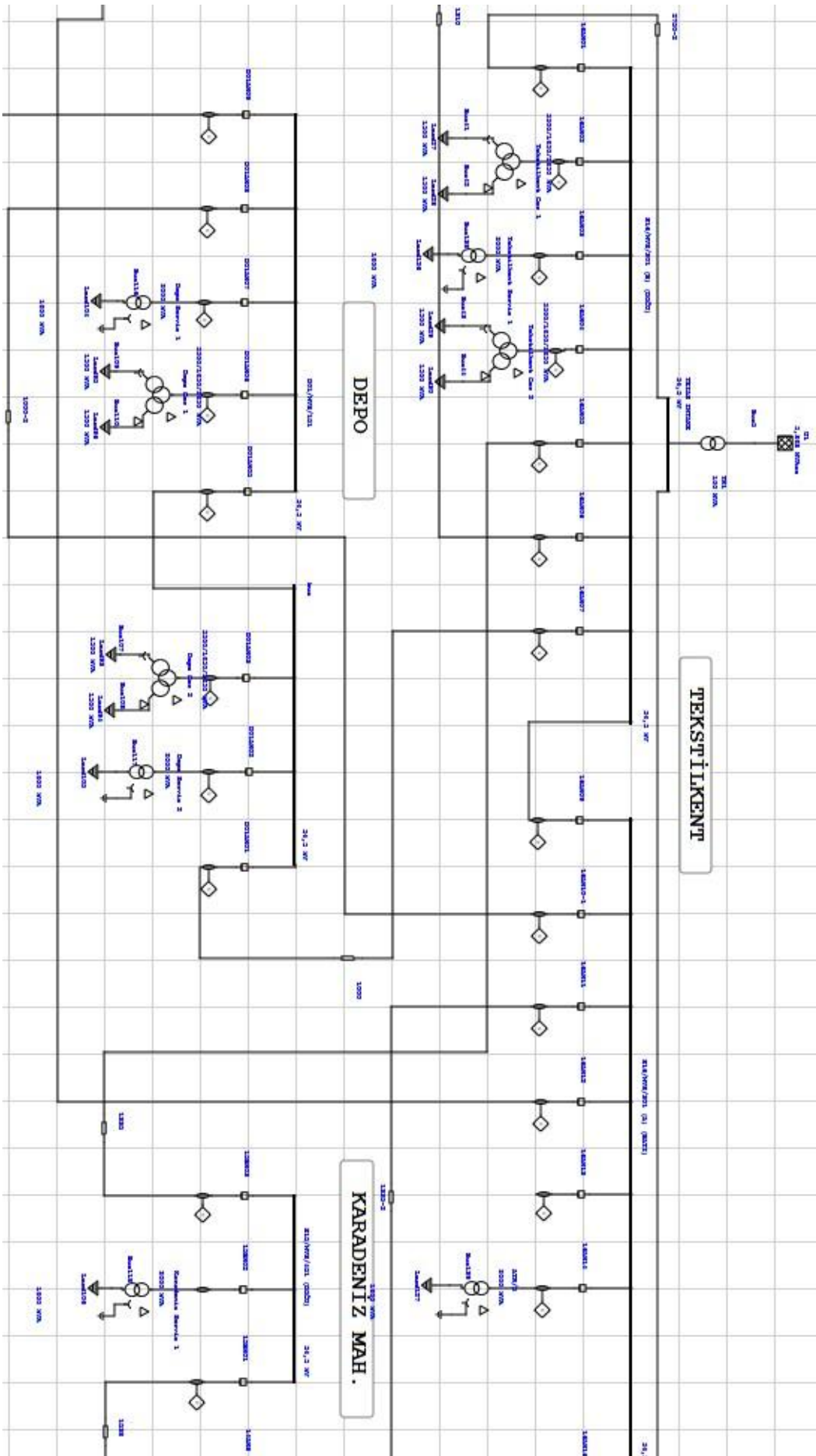
- [51] British Standards Institution, *1 kV a.c.'yi aşan elektrik tesislerinin topraklanması* (BS EN 50522:2022), İngiliz Standardı
- [52] Aktif Elektroteknik, "BCT Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemleri – Statik Kontaktörlü," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://aktif.net/urunler/bct-harmonik-filtreli-kompanzasyon-sistemleri-statik-kontaktorlu/> [Erişim tarihi: 24 Nisan 2025].
- [53] Metro İstanbul, "Proje Halindeki Hatlar," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/ProjeHalindekiHatlar?projeInsaat=0&q=13> [Erişim tarihi: 24 Nisan 2025].
- [54] A. E. Şimşek, "Elektrikli raylı sistemlerin incelenmesi ve kent içi raylı ulaşım sistemlerinde enerji kalitesi ve geri kazanımı," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [55] Metro İstanbul A.Ş., "Mahmutbey – Yıldız Metro Hattı Cer Gücü Sistemi Simülasyon Raporu," İç Rapor, İstanbul, Aralık 2019.
- [56] CENELEC, *Elektromanyetik uyumluluk (EMC) – Bölüm 6-1: Genel standartlar – Konut, ticari ve hafif sanayi ortamları için bağımsızlık standardı* (EN 61000-6-1:2019), Avrupa Standardı
- [57] M. Can ve N. Yörükeren, "Kent içi raylı sistemlere yeni hat entegrasyonunda işletme modellerinin analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 13, ss. 1–13, Ocak 2021. doi: 10.47072/demiryolu.773440.
- [58] EN 50124-1, "Demiryolu Uygulamaları - İzolasyon Koordinasyonu - Bölüm 1: Temel Gereklilikler - Tüm Elektrikli ve Elektronik Ekipman için Havai Mesafeler ve Kaçak Yollar," CENELEC (Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi), 2017.
- [59] IEC 61373, "Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu Araçları Donanımı - Şok ve Titreşim Testleri," IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu), 2010.
- [60] IEC 60947, "Alçak Gerilim Şalt ve Kontrol Cihazları," IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu), 2020.
- [61] IEC 60502-1, "Nominal Gerilimleri 1 kV'tan ($U_m = 1,2$ kV) 30 kV'a ($U_m = 36$ kV) Kadar Olan Kablolar ve Bunların Aksesuarları - Bölüm 1: 1 kV'tan ($U_m = 1,2$ kV) 3 kV'a ($U_m = 3,6$ kV) Kadar Olan Kablolar," IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu), 2021.
- [62] IEC 60332-3-24, "Elektrik ve Fiber Optik Kablolar - Yangın Şartları Altında Testler - Bölüm 3-24: Dikey Olarak Monte Edilmiş Demet Kablolarda Dikey Alev Yayılma Testi - C Kategorisi," IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu), 2018.
- [63] Siemens AG, *Operating Manual for GEAFOL Neo Cast-Resin Dry-Type Distribution Transformer*, Siemens GEAFOL Neo Operating Manual, 32 pp., [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/1792765/Siemens-Geafol-Neo.html>. Accessed: 24 Apr. 2025.
- [64] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), [Çevrimiçi] <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari> Erişim tarihi: 9 Mayıs 2025.

