



T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK
LİSANS TEZİ

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
HAFİF RAYLI SİSTEM PROJESİNİN YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI

MEHMET ARVAS

İŞLETME YÖNETİMİ
ANABİLİM DALI

EKİM 2025

**T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME YÖNETİMİ ANABİLİM DALI**

**VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
HAFİF RAYLI SİSTEM PROJESİNİN YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ARVAS

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ayhan CESUR**

Van, 2025

KABUL VE ONAY

İşletme Yönetimi Anabilim Dalı yüksek lisans öğrencisi Mehmet ARVAS tarafından hazırlanan “Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Hafif Raylı Sistem Projesinin Yapılabilirlik Çalışması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Yönetimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.	
Jüri Üyeleri	İmza
Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Ayhan CESUR Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İktisat Teorisi Anabilim Dalı Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.	
Başkan : Doç.Dr. Muhammet Sait Talha ARSLAN Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İstatistik Anabilim Dalı Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.	
Üye : Dr.Öğr.Üyesi Ayhan CESUR Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İktisat Teorisi Anabilim Dalı Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.	
Üye : Dr.Öğr.İbrahim Halil POLAT Hakkari Üniversitesi İktisat Anabilim Dalı Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.	
Yedek Üye : Doç.Dr. Abdullah OĞRAK Bursa Teknik Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.	
Yedek Üye : Dr.Öğr.Üyesi Erden KİŞİ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Uluslararası İlişkiler Anabilim Dalı Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.	
	Tez Savunma Tarihi: 24/10/2025
Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini ve imzaların sahiplerine ait olduğunu onaylıyorum. Doç.Dr. Ercan ÇALIŞ Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürü	

ETİK BEYAN

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 10.11.2025

Mehmet ARVAS

Yüksek Lisans Tezi

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
Ekim, 2025

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ HAFİF RAYLI SİSTEM PROJESİNİN YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, toplu taşıma sistemleri ve raylı sistemler kentsel ulaşımın temel bileşenleri olarak ele alınmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle dünya ve Türkiye’de raylı sistemlerin tarihsel gelişim süreci incelenmiş, toplu taşımada kullanılan demiryolu ve karayolu sistemlerinin yapısal ve işlevsel özellikleri değerlendirilmiştir. Ardından, raylı sistem türleri teknik, ekonomik ve çevresel açıdan karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu analizler doğrultusunda, raylı sistem araçları ile tekerlekli sistem araçları performans, kapasite, çevresel etki ve sürdürülebilirlik kriterleri bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi yerleşkesinde elektrikli hafif raylı sistem projesinin yapılabİLİRLİĞİ teknik, güzergâh ve yolcu kapasitesi açısından değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, kampüs içi ulaşımın hafif raylı sistemle sağlanmasının çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve erişilebilirlik açısından önemli katkılar sunacağını göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, üniversite kampüslerinde raylı sistem uygulamalarına yönelik örnek bir model sunmakta ve gelecekteki benzer kentsel ulaşım projelerine rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toplu taşıma, raylı sistemler, hafif raylı sistem, sürdürülebilir ulaşım

Sayfa Sayısı: XIV + 145

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan CESUR

Master of Science Thesis

Mehmet ARVAS

VAN YÜZÜNCÜ YIL UNIVERSITY
INSTITUTE OF SOCIAL SCIENCES
October- 2025

VAN YUZUNCU YIL UNIVERSITY FEASIBILITY STUDY OF THE LIGHT RAIL SYSTEM PROJECT

ABSTRACT

This thesis examines public transportation systems and rail systems as fundamental components of urban transportation. The study first examines the historical development of rail systems globally and in Turkey, and then evaluates the structural and functional characteristics of rail and highway systems used in public transportation. Subsequently, rail system types are comparatively analyzed from technical, economic, and environmental perspectives.

Based on these analyses, rail vehicles and wheeled vehicles are compared in terms of performance, capacity, environmental impact, and sustainability criteria. The final section of the study evaluates the feasibility of an electric light rail system project on the Van Yüzüncü Yıl University campus in terms of technical features, route, and passenger capacity.

The findings demonstrate that providing on-campus transportation with a light rail system will significantly contribute to environmental sustainability, energy efficiency, and accessibility. In this respect, the study provides an exemplary model for rail system implementation on university campuses and aims to guide similar urban transportation projects in the future.