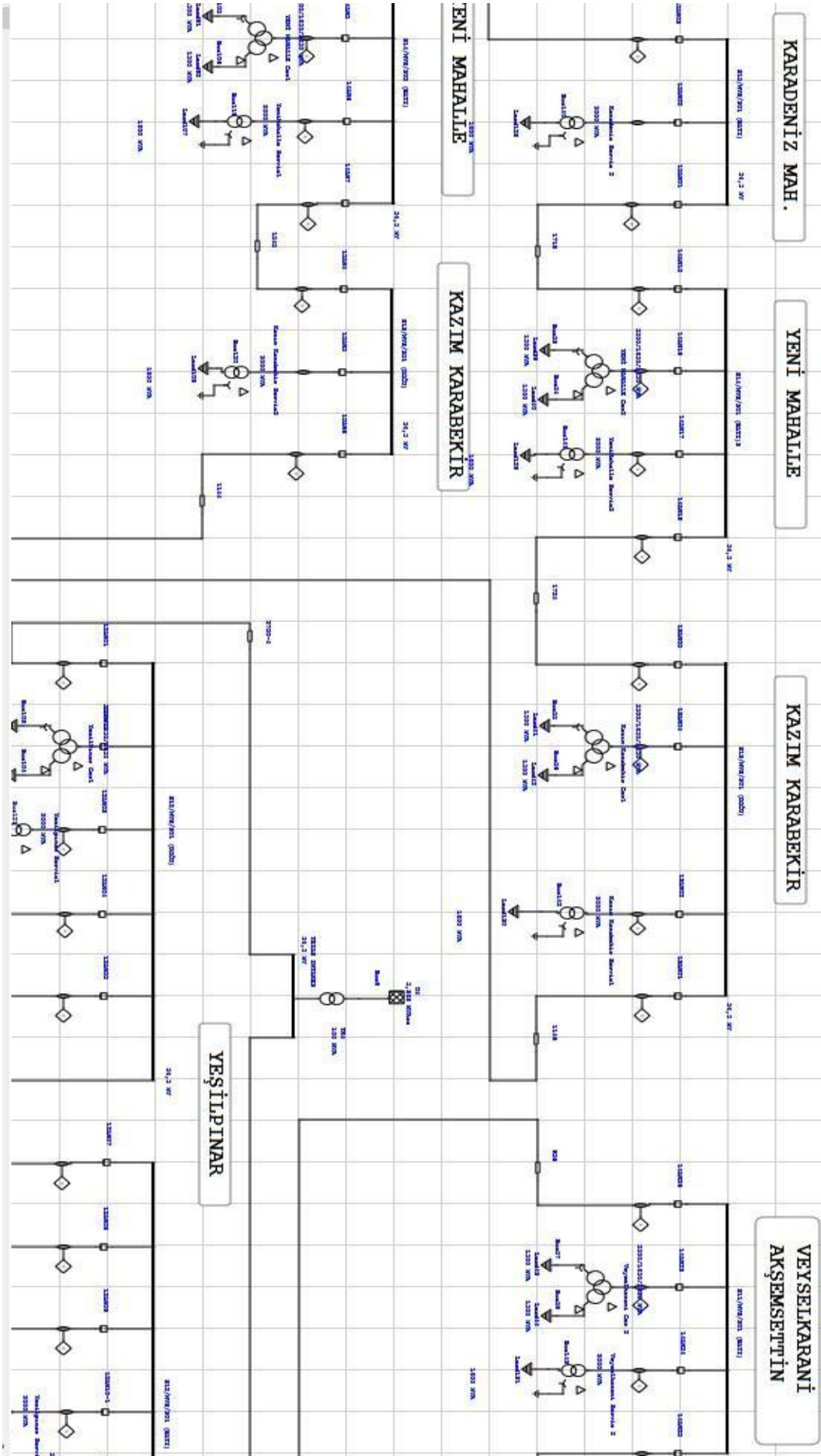
A

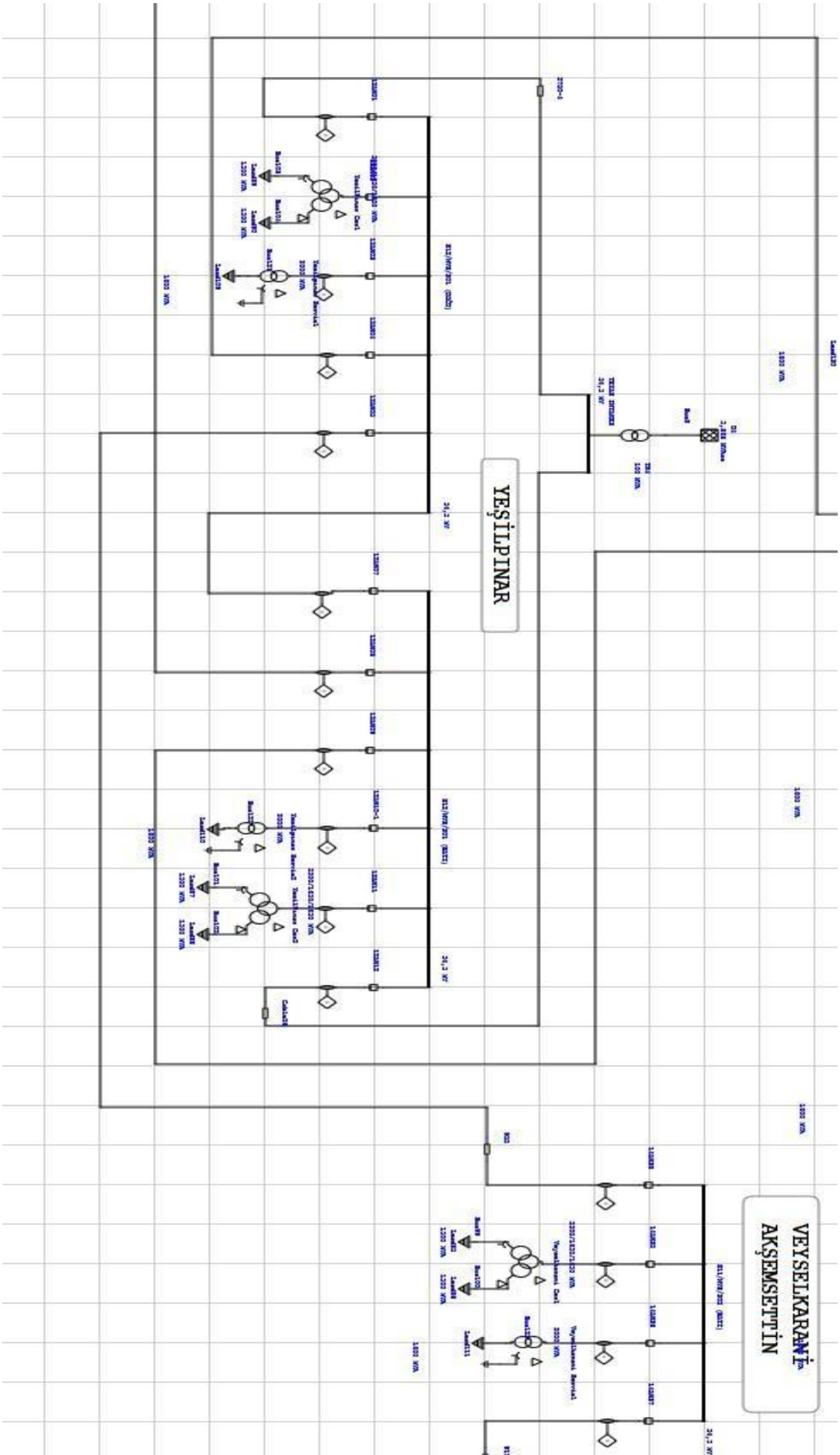
M7 MAHMUTBEY – YILDIZ METRO HATTI ETAP MODELİ

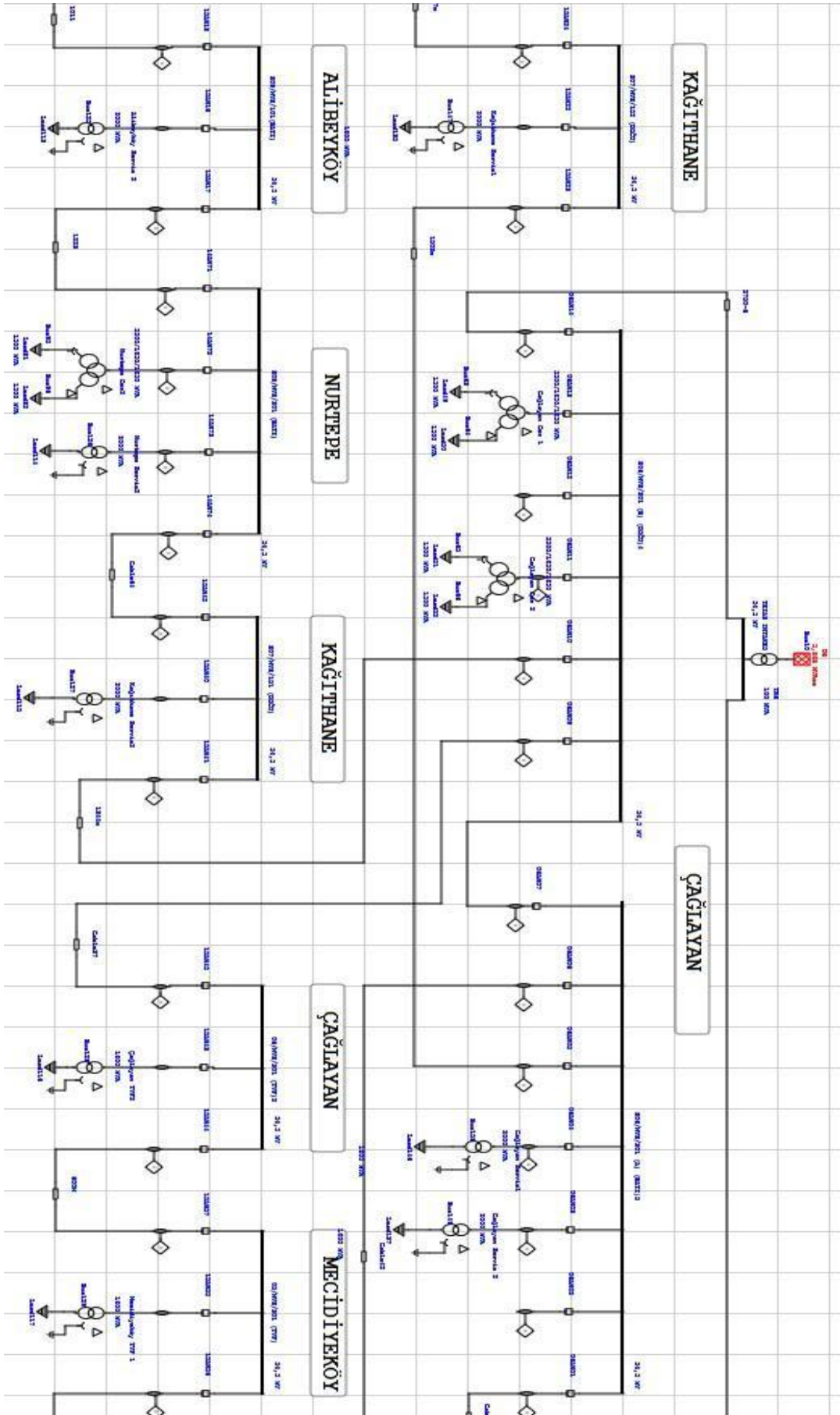












B

ETAP ANALİZİ TABLOLARI

Senaryo 1 Mevcut Trafo Parametreleri					
ID	Trafo Gücü	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	1600 kVA	10,9	11,01	0,299	6,24
Alibeyköy Servis 2	1600 kVA	10,9	11,01	0,299	6,24
Besiktas Servis 1	2000 kVA	8,6	12,66	0,291	6,21
Besiktas Servis2	2000 kVA	8,6	12,66	0,291	6,21
Cağlayan Servis1	2000 kVA	8,9	13	0,299	6,24
Cağlayan Servis 2	2000 kVA	8,9	13	0,299	6,24
Darphane Servis 1	2000 kVA	8,7	12,78	0,294	6,22
Darphane Servis 2	2000 kVA	8,7	12,79	0,294	6,22
Depo Servis 1	2000 kVA	8,9	13,02	0,3	6,24
Depo Servis 2	2000 kVA	8,9	13,02	0,3	6,24
Göztepe Servis 1	2000 kVA	8,8	12,93	0,297	6,23
Göztepe Servis 2	2000 kVA	8,8	12,91	0,297	6,23
Kabatas Servis1	2000 kVA	8,6	12,64	0,291	6,2
Kabatas Servis2	2000 kVA	8,6	12,64	0,291	6,2
Karadeniz Servis 1	2000 kVA	8,9	13,04	0,3	6,24
Karadeniz Servis 2	2000 kVA	8,9	13,04	0,3	6,24
Kazım Karabekir Servis1	2000 kVA	8,9	13,06	0,3	6,25
Kazım Karabekir Servis2	2000 kVA	8,9	13,07	0,301	6,25
Kağıthane Servis1	1600 kVA	10,9	11	0,299	6,24
Kağıthane Servis2	1600 kVA	10,9	11	0,299	6,24
Mahmutbey Servis 2	2000 kVA	8,8	12,88	0,296	6,23
Mahmutbey Servis 1	2000 kVA	8,8	12,88	0,296	6,23

Mecidiyeköy Servis1	2000 kVA	8,8	12,87	0,296	6,23
Mecidiyeköy Servis 2	2000 kVA	8,8	12,87	0,296	6,23
Mecidiyeköy TVF 1	2000 kVA	8,8	12,92	0,297	6,23
Mecidiyeköy TVF 2	2000 kVA	8,8	12,92	0,297	6,23
Nurtepe Servis1	2000 kVA	8,9	13	0,299	6,24
Nurtepe Servis2	2000 kVA	8,9	13	0,299	6,24
Oruçreis Servis 1	2000 kVA	8,8	12,95	0,298	6,23
Oruçreis Servis 2	2000 kVA	8,9	12,97	0,298	6,24
Tekstilkent Servis 1	2000 kVA	8,9	13,04	0,3	6,24
Tekstilkent servis 2	2000 kVA	8,9	13,04	0,3	6,24
Veyselkarani Servis1	2000 kVA	8,9	13,05	0,3	6,25
Veyselkarani Servis 2	2000 kVA	8,9	13,05	0,3	6,25
YeniMahalle Servis1	2000 kVA	8,9	13,05	0,3	6,25
YeniMahalle Servis2	2000 kVA	8,9	13,04	0,3	6,24
Yesilpınar Servis1	2000 kVA	8,9	13,09	0,301	6,25
Yesilpınar Servis2	2000 kVA	8,9	13,09	0,301	6,25
Yıldız Servis 1	2000 kVA	8,7	12,69	0,292	6,21
Yıldız Servis 2	2000 kVA	8,7	12,69	0,292	6,21
Çağlayan TVF1	2000 kVA	8,8	12,96	0,298	6,24
Çağlayan TVF2	2000 kVA	8,9	12,96	0,298	6,24
Çırçır Servis1	2000 kVA	8,9	13,03	0,3	6,24
Çırçır Servis2	2000 kVA	8,9	13,03	0,3	6,24
			569,35	13,095	

Senaryo 1 Mevcut Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 240	7,8	0,341	-99,58	0,02
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 240	7,8	0,343	-99,58	0,02
Besiktas – kabatas	1 - 1/C 240	7,9	0,424	-122,9	0,03
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 240	9,3	0,528	-108,2	0,04
Çağlayan – MecidiyeköyTVF	1 - 1/C 240	43,5	5,24	-42,02	0,07
Çağlayan-Çağlayan	1 - 1/C 240	44,2	4,5	-34,89	0,06
Circir Alibeyköy	1 - 1/C 240	8,5	0,333	-82,27	0,02
Circir Alibeyköy2	1 - 1/C 240	8,4	0,332	-82,27	0,02
Darphane – Yıldız	1 - 1/C 240	24,7	6,4	-178,7	0,16
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 240	26,2	6,64	-163,8	0,16
Depo – Jeneratör	1 - 1/C 240	0,1	0	-29,05	0
Göztepe – Orucreis	1 - 1/C 240	15,2	1,15	-87,23	0,05
Göztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 240	28,6	4,08	-83,31	0,09
Kabatas – Kabatas	1 - 1/C 240	0,7	0	-1,21	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 240	3,5	0,0749	-125,9	0,02
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 240	1,9	0,0198	-140,7	0,01
Kazım – Yeşilpınar	1 - 1/C 240	17,9	1,68	-91,76	0,06
Kazımkarabekir Yeşilpınar	1 - 1/C 240	12,1	0,755	-92,85	0,04
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 240	3,3	0,0577	-110	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 240	3,2	0,0607	-123,4	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 240	2,3	0,0004	-1,22	0
Mahmutbey - Göztepe	1 - 1/C 240	12,3	1,09	-128,2	0,06
Mahmutbey - Göztepe2	1 - 1/C 240	14,8	1,75	-142	0,07
Mecidiyeköy - Darphane	1 - 1/C 240	33	8,17	-122,6	0,15

Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 240	34,5	7,96	-108,3	0,14
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 240	41,4	5,51	-49,74	0,08
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 240	42,9	5,93	-49,18	0,08
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 240	3,2	0,0466	-88,91	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 240	3,2	0,0446	-88,91	0,01
Orucreis – Depo	1 - 1/C 240	29,2	5,8	-113,8	0,12
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 240	39,2	9,26	-94,72	0,15
TekstilKent – Depo	1 - 1/C 240	8,6	0,337	-82,22	0,02
TekstilKent – depo	1 - 1/C 240	8,7	0,341	-81,4	0,02
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 240	3,2	0,055	-109,2	0,01
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 240	2	0,0188	-109,7	0
Veysel karan Circir	1 - 1/C 240	16,7	1,17	-73,17	0,04
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 240	16,7	1,16	-73,17	0,04
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 240	11,6	0,911	-122,6	0,05
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 240	9,6	0,698	-139,2	0,05
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 240	25,1	2,77	-74,62	0,06
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 240	25,1	2,77	-74,63	0,06
Yıldız – Besiktas	1 - 1/C 240	17,7	1,56	-85,93	0,05
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 240	16,3	1,31	-86,26	0,05
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	42	4,88	-42,51	0,07
Çağlayan – Çağlayan	1 - 1/C 240	42,7	4,19	-35,3	0,06
			100,6915	-4077,11	

Senaryo 2 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 185	11,2	0,718	-90,85	0,04
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 185	11,2	0,715	-90,86	0,04
Besiktas – kabatas	1 - 1/C 185	8,8	0,552	-112,2	0,04
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 185	10,5	0,689	-98,75	0,04
Cağlayan – MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 185	49	6,84	-37,6	0,09
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 185	49,7	5,88	-31,21	0,07
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 185	11,8	0,668	-75,28	0,04
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 185	11,9	0,671	-75,28	0,04
Darphane – Yıldız	1 - 1/C 185	27,8	8,35	-162,3	0,19
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 185	29,4	8,67	-148,6	0,19
Depo – Jeneratör	1 - 1/C 185	0,1	0	-26,69	0
Goztepe – Orucreis	1 - 1/C 185	17,2	1,51	-79,91	0,06
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 185	32,2	5,35	-75,83	0,11
Kabatas – Kabatas	1 - 1/C 185	0,8	0	-1,11	0
Karadeniz – Yenimahalle	1 - 1/C 185	1,9	0,0197	-115,7	0
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 185	2,7	0,0483	-129,2	0,01
Kazm – Yesilpinar	1 - 1/C 185	17,3	1,62	-84,57	0,06
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 185	10,6	0,602	-85,53	0,03
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 185	1	0,0053	-100,8	0
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 185	1,1	0,0058	-113,1	0
Mahmutbey	1 - 1/C 185	2,6	0,0005	0,0005	0
Mahmutbey – Goztepe	1 - 1/C 185	13,9	1,43	-117,5	0,07
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 185	16,6	2,29	-130,1	0,09
Mecidiyekoy – Darphane	1 - 1/C 185	37,1	10,67	-110,8	0,18

Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 185	38,8	10,39	-97,71	0,17
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 185	46,5	7,2	-44,61	0,1
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 185	48,2	7,74	-44,02	0,1
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 185	1,6	0,013	-81,51	0
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 185	1,6	0,0126	-81,51	0
Orucreis - Depo	1 - 1/C 185	32,9	7,6	-103,6	0,15
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 185	44,2	12,13	-85,48	0,18
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 185	9,7	0,442	-74,75	0,03
TekstilKent - depo	1 - 1/C 185	9,7	0,442	-74,75	0,03
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 185	1,6	0,011	-100,4	0
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 185	2,9	0,0469	-100,4	0,01
Veysel karan Circir	1 - 1/C 185	21,4	1,98	-66,44	0,06
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 185	21,4	1,98	-66,44	0,06
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 185	9,9	0,708	-115,5	0,04
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 185	7,9	0,501	-129,2	0,04
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 185	31	4,35	-67,25	0,09
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 185	31	4,36	-67,25	0,09
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 185	19,9	2,04	-78,26	0,07
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 185	18,3	1,71	-78,6	0,06
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 185	47,3	6,37	-38,11	0,09
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 185	48	5,48	-31,63	0,07
			131,3781	-	3539,4795