Keywords: Public transport, rail systems, light rail system, sustainable

Quantity of Page: XIV+145

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan CESUR

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GÖRSELLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ.....	xiii
ÖNSÖZ.....	xiv
GİRİŞ.....	1
A. Kuramsal ve Kavramsal Çerçeve	4
1. RAYLI SİSTEM VE TOPLU TAŞIMA.....	8
1.1.Dünyadaki Tarihsel Gelişim	8
1.2. Türkiye’deki Tarihsel Gelişim	9
1.3. Toplu Taşıma Sistemleri	11
1.3.1 Demiryolu Toplu Taşıma Sistemleri.....	12
1.3.1.1 Banliyö Sistemleri	12
1.3.1.2 Metro Sistemleri.....	13
1.3.1.3.Hafif Raylı Sistemler.....	14
1.3.1.4. Monoray Sistemleri	15
1.3.1.5 Füniküler Sistemler	16
1.3.1.6 Tramvay Sistemleri	17
1.3.2.Karayolu Toplu Taşıma Sistemleri	17
1.3.2.1 Şehirler Arası Otobüsler.....	17
1.3.2.2 Dolmuşlar	18
1.3.2.3.Minibüsler	19
1.3.2.4. Günlük Servisler.....	19
2.RAYLI SİSTEMİN TÜRLERİ VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ	20
2.1.Raylı Sistemlerin Altyapı Teknik Özellikleri	20
2.1.1. Demiryolu Altyapısının Sınıflandırılması.....	21
2.1.2.Altyapının Mekanik Karakteristikleri	23
2.2.Raylı Sistemlerin Üstyapı Teknik Özellikleri	23
2.2.1 Ray	25
2.2.2 Ray Profillerinin Özellikleri	26
2.2.2.1. Oluklu Raylar	27
2.2.2.2 .Gömülü Tasarım Rayı	28
2.2.2.3.Vinyol Raylar (Tek Mantar Raylar)	28
2.2.2.4. Çift Mantar Raylar	29
2.2.3.Rayların İşaretlenmesi ve Taşınması	30
2.2.4.Travers (Ray Yatak Elemanları)	31
2.2.4.1. Ahşap Traversler	32
2.2.4.2.Demir Traversler	33
2.2.4.3.Betonarme Traversler	34
2.2.5. Bağlantı Elemanları	35
2.2.5.1.Rijit Bağlantı Elemanları.....	36
2.2.5.2.Elastik Bağlantı Elemanları.....	37
2.2.5.3. Cıvatalı Tip Elastik Bağlantıların Ortak Elemanları	37
2.2.5.4. Yay Tipli Elastik Bağlantı Elemanları	38
2.2.5.5.Cebireler	39

2.2.6. Balast.....	40
2.2.6.1. Balastsız (Betona Tespitli) Üstyapı.....	42
2.2.6.2. Balastsız Üstyapı Sistemleri.....	45
2.2.6.2.1 Mesnetli Döşeme Sistemi.....	45
2.2.6.2.2 Sürekli Döşeme Sistemi	46
2.2.6.2.2 Beton Traversli Balastsız Üstyapı Sistemi	46
2.2.6.2.3 Bloklı Betona Tespit Sistemi.....	46
2.2.6.2.4 İkiz Bloklı Stedef Sistemi.....	47
2.2.6.2.5 Rheda Sistemi, Uygulama Alanları ve Yapısal Özellikleri.....	48
2.2.6.2.6. Züblin Sistemi	50
2.2.6.2.7 Asfalt Traversli Üstyapı Sistemi	51
2.2.6.2.8 Traverssiz Üstyapı Sistemleri.....	52
2.2.6.2.9 Max Bögl ve FF Bögl Prefabrik Döşeme Üstyapı Sistemi	55
2.2.6.2.10. Gömülü Balastsız Üstyapı Sistemi.....	56
2.3 Raylı Sistem Araç Özellikleri.....	59
2.4. Elektrifikasyon ve Enerji Sistemleri.....	61
2.4.1. Trafo Merkezleri	62
2.4.2. İletim Hatları.....	62
2.4.3. Üçüncü Ray Sistemleri	63
2.4.4. Katener Sistemleri.....	64
2.4.4.1 Rijit Katener Sistemleri.....	64
2.4.4.2 Standart Katener Sistemleri.....	65
2.4.5. Katener Direkleri	66
2.4.6. Konsol-Hoban Takımları	66
2.4.7. Katener İletkenleri	67
2.4.8. Seyir Teli Yüksekliği	68
2.4.8.1 Seyir Teli Yükseklik Değişimleri.....	68
2.4.9. Portör Teli	68
2.4.10. Y Halatı.....	69
2.4.11. Pandül	69
2.4.12. Sistem Yüksekliği	70
2.4.13. Dezeksmen	71
2.5. Sinyalizasyon Ve Kontrol Sistemleri	71
2.5.1. Sinyalizasyon Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi.....	71
2.5.2. Sinyalizasyon Sisteminin Temel Bileşenleri	73
2.5.3. Saha Elemanları	73
2.5.4. Ray Devreleri.....	73
2.5.5. Raylı Sistem Makas Türleri	74
2.5.5.1. Basit Makas (Simple Turnout)	74
2.5.5.2. Simetrik / Eşit Kollu Makas (Equilateral Turnout).....	74
2.5.5.3. Üç Yollu Makas (Three-Way Turnout).....	74
2.5.5.4. Çapraz Makas / Kruvazman (Diamond Crossing)	75
2.5.5.5. Kaymalı Makas / Slip Switch (Slip Turnout).....	75
2.5.6. Sinyaller	75
2.5.7. Hemzemin Geçitler	75
2.6. Hafif Raylı Sistemlerin İstasyon Ve Peron Özellikleri	75
2.6.1 Hafif Raylı Sistem İstasyonlarının Özellikleri.....	76
2.6.2 Peron (Platform) Özellikleri	76