Senaryo 3 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 120	13	1,05	-78,98	0,05
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 120	13	1,05	-78,92	0,05
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 120	10,5	0,842	-96,98	0,06
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 120	12,4	1,05	-85,32	0,06
Cağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	58,2	10,48	-31,34	0,12
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 120	59,1	9,01	-25,99	0,1
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 120	13,8	0,983	-65,43	0,05
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 120	13,8	0,986	-65,43	0,05
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 120	32,9	12,78	-139	0,26
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 120	34,9	13,26	-127,1	0,26
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 120	0,1	0	-23,24	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 120	20,4	2,32	-69,19	0,08
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 120	38,3	8,19	-64,89	0,15
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 120	1	0,0001	-0,959	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 120	2,2	0,0288	-100,8	0
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 120	3,2	0,0732	-112,5	0,02
Kazm - Yesilpinar	1 - 1/C 120	20,6	2,49	-73,36	0,08
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 120	12,6	0,924	-74,41	0,05
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 120	1	0,0062	-87,7	0
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 120	1	0,0065	-98,4	0
Mahmutbey	1 - 1/C 120	3,1	0,0007	0,0005	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 120	16,5	2,19	-101,8	0,09
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 120	19,7	3,5	-112,6	0,12
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 120	44,1	16,33	-94,07	0,25

Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 120	46,1	15,91	-82,74	0,23
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 120	55,3	11,02	-37,33	0,13
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 120	57,3	11,85	-36,72	0,14
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 120	1,8	0,018	-70,92	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 120	1,8	0,0175	-70,92	0
Orucreis - Depo	1 - 1/C 120	39,1	11,66	-88,69	0,2
Orucreis - Tekstil Kent	1 - 1/C 120	52,6	18,59	-72,01	0,24
Tekstil Kent - Depo	1 - 1/C 120	11,6	0,678	-65	0,04
Tekstil Kent - depo	1 - 1/C 120	11,6	0,678	-65	0,04
Tekstil Kent - Karadeniz	1 - 1/C 120	1,9	0,0178	-87,46	0
Tekstil Kent - Karadeniz2	1 - 1/C 120	3,5	0,0745	-87,41	0,01
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	25,2	2,97	-57,52	0,08
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	25,2	2,97	-57,51	0,08
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 120	11,7	1,08	-100,5	0,06
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 120	9,4	0,767	-112,5	0,05
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 120	36,6	6,57	-57,82	0,12
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 120	36,6	6,58	-57,81	0,12
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 120	23,6	3,11	-67,35	0,09
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 120	21,7	2,61	-67,71	0,08
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	56,2	9,76	-31,87	0,12
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 120	57,1	8,4	-26,44	0,1
			202,8813	-3209,6385	

Senaryo 4 Trafo Parametreleri					
ID	Trafo Gücü	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	1000 kVA	18,3	8,13	0,61	4,23
Alibeyköy Servis 2	1000 kVA	18,3	8,13	0,61	4,23
Besiktas Servis 1	1000 kVA	18,1	8,03	0,602	4,2
Besiktas Servis2	1000 kVA	18,1	8,03	0,602	4,21
Cağlayan Servis1	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Cağlayan Servis 2	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Darphane Servis 1	1000 kVA	18,2	8,06	0,605	4,21
Darphane Servis 2	1000 kVA	18,2	8,06	0,605	4,21
Depo Servis 1	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Depo Servis 2	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Göztepe Servis 1	1000 kVA	18,3	8,13	0,61	4,23
Göztepe Servis 2	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Kabatas Servis1	1000 kVA	18,1	8,02	0,602	4,2
Kabatas Servis2	1000 kVA	18,1	8,02	0,602	4,2
Karadeniz Servis 1	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Karadeniz Servis 2	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Kazım Karabekir Servis1	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Kazım Karabekir Servis2	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Kağıthane Servis1	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Kağıthane Servis2	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Mahmutbey Servis 2	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Mahmutbey Servis 1	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Mecidiyeköy Servis1	1000 kVA	18,2	8,09	0,606	4,22
Mecidiyeköy Servis 2	1000 kVA	18,2	8,09	0,606	4,22
Mecidiyeköy TVF 1	1000 kVA	18,3	8,1	0,607	4,22

Mecidiyeköy TVF 2	1000 kVA	18,3	8,1	0,607	4,22
Nurtepe Servis1	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Nurtepe Servis2	1000 kVA	18,3	8,12	0,609	4,23
Oruçreis Servis 1	1000 kVA	18,3	8,13	0,61	4,23
Oruçreis Servis 2	1000 kVA	18,3	8,14	0,61	4,23
Tekstilkent Servis 1	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Tekstilkent Servis2	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Veyselkarani Servis1	1000 kVA	18,4	8,14	0,611	4,24
Veyselkarani Servis 2	1000 kVA	18,4	8,14	0,611	4,24
YeniMahalle Servis1	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
YeniMahalle Servis2	1000 kVA	18,4	8,15	0,611	4,24
Yesilpınar Servis1	1000 kVA	18,4	8,16	0,612	4,24
Yesilpınar Servis2	1000 kVA	18,4	8,16	0,612	4,24
Yıldız Servis 1	1000 kVA	18,2	8,09	0,607	3,87
Yıldız Servis 2	1000 kVA	18,1	8,04	0,603	4,21
Çağlayan TVF1	1000 kVA	18,3	8,11	0,608	4,23
Çağlayan TVF2	1000 kVA	18,3	8,11	0,608	4,23
Çırçır Servis1	1000 kVA	18,3	8,14	0,61	4,23
Çırçır Servis2	1000 kVA	18,3	8,13	0,61	4,23
			357,06	26,777	

Senaryo 4 Kablo Parametreleri					
ID	Rating 2	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 240	11,3	0,716	-99,07	0,04
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 240	11,3	0,709	-99,08	0,04
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 240	7,9	0,425	-122,9	0,03
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 240	9,3	0,53	-108,2	0,04

Caglayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	43,6	5,26	-41,99	0,07
Caglayan- Çağlayan	1 - 1/C 240	44,3	4,52	-34,86	0,06
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 240	11,9	0,657	-82,09	0,03
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 240	12	0,663	-82,08	0,03
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 240	24,7	6,42	-178,7	0,16
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 240	26,2	6,66	-163,8	0,15
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 240	0,1	0	-29,16	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 240	12	0,713	-88,24	0,04
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 240	23	2,63	-85,65	0,07
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 240	0,7	0	-1,21	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 240	2,9	0,0563	-126,3	0,01
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 240	4,5	0,154	-140,9	0,02
Kazm - Yesilpinar	1 - 1/C 240	12,6	0,826	-93,08	0,04
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 240	6,3	0,206	-93,76	0,02
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 240	2,3	0,0299	-110	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 240	2,2	0,0321	-123,4	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 240	2,8	0,0006	-1,23	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 240	6,6	0,312	-129,8	0,03
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 240	11,5	1,05	-143,6	0,06
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 240	33	8,2	-122,6	0,15
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 240	34,5	7,99	-108,2	0,14
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 240	41,4	5,53	-49,72	0,08
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 240	43	5,95	-49,15	0,08
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 240	2,9	0,0421	-88,96	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 240	2,9	0,0405	-88,96	0,01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 240	23,6	3,78	-117	0,1

Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 240	28,4	4,84	-101,1	0,1
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 240	8,7	0,339	-81,7	0,02
TekstilKent - depo	1 - 1/C 240	8,7	0,339	-81,7	0,02
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 240	3,5	0,0748	-109,6	0,01
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 240	5,1	0,155	-109,5	0,02
Veysel karan Circir	1 - 1/C 240	20,4	1,74	-72,5	0,05
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 240	20,5	1,75	-72,49	0,05
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 240	5,8	0,23	-126,6	0,03
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 240	4,2	0,13	-141,5	0,02
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 240	28,9	3,67	-73,54	0,08
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 240	29	3,69	-73,53	0,08
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 240	17,8	1,57	-85,92	0,05
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 240	16,3	1,31	-86,25	0,05
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	42,1	4,9	-42,48	0,07
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 240	42,8	4,21	-35,27	0,06
			93,0503	-4097,37	

Senaryo 5 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 185	12,6	0,909	-90,8	0,04
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 185	12,5	0,901	-90,81	0,04
Besiktas - kاباتas	1 - 1/C 185	8,9	0,554	-112,4	0,04
Besiktas - kاباتas2	1 - 1/C 185	10,5	0,691	-98,9	0,04
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 185	49,1	6,88	-37,63	0,09

Caglayan- Cağlayan	1 - 1/C 185	49,9	5,91	-31,22	0,07
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 185	13,2	0,839	-75,23	0,04
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 185	13,3	0,846	-75,22	0,04
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 185	27,8	8,39	-162,5	0,19
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 185	29,5	8,71	-148,8	0,19
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 185	0,1	0	-26,76	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 185	13,5	0,933	-80,84	0,04
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 185	25,9	3,44	-78,14	0,08
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 185	0,8	0	-1,11	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 185	3,2	0,0691	-115,9	0,01
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 185	5	0,194	-129,3	0,02
Kazm - Yesilpınar	1 - 1/C 185	14,3	1,1	-85,29	0,05
Kazımkarabekir Yesilpınar	1 - 1/C 185	7,2	0,279	-86,03	0,02
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 185	2,4	0,0351	-100,9	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 185	2,3	0,0375	-113,2	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 185	3,2	0,0007	-1,13	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 185	7,5	0,409	-119	0,03
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 185	12,9	1,38	-131,6	0,07
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 185	37,2	10,72	-111	0,18
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 185	38,9	10,44	-97,82	0,17
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 185	46,6	7,23	-44,65	0,1
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 185	48,3	7,77	-44,06	0,1
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 185	3,2	0,0518	-81,6	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 185	3,1	0,0499	-81,6	0,01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 185	26,5	4,95	-106,8	0,12
Orucreis - Tekstilkent	1 - 1/C 185	32	6,34	-91,94	0,12

Tekstilkent - Depo	1 - 1/C 185	9,7	0,444	-74,94	0,03
Tekstilkent - depo	1 - 1/C 185	9,7	0,444	-74,94	0,03
Tekstilkent - Karadeniz	1 - 1/C 185	3,9	0,093	-100,6	0,01
Tekstilkent - Karadeniz2	1 - 1/C 185	5,6	0,197	-100,5	0,02
Veysel karan Circir	1 - 1/C 185	22,8	2,25	-66,28	0,06
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 185	22,9	2,26	-66,26	0,06
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 185	6,6	0,31	-116,2	0,03
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 185	4,8	0,177	-129,9	0,02
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 185	32,4	4,75	-66,95	0,09
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 185	32,5	4,77	-66,94	0,09
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 185	20	2,04	-78,37	0,06
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 185	18,3	1,72	-78,72	0,06
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 185	47,4	6,4	-38,14	0,08
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 185	48,2	5,51	-31,65	0,07
			121,4241	-3742,57	

Senaryo 6 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 120	14,5	1,31	-78,88	0,06
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 120	14,4	1,3	-78,89	0,06
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 120	10,5	0,845	-97,1	0,05
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 120	12,4	1,05	-85,43	0,06
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	58,4	10,53	-31,35	0,12
Çağlayan-Çağlayan	1 - 1/C 120	59,3	9,06	-25,99	0,1

Circir Alibeykoy	1 - 1/C 120	15,3	1,22	-65,36	0,05
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 120	15,4	1,23	-65,35	0,05
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 120	33	12,82	-139,1	0,26
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 120	35	13,31	-127,2	0,26
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 120	0,1	0	-23,31	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 120	16,1	1,44	-70,15	0,06
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 120	30,7	5,28	-67,31	0,12
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 120	1	0,0001	-0,96	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 120	3,5	0,0932	-100,9	0,02
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 120	5,7	0,274	-112,6	0,03
Kazm - Yesilpinar	1 - 1/C 120	17,3	1,75	-74,04	0,07
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 120	8,9	0,46	-74,88	0,03
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 120	2,8	0,0503	-87,77	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 120	2,7	0,0534	-98,49	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 120	3,8	0,0011	-0,978	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 120	8,9	0,628	-103,4	0,05
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 120	15,3	2,11	-114,2	0,09
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 120	44,1	16,4	-94,15	0,25
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 120	46,2	15,98	-82,81	0,23
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 120	55,4	11,07	-37,36	0,13
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 120	57,5	11,9	-36,74	0,14
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 120	3,7	0,0758	-70,98	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 120	3,7	0,0732	-70,98	0,01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 120	31,6	7,6	-91,98	0,16
Orucreis - Tekstilkent	1 - 1/C 120	38,1	9,74	-78,8	0,17
Tekstilkent - Depo	1 - 1/C 120	11,6	0,682	-65,19	0,04

Tekstilkent - depo	1 - 1/C 120	11,6	0,682	-65,19	0,04
Tekstilkent - Karadeniz	1 - 1/C 120	4,4	0,131	-87,62	0,02
Tekstilkent - Karadeniz2	1 - 1/C 120	6,5	0,285	-87,5	0,03
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	26,6	3,33	-57,35	0,08
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 120	26,7	3,34	-57,34	0,08
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 120	8,2	0,514	-101,1	0,04
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 120	6	0,301	-113	0,04
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 120	38,1	7,11	-57,52	0,12
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 120	38,1	7,13	-57,51	0,12
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 120	23,7	3,12	-67,43	0,09
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 120	21,7	2,62	-67,79	0,08
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	56,3	9,8	-31,89	0,12
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 120	57,3	8,45	-26,44	0,1
			185,1491	-	3230,308

Senaryo 7 Trafo Parametreleri					
ID	Trafo Gücü	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	630 kVA	29,4	5,77	0,934	3,08
Alibeyköy Servis 2	630 kVA	29,4	5,77	0,934	3,08
Besiktas Servis 1	630 kVA	28,8	5,65	0,915	3,06
Besiktas Servis2	630 kVA	28,8	5,65	0,915	3,06
Çağlayan Servis1	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Çağlayan Servis 2	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Darphane Servis 1	630 kVA	29	5,69	0,921	3,07
Darphane Servis 2	630 kVA	29	5,69	0,921	3,07

Depo Servis 1	630 kVA	29,5	5,79	0,937	3,09
Depo Servis 2	630 kVA	29,5	5,79	0,937	3,09
Göztepe Servis 1	630 kVA	29,4	5,76	0,934	3,08
Göztepe Servis 2	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Kabatas Servis1	630 kVA	28,8	5,64	0,914	3,06
Kabatas Servis2	630 kVA	28,8	5,64	0,914	3,06
Karadeniz Servis 1	630 kVA	29,5	5,79	0,938	3,09
Karadeniz Servis 2	630 kVA	29,5	5,79	0,937	3,09
Kazım Karabekir Servis1	630 kVA	29,5	5,79	0,937	3,09
Kazım Karabekir Servis2	630 kVA	29,5	5,79	0,938	3,09
Kağıthane Servis1	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Kağıthane Servis2	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Mahmutbey Servis 2	630 kVA	29,3	5,75	0,932	3,08
Mahmutbey Servis 1	630 kVA	29,3	5,75	0,932	3,08
Mecidiyeköy Servis1	630 kVA	29,2	5,71	0,926	3,07
Mecidiyeköy Servis 2	630 kVA	29,2	5,72	0,926	3,07
Mecidiyeköy TVF 1	630 kVA	29,2	5,73	0,928	3,08
Mecidiyeköy TVF 2	630 kVA	29,2	5,73	0,928	3,08
Nurtepe Servis1	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Nurtepe Servis2	630 kVA	29,4	5,76	0,933	3,08
Oruçreis Servis 1	630 kVA	29,4	5,77	0,935	3,08
Oruçreis Servis 2	630 kVA	29,4	5,77	0,935	3,08
Tekstil Kent Servis 1	630 kVA	29,5	5,79	0,938	3,09
Tekstil Kent Servis2	630 kVA	29,5	5,79	0,938	3,09
Veyselkarani Servis1	630 kVA	29,5	5,78	0,936	3,09
Veyselkarani Servis 2	630 kVA	29,5	5,78	0,936	3,09

YeniMahalle Servis1	630 kVA	29,5	5,79	0,937	3,09
YeniMahalle Servis2	630 kVA	29,5	5,78	0,937	3,09
Yesilpınar Servis1	630 kVA	29,6	5,8	0,939	3,09
Yesilpınar Servis2	630 kVA	29,6	5,8	0,939	3,09
Yıldız Servis 1	630 kVA	28,9	5,66	0,916	3,07
Yıldız Servis 2	630 kVA	28,9	5,66	0,916	3,07
Çağlayan TVF1	630 kVA	29,3	5,74	0,931	3,08
Çağlayan TVF2	630 kVA	29,3	5,74	0,931	3,08
Çırçır Servis1	630 kVA	29,4	5,77	0,935	3,08
Çırçır Servis2	630 kVA	29,4	5,77	0,935	3,08
			252,9	40,963	

Senaryo 7 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 240	11,3	0,716	-99,16	0,04
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 240	11,3	0,709	-99,17	0,04
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 240	7,9	0,425	-123	0,03
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 240	9,3	0,529	-108,3	0,03
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	43,6	5,26	-42,04	0,07
Çağlayan- Çağlayan	1 - 1/C 240	44,3	4,52	-34,9	0,06
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 240	11,9	0,659	-82,15	0,03
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 240	12	0,665	-82,15	0,03
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 240	24,7	6,42	-178,9	0,16
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 240	26,2	6,66	-163,9	0,15
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 240	0,1	0	-29,18	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 240	12	0,712	-88,31	0,04
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 240	23	2,63	-85,73	0,07
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 240	0,7	0	-1,21	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 240	2,9	0,0565	-126,4	0,01
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 240	4,5	0,154	-141	0,02
Kazm - Yesilpınar	1 - 1/C 240	12,6	0,827	-93,15	0,04

Kazımkarabekir Yesilpınar	1 - 1/C 240	6,3	0,206	-93,84	0,02
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 240	2,3	0,0299	-110,1	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 240	2,2	0,032	-123,5	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 240	2,8	0,0005	-1,23	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 240	6,6	0,312	-130	0,03
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 240	11,5	1,05	-143,8	0,06
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 240	33	8,2	-122,7	0,15
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 240	34,5	7,99	-108,3	0,14
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 240	41,4	5,53	-49,77	0,08
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 240	43	5,95	-49,2	0,08
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 240	2,9	0,0429	-89,03	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 240	2,9	0,0413	-89,03	0,01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 240	23,6	3,77	-117,1	0,1
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 240	28,4	4,84	-101,2	0,1
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 240	8,6	0,339	-81,77	0,02
TekstilKent - depo	1 - 1/C 240	8,6	0,339	-81,77	0,02
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 240	3,6	0,0763	-109,7	0,01
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 240	5,1	0,157	-109,6	0,02
Veysel karan Circir	1 - 1/C 240	20,4	1,74	-72,56	0,05
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 240	20,5	1,75	-72,55	0,05
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 240	5,8	0,23	-126,7	0,03
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 240	4,2	0,13	-141,6	0,02
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 240	28,9	3,67	-73,61	0,07
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 240	29	3,69	-73,59	0,07
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 240	17,7	1,57	-86	0,05
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 240	16,3	1,31	-86,33	0,05
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	42,1	4,89	-42,53	0,07
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 240	42,8	4,21	-35,31	0,06
			93,0384	-4101,07	