2.6.2.1 Peron türleri.....	77
2.6.2.2 Temel teknik özellikler.....	77
2.6.3. Güvenlik, Erişilebilirlik ve Konfor Kriterleri	78
2.7 İşletme Özellikleri	78
2.7.1 Raylı Sistem İşletmeciliği: Yapısı, İşleyişi ve Yönetim İlkeleri.....	79
2.7.2 Raylı Sistem İşletmeciliğinin Temel Unsurları.....	79
2.7.3 Raylı Sistem İşletmeciliği Türleri.....	81
3.RAYLI SİSTEMLER İLE LASTİK TEKERLEKLİ SİSTEMLERİN	
KARŞILAŞTIRILMASI.....	82
3.1 Çevresel Etki Açısından Değerlendirme	82
3.1.1 Enerji Verimliliği	82
3.1.2 Karbon Emisyonu ve Hava Kalitesi Üzerindeki Etkiler	83
3.1.3 Gürültü ve Titreşim Etkileri.....	83
3.1.4 Arazi Kullanımı ve Kentsel Etki.....	84
3.1.5 Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment – LCA).....	84
3.2 Ekonomik Açısından Değerlendirme	85
3.2.1 Raylı Sistemler ile Lastik Tekerlekli Sistemlerin Karşılaştırılması:	
Ekonomik Açısından Değerlendirme	85
3.2.1.1 Yatırım (İlk Kurulum) Maliyetleri	85
3.2.1.2 İşletme ve Bakım Giderleri	86
3.2.1.3 Kapasite ve Ekonomik Verimlilik.....	86
3.2.1.4 Ömür Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost – LCC).....	87
3.2.1.5 Kentsel Ekonomiye Katkı ve Dışsalılıklar	87
3.3 Enerji Tüketimi Açısından Değerlendirme.....	88
3.3.1 Raylı Sistemler ile Lastik Tekerlekli Sistemlerin Karşılaştırılması.....	
Enerji Tüketimi Açısından Değerlendirme	88
3.3.2. Enerji Kaynakları ve Verimlilik Yapısı	89
3.3.3. Enerji Tüketimi Değerleri (kWh/pkm) Karşılaştırması	89
3.3.4. Trafik Koşullarının Etkisi	90
3.3.5. Enerji Yoğunluğu ve Kapasite Kullanımı	90
3.3.6. Yenilenebilir Enerji Kullanımı Potansiyeli.....	91
3.4 Erişim Açısından Değerlendirme	92
3.4.1. Erişim Kavramının Boyutları.....	92
3.4.2. Raylı Sistemlerde Erişim Özellikleri	92
3.4.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerde Erişim Özellikleri	93
3.4.4. Karşılaştırmalı Değerlendirme.....	94
3.4.5. Kentsel Erişim Açısından Entegrasyon Gerekliği	94
3.5. Gürültü Kirliliği Açısından Değerlendirme.....	95
3.5.1. Gürültü Kirliliği Kavramı ve Etkileri	96
3.5.2. Raylı Sistemlerde Gürültü Özellikleri	96
3.5.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerde Gürültü Özellikleri.....	97
3.5.4. Karşılaştırmalı Analiz	98
3.5.5. Kentsel Gürültü Yönetimi ve Entegrasyon	98
3.6 Güvenlik Açısından Değerlendirme	99
3.6.1. Ulaşım Güvenliği Kavramı	100
3.6.2. Raylı Sistemlerin Güvenlik Özellikleri.....	100
3.6.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Güvenlik Özellikleri.....	101
3.6.4. Karşılaştırmalı Güvenlik Analizi	102