Senaryo 8 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 185	12,6	0,908	-90,86	0,04
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 185	12,5	0,9	-90,87	0,04
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 185	8,8	0,554	-112,5	0,04
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 185	10,5	0,691	-98,98	0,04
Cağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 185	49,1	6,87	-37,67	0,09
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 185	49,9	5,91	-31,25	0,07
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 185	13,3	0,84	-75,28	0,04
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 185	13,3	0,848	-75,27	0,04
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 185	27,8	8,39	-162,7	0,19
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 185	29,5	8,7	-149	0,19
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 185	0,1	0	-26,78	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 185	13,5	0,933	-80,89	0,04
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 185	25,8	3,44	-78,2	0,08
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 185	0,8	0	-1,11	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 185	3,2	0,07	-116	0,01
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 185	5	0,194	-129,4	0,02
Kazm - Yesilpinar	1 - 1/C 185	14,3	1,1	-85,34	0,05
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 185	7,2	0,279	-86,09	0,02
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 185	2,4	0,0351	-101	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 185	2,3	0,0375	-113,3	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 185	3,2	0,0007	-1,13	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 185	7,5	0,408	-119,1	0,03
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 185	12,9	1,37	-131,7	0,07
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 185	37,1	10,71	-111,1	0,18

Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 185	38,8	10,44	-97,91	0,17
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 185	46,6	7,23	-44,69	0,1
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 185	48,3	7,77	-44,11	0,1
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 185	3,2	0,0532	-81,65	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 185	3,2	0,0513	-81,66	0,01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 185	26,5	4,94	-106,8	0,12
Orucreis - Tekstil Kent	1 - 1/C 185	32	6,33	-92,02	0,12
Tekstil Kent - Depo	1 - 1/C 185	9,7	0,444	-74,99	0,03
Tekstil Kent - depo	1 - 1/C 185	9,7	0,444	-74,99	0,03
Tekstil Kent - Karadeniz	1 - 1/C 185	3,9	0,0965	-100,7	0,01
Tekstil Kent - Karadeniz2	1 - 1/C 185	5,7	0,2	-100,5	0,02
Veysel karan Circir	1 - 1/C 185	22,8	2,24	-66,33	0,06
Veysel karan Circir	1 - 1/C 185	22,8	2,26	-66,31	0,06
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 185	6,7	0,313	-116,3	0,03
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 185	4,8	0,179	-129,9	0,02
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 185	32,4	4,75	-67,01	0,09
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 185	32,4	4,77	-66,99	0,09
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 185	20	2,04	-78,44	0,06
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 185	18,3	1,72	-78,78	0,06
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 185	47,4	6,4	-38,17	0,08
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 185	48,1	5,51	-31,68	0,07
			121,3693	-3654,59	

Senaryo 9 Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 120	14,5	1,31	-78,94	0,06
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 120	14,4	1,3	-78,95	0,06
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 120	10,5	0,844	-97,18	0,05
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 120	12,4	1,05	-85,49	0,06
Cağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	58,3	10,52	-31,39	0,12
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 120	59,3	9,05	-26,02	0,1
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 120	15,3	1,22	-65,4	0,05
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 120	15,4	1,23	-65,39	0,05
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 120	33	12,82	-139,3	0,26
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 120	35	13,3	-127,3	0,26
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 120	0,1	0	-23,32	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 120	16,1	1,43	-70,2	0,06
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 120	30,7	5,27	-67,36	0,12
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 120	1	0,0001	-0,961	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 120	3,5	0,0944	-101	0,02
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 120	5,6	0,273	-112,7	0,03
Kazm - Yesilpinar	1 - 1/C 120	17,3	1,75	-74,09	0,07
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 120	8,9	0,463	-74,93	0,04
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 120	2,8	0,0504	-87,84	0,01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 120	2,7	0,0535	-98,56	0,01
Mahmutbey	1 - 1/C 120	3,8	0,0011	-0,979	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 120	8,9	0,626	-103,5	0,05
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 120	15,3	2,1	-114,3	0,09
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 120	44,1	16,39	-94,23	0,25

Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 120	46,1	15,97	-82,88	0,23
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 120	55,4	11,06	-37,39	0,13
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 120	57,4	11,89	-36,78	0,14
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 120	3,8	0,0787	-71,02	0,01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 120	3,7	0,076	-71,03	0,01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 120	31,6	7,59	-92,06	0,16
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 120	38	9,72	-78,87	0,17
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 120	11,6	0,681	-65,23	0,04
TekstilKent - depo	1 - 1/C 120	11,6	0,681	-65,23	0,04
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 120	4,5	0,136	-87,67	0,02
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 120	6,5	0,288	-87,55	0,03
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	26,6	3,32	-57,39	0,08
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	26,7	3,34	-57,38	0,08
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 120	8,2	0,521	-101,2	0,04
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 120	6	0,306	-113,1	0,04
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 120	38	7,1	-57,57	0,12
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 120	38,1	7,12	-57,56	0,12
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 120	23,7	3,12	-67,49	0,09
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 120	21,7	2,62	-67,84	0,08
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	56,3	9,8	-31,92	0,12
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 120	57,2	8,44	-26,47	0,1
			185,0032	-3232,96	

Senaryo 10 Kablo Parametreleri					
ID		Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 240	7.9	0.353	-99.51	0.04
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 240	8	0.355	-99.51	0.04
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 240	7.9	0.431	-122.8	0.03
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 240	9.4	0.537	-108.1	0.04
Cağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	44	5.34	-41.86	0.07
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 240	44.7	4.6	-34.74	0.06
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 240	8.7	0.349	-82.2	0.03
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 240	8.6	0.347	-82.21	0.03
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 240	24.9	6.51	-178.5	0.16
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 240	26.4	6.75	-163.5	0.15
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 240	0.1	0	-29.04	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 240	15.4	1.17	-87.16	0.04
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 240	28.7	4.12	-83.22	0.07
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 240	0.7	0	-1.21	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 240	3.4	0.0725	-125.8	0.01
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 240	1.8	0.0191	-140.6	0.02
Kazm - Yesilpınar	1 - 1/C 240	18	1.69	-91.7	0.04
Kazımkarabekir Yesilpınar	1 - 1/C 240	12.1	0.764	-92.79	0.02
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 240	3.3	0.0587	-109.9	0.01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 240	3.2	0.0618	-123.3	0.01
Mahmutbey	1 - 1/C 240	2.3	0.0004	-1.22	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 240	12.4	1.11	-128.1	0.03
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 240	14.8	1.76	-141.9	0.06
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 240	33.2	8.3	-122.4	0.15
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 240	34.8	8.09	-108	0.14
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 240	41.7	5.6	-49.59	0.08
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 240	43.2	6.02	-49.02	0.08
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 240	3.2	0.0466	-88.87	0.01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 240	3.2	0.0446	-88.87	0.01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 240	29.4	5.88	-113.7	0.1
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 240	39.4	9.36	-94.54	0.1
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 240	8.7	0.343	-82.18	0.02
TekstilKent - depo	1 - 1/C 240	8.7	0.346	-81.36	0.02

Tekstilkent - Karadeniz	1 - 1/C 240	3.1	0.0514	-109.2	0.01
Tekstilkent - Karadeniz2	1 - 1/C 240	1.9	0.0184	-109.6	0.02
Veysel karan Circir	1 - 1/C 240	17	1.21	-73.08	0.05
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 240	17	1.2	-73.08	0.05
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 240	11.6	0.912	-122.5	0.03
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 240	9.6	0.699	-139.1	0.02
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 240	25.5	2.85	-74.49	0.08
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 240	25.4	2.84	-74.5	0.08
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 240	17.9	1.59	-85.84	0.05
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 240	16.4	1.33	-86.17	0.05
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	42.4	4.97	-42.36	0.07
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 240	43.1	4.29	-35.16	0.06
		17.40222222	102.3895	-4072.48	2.24

Senaryo 10 (Çift Trafo Aktif) Parametreleri				
2000 kVA	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kvar Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	9.8	15.66	0.36	0.02
Alibeyköy Servis 2	9.8	15.66	0.36	0.02
Besiktas Servis 1	9.7	15.48	0.356	0.03
Besiktas Servis2	9.7	15.48	0.356	0.04
Çağlayan Servis1	9.8	15.66	0.36	0.07
Çağlayan Servis 2	9.8	15.66	0.36	0.06
Darphane Servis 1	9.7	15.55	0.358	0.02
Darphane Servis 2	9.7	15.55	0.358	0.02
Depo Servis 1	9.8	15.66	0.36	0.16
Depo Servis 2	9.8	15.66	0.36	0.16
Göztepe Servis 1	9.7	15.6	0.359	0
Göztepe Servis 2	9.7	15.6	0.359	0.05
Kabatas Servis1	9.7	15.47	0.356	0.09
Kabatas Servis2	9.7	15.47	0.356	0
Karadeniz Servis 1	9.8	15.67	0.36	0.02
Karadeniz Servis 2	9.8	15.67	0.36	0.01
Kazım Karabekir Servis1	9.8	15.68	0.361	0.06
Kazım Karabekir Servis2	9.8	15.69	0.361	0.04
Kağıthane Servis1	9.8	15.66	0.36	0.01
Kağıthane Servis2	9.8	15.66	0.36	0.01
Mahmutbey Servis 2	9.7	15.58	0.358	0
Mahmutbey Servis 1	9.7	15.58	0.358	0.06