3.6.5. Kentsel Ulaşım Güvenliği Politikaları	102
3.7 Konfor Açısından Değerlendirme	103
3.7.1. Ulaşım Sistemlerinde Konfor Kavramı	104
3.7.2. Raylı Sistemlerin Konfor Özellikleri	104
3.7.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Konfor Özellikleri	105
3.7.4. Karşılaştırmalı Konfor Analizi.....	106
3.7.5. Konfor Artırıcı Teknolojiler	107
3.8 Taşıma Kapasitesi Açısından Değerlendirme.....	108
3.8.1 Taşıma Kapasitesi Kavramı	108
3.8.2. Raylı Sistemlerin Taşıma Kapasitesi	109
3.8.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Taşıma Kapasitesi	110
3.8.4. Karşılaştırmalı Analiz	111
3.8.5. Kentsel Planlama Açısından Değerlendirme	111
3.9 Teknolojik Özellik Açısından Değerlendirme.....	112
3.9.1 Teknolojik Özellikler Açısından Karşılaştırma	112
3.9.2 Kritik Değerlendirmeler ve Seçim Ölçütleri.....	113
4. VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ YERLESKESİNDE HAFİF	
RAYLI SİSTEM PROJESİNİN YAPILABİLİRLİK ANALİZİ.....	115
4.1 Van YYÜ Hakkında Genel Bilgi.....	115
4.2. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Yerleşkesinin Ulaşımı Hakkında Genel Bilgi	117
4.2.1 Şehir İçi Ulaşım	117
4.2.2. Kara ve Bölgesel Ulaşım Bağlantıları.....	118
4.2.3 Kampüs İçi Ulaşım	118
4.2.4. Ulaşım Altyapısının Geliştirilmesine Yönelik Çalışmalar	119
4.2.5. Değerlendirme ve Sonuç	119
4.3.Üniversite Yerleşkesindeki Akademik ve İdari Birimler Arasındaki Güzergâh Analizi	119
4.3.1.Güzergâhın Genel Durumu	119
4.3.2.Güzergâhta Durak Noktası.....	121
4.3.3. Güzergâhın Arazi Eğim Analizi.....	121
4.3.4. Güzergâhtaki Mevcut Yolcuların Karakteristik Özellikleri.....	122
4.3.5. Güzergâhta Yolcu Taşıma Kapasitesi	124
4.3.6. Van Beşyol–YYÜ Arası Günlük, Aylık ve Yıllık Yolcu Dağılımı ..	124
4.3.7 Kampüs İçi Ulaşım Analizi (YYÜ Ring Hatları)	125
4.3.8. Doruk Saat Analizi ve Ulaşım Planlaması Önerileri	125
BULGULAR	130
SONUÇ	128
ÖNERİLER.....	133
KAYNAKÇA.....	136
ÖZGEÇMİŞ	
TEZ ORJİNALLİK RAPORU	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar

YHT

UKR

YYÜ

GES

CBR

v (km/h)

mm

m², m³

kg/m³

kV, V

Açıklamalar

Yüksek Hızlı Tren

Uzun Kaynaklı Ray

Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Güneş Enerji Sistemi

California Bearing Ratio

Hız birimi (kilometre/saat)

Milimetre

Metrekare, metreküp

Yoğunluk Birimi

Elektrik Gerilim Birimleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı zemin sınıflarına karşılık gelen CBR indeksleri.....	24
Şekil 2.2. Demiryolu Rayının Bölümleri.....	26
Şekil 2.3. Oluklu Ray.....	28
Şekil 2.4. Çift mantarlı ray.....	30
Şekil 2.5. Cıvata tipli elastik bağlantı.....	37
Şekil 2.6. Balast tabakası.....	42
Şekil 2.7 Züblin sistemi.....	50
Şekil 2.8. Üçüncü ray sistemi kesiti.....	63
Şekil 2.9. Konsol-hoban takımı.....	67

GÖRSELLER DİZİNİ

Görsel	Sayfa
Görsel 1: Banliyö Sistemleri.....	13
Görsel 2: Metro Sistemleri	14
Görsel 3: Hafif Raylı Sistem.....	15
Görsel 4: Monoray Sistem.....	15
Görsel 5: Füniküler Sistemi.....	16
Görsel 6: Tramvay Sistemleri.....	17
Görsel 7: Otobüs.....	18
Görsel 8: Dolmuş.....	18
Görsel 9: Minibüsler	19
Görsel 10: Günlük Servisler.....	19
Görsel 11 : Balastlı Üstyapı.....	25
Görsel 12: Gömülü Dizayn Ray.....	28
Görsel 13: Ray.....	31
Görsel 14: Ahşap Travers.....	33
Görsel 15: Çelik Travers.....	34
Görsel 16: Beton Travers Çeşitleri.....	35
Görsel 17: Rijit Bağlantı Elamanı.....	36
Görsel 18: Cıvata Tipli Elastik Bağlantı Çeşitleri.....	37
Görsel 19: Yay Tipli Elastik Bağlantı.....	38
Görsel 20: Cebire Bağlantısı.....	40
Görsel 21: Bloklu Betona Tespit Sistemi Bölümleri.....	47
Görsel 22: Stedef Sistemi.....	48
Görsel 23: Rheda Sistemi.....	49
Görsel 24: Rheda Sisteminin Ayar Düzeneği	50
Görsel 25: Asfalt Yataklı Üst Yapı.....	52
Görsel 26: J-Shinkansen Prekast Üst Yapı.....	54
Görsel 27: Bölge Prekast Üst Yapı.....	55
Görsel 28: Porr Prekast Üst Yapı.....	56

Görsel 29:Yüksek Hızlı Hatlar İçin ERC Gömülü Ray İstemi.....	58
Görsel 30: YHT İçin ERC Gömülü Ray Sistemi Çim Hat.....	58
Görsel31:Kabataş-Bağcılar Tramvayı.....	60
Görsel 32: M1A Hafif Metro su.....	61
Görsel 33:Demiryolu Hattı Havai Hat (Katener) Besleme Şeması.....	62
Görsel 34: Rijit Katener Sistemi Kesiti.....	65
Görsel 35: Standart Katener Sistemi.....	65
Görsel 36: Katener Direği.....	66
Görsel 37: YYÜ Toplu Taşıma Güzergahı.....	120
Görsel 38: Öneri Hafif Raylı Sistem Güzergahı Eğim Analizi(%)......	121
Görsel 39: YYÜ Toplu Taşıma Durak Noktaları.....	122
Görsel 40: YYÜ Yolcuların Karakteristik Özellikleri.....	123
Görsel 41: YYÜ GES'in Konumu.....	126

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Altyapı İşleri Ve Altyapı Türleri.....	21
Tablo 2.2. Altyapı İşleri Ve Altyapı Türleri.....	22
Tablo 2.3. Rayların Mekanik Özellikleri.....	29
Tablo 2.4. Ray Etiketleme Sistemi.....	31
Tablo 2.5. Uygulanan Balastsız Hatların Burulma Rijitlikleri.....	45
Tablo 2.6. Pandül Boyu Ve Hız.....	70
Tablo 2.7. Güvenlik, Erişilebilirlik ve Konfor Kriterleri.....	78
Tablo 2.8. Raylı Sistem İşletmeciliği Türleri.....	81
Tablo 3.1. Ulaşım Türü Ve Emisyon.....	83
Tablo 3.2. Yatırım Maliyetleri.....	85
Tablo 3.3. Kapasite Ve İşletme Maliyeti.....	87
Tablo 3.4. Ömür Döngüsü Maliyeti (40 Yıl).....	87
Tablo 3.5. Enerji Tüketim Tablosu.....	90
Tablo 3.6. Karşılaştırmalı Değerlendirme.....	94
Tablo 3.7. Karşılaştırmalı Analiz.....	97
Tablo 3.8. Karşılaştırmalı Güvenlik Analizi.....	102
Tablo 3.9. Karşılaştırmalı Konfor Analizi.....	106
Tablo 3.10. Raylı Sistemlerin Ortalama Taşıma Kapasitesi.....	109
Tablo 3.11. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Ortalama Taşıma Kap.....	110
Tablo 3.12. Karşılaştırmalı Analiz.....	111
Tablo 3.13. Teknik Boyutların Karşılaştırılması.....	113
Tablo 3.14. Seçim Ölçütleri.....	113
Tablo 4.1. Yolcu Yoğunluğu.....	124
Tablo 4.2. YYÜ Kampüs İçi Ring Ulaşımı.....	125
Tablo 4.3. Doruk Saat.....	125

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilecek hafif raylı sistem projesinin yapılabilirliğini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Üniversitemizin ulaşım altyapısının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir bir kampüs içi ulaşım sisteminin planlanması hem akademik hem de günlük yaşam açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, hafif raylı sistemin teknik, ekonomik ve sosyal açıdan uygulanabilirliğini ortaya koymayı hedeflemektedir.

Tez süresince bilgi ve önerileriyle yol gösteren desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Ayhan CESUR'a teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmam sırasında desteklerini esirgemeyen başta eşim ve çocuklarım olmak üzere aileme de şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nin ulaşım planlamasına ve benzer projelerin geliştirilmesine katkı sağlamasını umut ediyorum.