Mecidiyeköy Servis1	9.7	15.59	0.359	0.07
Mecidiyeköy Servis 2	9.7	15.6	0.359	0.15
Mecidiyeköy TVF 1	9.8	15.62	0.359	0.14
Mecidiyeköy TVF 2	9.8	15.62	0.359	0.08
Nurtepe Servis1	9.8	15.66	0.36	0.08
Nurtepe Servis2	9.8	15.66	0.36	0.01
Oruçreis Servis 1	9.8	15.62	0.359	0.01
Oruçreis Servis 2	9.8	15.62	0.359	0.12
Tekstilkent Servis 1	9.8	15.66	0.36	0.15
Tekstilkent servis 2	9.8	15.66	0.36	0.02
Veyselkarani Servis1	9.8	15.68	0.361	0.02
Veyselkarani Servis 2	9.8	15.68	0.361	0.01
YeniMahalle Servis1	9.8	15.67	0.36	0
YeniMahalle Servis2	9.8	15.67	0.36	0.04
Yesilpınar Servis1	9.8	15.7	0.361	0.04
Yesilpınar Servis2	9.8	15.7	0.361	0.05
Yıldız Servis 1	9.7	15.5	0.356	0.05
Yıldız Servis 2	9.7	15.5	0.356	0.06
Çağlayan TVF1	9.8	15.64	0.36	0.06
Çağlayan TVF2	9.8	15.64	0.36	0.05
Çırçır Servis1	9.8	15.67	0.36	0.05
Çırçır Servis2	9.8	15.67	0.36	0.07
	9.77	687.38	15.81	2.28

Senaryo 10 (Çift Trafo Aktif) Kablo Parametreleri					
ID		Yüklenme %	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	% Gerilim Düşümü
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 120	14.5	1.31	-78.94	0.06
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 120	14.4	1.3	-78.95	0.06
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 120	10.5	0.844	-97.18	0.05
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 120	12.4	1.05	-85.49	0.06
Çağlayan - MecidiyeköyTVF	1 - 1/C 120	58.3	10.52	-31.39	0.12
Çağlayan-Çağlayan	1 - 1/C 120	59.3	9.05	-26.02	0.1
Cırcır Alibeyköy	1 - 1/C 120	15.3	1.22	-65.4	0.05
Cırcır Alibeyköy2	1 - 1/C 120	15.4	1.23	-65.39	0.05
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 120	33	12.82	-139.3	0.26
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 120	35	13.3	-127.3	0.26
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 120	0.1	0	-23.32	0
Göztepe - Oruçreis	1 - 1/C 120	16.1	1.43	-70.2	0.06
Göztepe - Oruçreis-2	1 - 1/C 120	30.7	5.27	-67.36	0.12
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 120	1	0.0001	-0.961	0

Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 120	3.5	0.0944	-101	0.02
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 120	5.6	0.273	-112.7	0.03
Kazım - Yesilpınar	1 - 1/C 120	17.3	1.75	-74.09	0.07
Kazımkarabekir Yesilpınar	1 - 1/C 120	8.9	0.463	-74.93	0.04
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 120	2.8	0.0504	-87.84	0.01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 120	2.7	0.0535	-98.56	0.01
Mahmutbey	1 - 1/C 120	3.8	0.0011	-0.979	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 120	8.9	0.626	-103.5	0.05
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 120	15.3	2.1	-114.3	0.09
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 120	44.1	16.39	-94.23	0.25
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 120	46.1	15.97	-82.88	0.23
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 120	55.4	11.06	-37.39	0.13
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 120	57.4	11.89	-36.78	0.14
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 120	3.8	0.0787	-71.02	0.01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 120	3.7	0.076	-71.03	0.01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 120	31.6	7.59	-92.06	0.16
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 120	38	9.72	-78.87	0.17
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 120	11.6	0.681	-65.23	0.04
TekstilKent - depo	1 - 1/C 120	11.6	0.681	-65.23	0.04
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 120	4.5	0.136	-87.67	0.02
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 120	6.5	0.288	-87.55	0.03
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	26.6	3.32	-57.39	0.08
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 120	26.7	3.34	-57.38	0.08
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 120	8.2	0.521	-101.2	0.04
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 120	6	0.306	-113.1	0.04
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 120	38	7.1	-57.57	0.12
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 120	38.1	7.12	-57.56	0.12
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 120	23.7	3.12	-67.49	0.09
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 120	21.7	2.62	-67.84	0.08
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	56.3	9.8	-31.92	0.12
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 120	57.2	8.44	-26.47	0.1
		29.01034483	185.0032	-3232.96	3.67

Senaryo 10 (Çift Trafo Aktif) Parametreleri				
630 kVA	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kvar Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	31.11	6.96	0.16	3,08
Alibeyköy Servis 2	31.11	6.96	0.16	3,08
Besiktas Servis 1	30.79	6.88	0.158222222	3,06
Besiktas Servis2	30.79	6.88	0.158222222	3,06
Cağlayan Servis1	31.11	6.96	0.16	3,08
Cağlayan Servis 2	31.11	6.96	0.16	3,08
Darphane Servis 1	30.79	6.91111111	0.159111111	3,07
Darphane Servis 2	30.79	6.91111111	0.159111111	3,07
Depo Servis 1	31.11	6.96	0.16	3,09
Depo Servis 2	31.11	6.96	0.16	3,09
Göztepe Servis 1	30.79	6.93333333	0.159555556	3,08
Göztepe Servis 2	30.79	6.93333333	0.159555556	3,08
Kabatas Servis1	30.79	6.87555556	0.158222222	3,06
Kabatas Servis2	30.79	6.87555556	0.158222222	3,06
Karadeniz Servis 1	31.11	6.96444444	0.16	3,09
Karadeniz Servis 2	31.11	6.96444444	0.16	3,09
Kazım Karabekir Servis1	31.11	6.96888889	0.160444444	3,09
Kazım Karabekir Servis2	31.11	6.97333333	0.160444444	3,09
Kağıthane Servis1	31.11	6.96	0.16	3,08
Kağıthane Servis2	31.11	6.96	0.16	3,08
Mahmutbey Servis 2	30.79	6.92444444	0.159111111	3,08
Mahmutbey Servis 1	30.79	6.92444444	0.159111111	3,08
Mecidiyeköy Servis1	30.79	6.92888889	0.159555556	3,07
Mecidiyeköy Servis 2	30.79	6.93333333	0.159555556	3,07
Mecidiyeköy TVF 1	31.11	6.94222222	0.159555556	3,08
Mecidiyeköy TVF 2	31.11	6.94222222	0.159555556	3,08
Nurtepe Servis1	31.11	6.96	0.16	3,08
Nurtepe Servis2	31.11	6.96	0.16	3,08
Oruçreis Servis 1	31.11	6.94222222	0.159555556	3,08
Oruçreis Servis 2	31.11	6.94222222	0.159555556	3,08
Tekstilkent Servis 1	31.11	6.96	0.16	3,09
Tekstilkent servis 2	31.11	6.96	0.16	3,09
Veyselkarani Servis1	31.11	6.96888889	0.160444444	3,09
Veyselkarani Servis 2	31.11	6.96888889	0.160444444	3,09
YeniMahalle Servis1	31.11	6.96444444	0.16	3,09
YeniMahalle Servis2	31.11	6.96444444	0.16	3,09
Yesilpınar Servis1	31.11	6.97777778	0.160444444	3,09
Yesilpınar Servis2	31.11	6.97777778	0.160444444	3,09
Yıldız Servis 1	30.79	6.88888889	0.158222222	3,07
Yıldız Servis 2	30.79	6.88888889	0.158222222	3,07
Çağlayan TVF1	31.11	6.95111111	0.16	3,08
Çağlayan TVF2	31.11	6.95111111	0.16	3,08
Çırçır Servis1	31.11	6.96444444	0.16	3,08
Çırçır Servis2	31.11	6.96444444	0.16	3,08
	31.01	305.50	7.02	

Senaryo 10 (Tek Trafo Aktif) Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 240	8.3	0.384	-99.57	0.02
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 240	7.9	0.353	-99.57	0.02
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 240	9.5	0.619	-122.7	0.04
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 240	7.6	0.352	-108.4	0.03
Cağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	45.2	5.63	-41.5	0.08
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 240	46.5	4.98	-34.27	0.07
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 240	9.2	0.393	-82.19	0.02
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 240	8.2	0.315	-82.33	0.02
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 240	24.8	6.47	-178.7	0.16
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 240	25.8	6.45	-164.1	0.15
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 240	0.1	0	-29.06	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 240	15.2	1.15	-87.27	0.05
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 240	28.5	4.05	-83.4	0.09
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 240	1.6	0.0002	-1.21	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 240	3.6	0.0839	-125.9	0.02
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 240	1.7	0.0152	-140.7	0.01
Kazm - Yesilpinar	1 - 1/C 240	18.8	1.85	-91.56	0.06
Kazımkarabekir Yesilpinar	1 - 1/C 240	10.7	0.597	-93.09	0.04
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 240	2.6	0.0364	-110	0
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 240	4.1	0.103	-123.3	0.02
Mahmutbey	1 - 1/C 240	1	0.0001	-1.22	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 240	13	1.21	-128.1	0.06
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 240	14.1	1.58	-142.3	0.07
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 240	32.3	7.86	-123.1	0.15
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 240	34.8	8.1	-108.1	0.14
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 240	40	5.15	-50.25	0.08
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 240	43.8	6.19	-48.83	0.09
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 240	3	0.0392	-88.96	0
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 240	3.5	0.0548	-88.91	0.01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 240	28.3	5.45	-114.4	0.12
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 240	39.9	9.56	-94.35	0.15
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 240	8.5	0.334	-82.26	0.02
TekstilKent - depo	1 - 1/C 240	8.6	0.337	-81.43	0.02
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 240	4	0.0906	-109.2	0.02
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 240	2	0.021	-109.7	0
Veysel karan Circir	1 - 1/C 240	18.1	1.38	-72.9	0.04
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 240	15.7	1.03	-73.38	0.04

Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 240	11	0.824	-122.7	0.05
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 240	9.8	0.732	-139.2	0.05
Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 240	27.2	3.25	-74	0.07
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 240	23.4	2.4	-75.16	0.06
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 240	16.7	1.38	-86.18	0.05
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 240	17.1	1.46	-86.1	0.05
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 240	39.9	4.39	-43.17	0.07
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 240	39.8	3.65	-36.05	0.06
		41.2491	100.3	-4078.77	2.37

Senaryo 10 (Tek Trafo Aktif) Trafo Parametreleri			
ID	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	16.8	46.27	11.84
Besiktas Servis2	16.6	45.73	11.77
Çağlayan Servis1	16.8	46.27	11.84
Çağlayan Servis 2	16.8	46.27	11.84
Darphane Servis 2	16.7	45.93	11.79
Depo Servis 2	16.8	46.26	11.83
Göztepe Servis 1	16.8	46.09	11.81
Kabatas Servis2	16.6	45.71	11.76
Karadeniz Servis 2	16.8	46.28	11.84
Kazım Karabekir Servis1	16.8	46.33	11.84
Kağıthane Servis1	16.8	46.26	11.83
Mahmutbey Servis 1	16.7	46.03	11.81
Mecidiyeköy Servis1	16.7	46.06	11.81
Mecidiyeköy TVF 2	16.8	46.14	11.82
Nurtepe Servis1	16.8	46.25	11.83
Oruçreis Servis 1	16.8	46.14	11.82
Tekstilkent Servis 1	16.8	46.28	11.84
Veyselkarani Servis 2	16.8	46.33	11.84
YeniMahalle Servis2	16.8	46.29	11.84
Yesilpınar Servis2	16.9	46.39	11.85
Yıldız Servis 2	16.6	45.78	11.77
Çağlayan TVF1	16,8	46,21	11,83
Çırçır Servis1	16,8	46,29	11,84
	41.24906	969.09	248.22

Senaryo 10 (Tek Trafo Aktif) Kablo Parametreleri					
ID	Kablo	Yüklenme %	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	% Gerilim Düşümü
Alibeyköy Nurtepe	1 - 1/C 120	14.5	1.31	-78.94	0.06
alibeyköy nurtepe	1 - 1/C 120	14.4	1.3	-78.95	0.06
Besiktas - kabatas	1 - 1/C 120	10.5	0.844	-97.18	0.05
Besiktas - kabatas2	1 - 1/C 120	12.4	1.05	-85.49	0.06
Cağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	58.3	10.52	-31.39	0.12
Cağlayan- Cağlayan	1 - 1/C 120	59.3	9.05	-26.02	0.1
Circir Alibeykoy	1 - 1/C 120	15.3	1.22	-65.4	0.05
Circir Alibeykoy2	1 - 1/C 120	15.4	1.23	-65.39	0.05
Darphane - Yıldız	1 - 1/C 120	33	12.82	-139.3	0.26
Darphane - Yıldız2	1 - 1/C 120	35	13.3	-127.3	0.26
Depo - Jeneratör	1 - 1/C 120	0.1	0	-23.32	0
Goztepe - Orucreis	1 - 1/C 120	16.1	1.43	-70.2	0.06
Goztepe - Orucreis-2	1 - 1/C 120	30.7	5.27	-67.36	0.12
Kabatas - Kabatas	1 - 1/C 120	1	0.0001	-0.961	0
Karadeniz - Yenimahalle	1 - 1/C 120	3.5	0.0944	-101	0.02
Karadeniz - Yenimahalle 2	1 - 1/C 120	5.6	0.273	-112.7	0.03
Kazm - Yesilpınar	1 - 1/C 120	17.3	1.75	-74.09	0.07
Kazımkarabekir Yesilpınar	1 - 1/C 120	8.9	0.463	-74.93	0.04
kağıthane çağlayan	1 - 1/C 120	2.8	0.0504	-87.84	0.01
kağıthaneÇağlayan	1 - 1/C 120	2.7	0.0535	-98.56	0.01
Mahmutbey	1 - 1/C 120	3.8	0.0011	-0.979	0
Mahmutbey - Goztepe	1 - 1/C 120	8.9	0.626	-103.5	0.05
Mahmutbey - Goztepe2	1 - 1/C 120	15.3	2.1	-114.3	0.09
Mecidiyekoy - Darphane	1 - 1/C 120	44.1	16.39	-94.23	0.25
Mecidiyekoy - Darphane2	1 - 1/C 120	46.1	15.97	-82.88	0.23
MecidiyekoyTVF - Mecidiye	1 - 1/C 120	55.4	11.06	-37.39	0.13
MecidiyekoyTVF Mecidiyeko	1 - 1/C 120	57.4	11.89	-36.78	0.14
Nurtepe Kağıthane	1 - 1/C 120	3.8	0.0787	-71.02	0.01
nurtepe kağıthane	1 - 1/C 120	3.7	0.076	-71.03	0.01
Orucreis - Depo	1 - 1/C 120	31.6	7.59	-92.06	0.16
Orucreis - TekstilKent	1 - 1/C 120	38	9.72	-78.87	0.17
TekstilKent - Depo	1 - 1/C 120	11.6	0.681	-65.23	0.04
TekstilKent - depo	1 - 1/C 120	11.6	0.681	-65.23	0.04
TekstilKent - Karadeniz	1 - 1/C 120	4.5	0.136	-87.67	0.02
TekstilKent - Karadeniz2	1 - 1/C 120	6.5	0.288	-87.55	0.03
Veysel karan Circir	1 - 1/C 120	26.6	3.32	-57.39	0.08
Veyselkaran Circir	1 - 1/C 120	26.7	3.34	-57.38	0.08
Yenimahalle - KazımK.	1 - 1/C 120	8.2	0.521	-101.2	0.04
Yenimahalle - KazımK.2	1 - 1/C 120	6	0.306	-113.1	0.04

Yesilpınar - Veysel kara2	1 - 1/C 120	38	7.1	-57.57	0.12
Yesilpınar - Veysel karan	1 - 1/C 120	38.1	7.12	-57.56	0.12
Yıldız - Besiktas	1 - 1/C 120	23.7	3.12	-67.49	0.09
Yıldız - Besiktas2	1 - 1/C 120	21.7	2.62	-67.84	0.08
Çağlayan - MecidiyekoyTVF	1 - 1/C 120	56.3	9.8	-31.92	0.12
Çağlayan - Çağlayan	1 - 1/C 120	57.2	8.44	-26.47	0.1
		29.01034	185.0032	-3232.96	3.67

Senaryo 10 (Tek Trafo Aktif) Trafo Parametreleri				
ID	Yüklenme (%)	kW Kayıpları	kVAr Kayıpları	Gerilim Düşümü (%)
Alibeyköy Servis1	53.3	10.611	3.18	11.84
Besiktas Servis2	53.1	10.611	3.15	11.77
Çağlayan Servis1	53.2	10.39	3.18	11.84
Çağlayan Servis 2	53.2	10.39	3.18	11.84
Darphane Servis 2	53.1	10.6	3.18	11.79
Depo Servis 2	53.2	10.57	3.18	11.83
Göztepe Servis 1	53.2	10.58	3.18	11.81
Kabatas Servis2	53	10.58	3.15	11.76
Karadeniz Servis 2	53	10.65	3.18	11.84
Kazım Karabekir Servis1	53.2	10.65	3.21	11.84
Kağıthane Servis1	53.2	10.62	3.18	11.83
Mahmutbey Servis 1	53.1	10.62	3.18	11.81
Mecidiyeköy Servis1	53.1	10.59	3.18	11.81
Mecidiyeköy TVF 2	53.2	10.49	3.18	11.82
Nurtepe Servis1	53.2	10.65	3.18	11.83
Oruçreis Servis 1	53.2	10.65	3.18	11.82
Tekstilkent Servis 1	53.2	10.65	3.18	11.84
Veyselkarani Servis 2	53.2	10.65	3.21	11.84
YeniMahalle Servis2	53.2	10.58	3.18	11.84
Yesilpınar Servis2	53.3	10.56	3.21	11.85
Yıldız Servis 2	53.1	10.58	3.15	11.77
Çağlayan TVF1	53.2	10.58	3.18	11,83
Çırçır Servis1	53.2	10.39	3.18	11,84
	53.16956522	243.242	73.14	11.82

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. B. Olmez and B. Kekezoglu, "Reliable and efficient design of railway electrification systems: Standards and criteria," in *Proc. 14th Int. Conf. Appl. Sci., Kyrenia, Nisan 4–6, 2025, pp. 146. ISBN: 978-625-5962-58-4.