GİRİŞ

Günümüzde çalışma ve sosyal hayatın hızlı yaşandığı şehirlerde, çevreci, gürültüsüz ve konforlu yolculuk hizmeti sunan toplu taşıma sistemlerine ihtiyaç duyulmakta ve bunlara uygun ulaştırma planlarının geliştirilmesi istenmektedir. Trafik ve nüfus yoğunluğundan etkilenmeyecek şekilde toplu taşıma sistemlerini düzenli hale getirebilen ve otomobil benzeri bireysel yolculuk sistemlerinin avantajlarını sunabilen yerel yönetimler, yoğun nüfuslu şehirlerin ulaşım ve trafik sorunlarını büyük ölçüde çözmüştür. Ancak ülkemizdeki şehirlerin büyük bir kısmı, son yıllarda yoğun göç almış ve planlanandan hızlı büyüyen bu şehirler, altyapı, barınma ve ulaşım ihtiyaçlarını temel konfor seviyesinde yürütemez hale gelmiştir. Özellikle ulaşım konusunda sorunları temelden çözmek yerine, maliyeti düşük ancak hızlı sonuç alınabilecek yöntemlere başvurulmuş ve trafik yoğunluğu kısa sürede artan güzergâhlarda otobüs ve dolmuş temelli ulaşım hizmetleri kullanılmıştır. Kısa vadede trafik sıkışıklığını ve yolculuk talebini karşılayan bu sistemler, uzun vadede aynı sorunların tekrarlanmasını önleyememiş ve trafik sıkışıklığı ile çarpık kentleşmeye çare olmak yerine sorunun ana unsurlarından biri haline gelmiştir. Trafik sorununa kalıcı çözümler arayan yerel yönetimler ise karayolları şerit sayısını artırma, kavşak düzenlemesi, alt geçit ve çevre yolları gibi projelerle ulaşım sorunlarını çözmeye çalışmışlardır. Ancak bunun sonucunda hizmet kalitesi artan karayolları, otomobil kullanımını teşvik etmiş ve trafik sorunlarını şehir merkezinden alarak şehrin tüm bölgelerine yaymıştır. Bu şekilde geleneksel yöntemlerle ulaşım sorunlarını çözmeye çalışan şehirler, kısa vadede ihtiyacı karşılasa da, uzun vadede şehrin tüm bölgelerini problemin bir parçası haline getirmiştir. Kent içi ulaşım sorunlarını bilimsel yaklaşımla ele alan ve temelden çözmeye çalışan şehirlerde, geçmiş hatalardan ders çıkararak toplu taşıma sistemlerine ağırlık verilmektedir. Gerektiğinde kent içi raylı sistemler ön plana çıkarılmakta, toplu taşıma kullanımı teşvik edilmekte ve özel otomobil kullanımını caydırıcı önlemler alınmaktadır. Böylece bireysel taşıt kullanımı gereksinim ve konfor olmaktan çıkarılarak, insan odaklı uygulamalar haline getirmektedir.

Ülkemizde hızlı sanayileşme ve yoğun iç göçler, şehirlerde çarpık kentleşmeye ve özellikle büyük şehirlerde karmaşık ve zor bir ulaşım sistemine yol açmaktadır. Yaşadığımız şehir Van, büyük kentlere özgü ulaşım problemleriyle yeni tanışmakta olup, şimdiden alınacak önlemler gelecekte karşılaşılabilecek olası problemlerin çözümünde son derece önemlidir. Hazırlamış olduğum bu çalışmada, raylı sistemler genel hatlarıyla tanıtılmış, diğer toplu taşıma sistemlerinden farklılıkları vurgulanmış ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüs alanının güzergâhının raylı sistem toplu taşımacılığına uygunluğu değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, Van ilimizde ve Türkiye genelinde toplu taşıma ve raylı sistemler kapsamında elektrikli hafif raylı sistemlerin (Light Rail Transit – LRT) dönüşüm süreci ile kentsel gelişme arasındaki ilişkiyi incelemektir. Çalışmada, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi yerleşkesinde elektrikli hafif raylı sistemin uygulanabilirliği, yolcu kapasitesi, teknik gereksinimler ve işletmecilik açılarından değerlendirilmiştir. Projenin hedefleri arasında, kampüs içi güvenli, konforlu ve engelli dostu ulaşım sağlamak; hızlı ve düzenli yolcu taşımacılığı ile ulaşım maliyetlerini düşürmek; çevresel etkileri azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak yer almaktadır. Ayrıca çalışma, hafif raylı sistemin üniversite kampüsü ve benzeri alanlarda uygulanabilirliğine ilişkin teknik ve finansal ön çalışmalar yapmayı ve geleceğe yönelik sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Van, 21. yüzyıla girerken yaklaşık beş yüz binlik kent nüfusu ve hızla gelişen ekonomik, kültürel, turistik ve eğitim alanındaki özellikleri ile Doğu Anadolu Bölgesi'nin en önemli şehirlerinden biri hâline gelmiştir. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüsü içerisinde mevcut ulaşım ağına ilave olarak planlanacak ve entegre biçimde çalışacak bu raylı sistem uygulaması ile her gün kampüs girişine gelen yaklaşık 35.000 kişi, güzergâh üzerinde yapılacak yürüme mesafesi ortalama 1000–2000 m olan, yerleri özenle seçilmiş duraklara taşınacaktır.

Raylı sistemin devreye alınmasıyla birlikte minibüs ve otobüs seferlerinde azalma beklenmekte, özel araç kullanımı da önemli ölçüde düşecektir. Bu sayede kampüs çevresinde ve şehir merkezine bağlantı yollarında karayolu trafiğinde yaklaşık %40 oranında bir rahatlama olacağı tahmin edilmektedir.

Kampüs içi raylı sistemde, mevcut sistemlerde kullanılan 2,50 m genişliğinde düşük tabanlı araçlar tercih edilecektir. Bu sayede kaldırım seviyesinden (yaklaşık 20 cm) araca kolaylıkla binmek mümkün olacaktır.

Karayolu ve yaya geçişleri modern trafik sinyalizasyon sistemi ile sağlanacak, ancak sinyalizasyon sistemi raylı sistem araçlarına öncelik verecek biçimde düzenlenecektir. İstasyon ve kavşaklar uzaktan kamera sistemi ile kontrol edilip, tüm sistem tek bir merkezden yönetilecektir. Bu durumda sefer aralıkları, güvenlik ve düzenli trafik akışı sürekli olarak kontrol altında tutulacaktır.

Kampüs içi raylı sistem projesinde eğitim binalarına ve yapısal alanlara titreşimden zarar vermemek amacıyla elastik ray bağlantı sistemi kullanılacaktır. Ayrıca araçların dingil basıncı 7,3 ton olup, bu değer otobüslerin dingil basıncından daha düşüktür. Bu durum hem ray ömrünü uzatacak hem de çevresel gürültüyü azaltacaktır. Araçların bakım ve onarım işlemleri için kampüs güzergâhına yakın konumda planlanacak bir depo ve bakım alanı kullanılacaktır.

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüsü raylı sistem güzergâhı, yapım kolaylığı, kısa sürede tamamlana bilirliği ve yüksek öğrenci-yolcu talebi gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bu nedenle proje, Van kent içi ulaşım sistemine entegre edilmesi planlanan hatlar arasında öncelikli konumdadır. Van ve kampüs ulaşım sisteminde önemli bir yer edinecek olan bu hat, kısa vadede hem ulaşım kalitesini yükseltecek hem de şehir trafiğinde belirgin bir rahatlama sağlayacaktır.

A. Kuramsal ve Kavramsal Çerçeve

Kent içi ulaşımın temel bileşenlerinden biri olan raylı sistemler, 19. yüzyılda Sanayi Devrimi'nin etkisiyle ortaya çıkmış ve kentleşmenin hızlanmasıyla birlikte modern toplu taşımacılığın simgesi hâline gelmiştir (Gourvish, 1995). 1825 yılında İngiltere'de hizmete giren Stockton–Darlington hattı ilk modern demiryolu olarak kabul edilirken, buharlı lokomotiflerin icadı ulaşım maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüştür (Smith, 2002). 20. yüzyılın başlarında elektrikli tramvayların yaygınlaşmasıyla kent merkezlerinde sessiz, çevreci ve düzenli toplu ulaşım biçimleri gelişmiştir (Berger, 2010). Vuchic (2007), raylı sistemleri “yüksek kapasite, düşük enerji tüketimi ve toplumsal fayda oranı en yüksek sistem” olarak tanımlar. Almanya, Japonya ve Fransa gibi ülkelerde sürdürülebilir ulaşım politikalarının temelinde raylı sistemlerin yer aldığı görülmektedir (Litman, 2021). Avrupa’da kent içi raylı sistemlerin karbon emisyonunu karayolu ulaşımına kıyasla yaklaşık %60 oranında azalttığı tespit edilmiştir (UITP, 2019).

Türkiye’de raylı ulaşımın kökeni Osmanlı dönemine uzanır. 1856’da İzmir–Aydın hattı ile başlayan demiryolu serüveni, Cumhuriyet döneminde ulusal kalkınma politikalarının merkezine yerleşmiştir (Mier,2019). 1923–1950 arası dönem “demiryolunun altın çağı” olarak anılırken, bu süreçte hat uzunluğu 8.637 km’ye ulaşmıştır (Özalp, 2007). Ancak 1950 sonrası karayolu yatırımlarının öncelik kazanmasıyla raylı sistemlerin payı azalmış, 2000’li yıllarda artan kent nüfusu ve çevresel kaygılar sonucu yeniden gündeme gelmiştir (Evren, 1996). Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın (UAB, 2011) “Ulaşım Ana Plan Stratejisi”nde, 500 binin üzerindeki kentlerde toplu taşımada raylı sistemlerin yaygınlaştırılması hedeflenmiştir. İstanbul, Ankara, Konya, Eskişehir ve Samsun’daki projeler, Türkiye’de orta ölçekli şehirlerde de benzer yatırımların yapılabilirliğini göstermiştir (Kızılay, 2022).

Raylı sistemler genel olarak ağır raylı (metro), hafif raylı (HRS), tramvay ve banliyö hattı olarak sınıflandırılır (Berker,1972). Metro sistemleri genellikle yüksek kapasiteli (60.000 yolcu/saat) yeraltı hatlarıyken (Evren&Dündar,1996), hafif raylı sistemler orta ölçekli kentlerde kent merkezleriyle doğrudan entegrasyon sağlayan

çözümler sunar (Vuchic, 2007). Hafif raylı sistemler, küçük kurp yarıçaplarına (30–50 m) ve %5–6 eğim değerlerine uyum sağlayabilmeleriyle özellikle kampüs gibi eğimli alanlarda uygulanabilirliği artırır (Toprak & Aktürk, 2001). Enerji açısından dizel otobüslere göre %35–40 daha verimlidir ve rejeneratif frenleme teknolojisiyle enerji geri kazanımı sağlar. Türkiye’deki örneklerde hat uzunlukları 10–25 km arasında değişmekte olup genellikle 750 V DC enerji beslemesi kullanılmaktadır (Düzkaya, 2016). HRS, metro ile tramvay arasında konumlanan, genellikle 15.000–30.000 yolcu/saat taşıma kapasitesine sahip bir sistemdir (Arlı & Öztürk, 2009). Düşük tabanlı araç yapısı, enerji verimliliği ve sessiz işletimiyle kent merkezlerinde tercih edilir (Toprak & Aktürk, 2001). (Evren&Dündar,1996) ve (Vuchic, 2007), HRS’yi “esnek hat yapısı, düşük eksen basıncı ve kısa kurp yarıçapı sayesinde kentsel dokuyla uyumlu sistem” olarak tanımlar. Avrupa örneklerinde (ör. Strasbourg, Freiburg), HRS kent kimliğine katkı sağlamakta, yaya hareketliliğini ve toplu ulaşım oranını artırmaktadır (Pucher & Buehler, 2012).

Türkiye’de ilk modern HRS uygulaması 1992’de İzmir’de başlamış, ardından Bursa (2002), Antalya (2009) ve Konya (2015) gibi kentlerde yaygınlaşmıştır. Bu sistemler, karayolu yoğunluğunu azaltarak enerji verimliliği sağlamaktadır (Düzkaya, 2016). Özden (2012), yatırım geri dönüş süresinin 12–15 yıl arasında değiştiğini ve başarının hat uzunluğu, istasyon aralığı, zemin durumu ve yolcu talebi planlamasına bağlı olduğunu belirtmiştir. Deniz (2021) ise eğimin %5’in altında olduğu güzergâhlarda balastsız üstyapı kullanımının maliyetleri %8 azalttığını vurgulamıştır.

Raylı sistemlerin çevresel ve toplumsal etkileri literatürde sıklıkla incelenmiştir. Cagman vd. (2022), enerji tüketiminin karayolu taşımacılığına göre %35–40 daha düşük olduğunu; Uçar (2020) ve Tüfekçi (2019) ise elektrikli sistemlerin gürültü, titreşim ve emisyon açısından çevre kalitesini artırdığını göstermiştir. Yılmaz ve Demir (2023), HRS’nin dizel otobüslere kıyasla 20 yılda karbon ayak izini %55 azalttığını saptamıştır. Ayrıca Vuchic (2007) ve Litman (2021), raylı sistemlerin birim yolcu başına enerji tüketiminin karayolu ulaşımına göre %60 daha düşük olduğunu, Özden (2012) ise bakım maliyetlerinin %25 daha az olduğunu belirtmiştir. HRS’lerin sessiz, güvenli ve çevreye duyarlı yapısı toplumsal kabul oranını artırırken (Pucher &

Buehler, 2012), karayolu sistemleri karbon salınımı ve trafik yoğunluğu nedeniyle dezavantajlıdır (Tüfekçi, 2019).

Dünya genelinde birçok üniversite, düşük emisyonlu ulaşım sistemlerine geçmektedir. ABD’de Portland State University, Kanada’da University of Calgary ve Japonya’da Tsukuba University kampüslerinde hafif raylı veya elektrikli tramvay sistemleri iç ulaşımın temelini oluşturur (Reis & Birinci, 2020). Düzkaya (2016) ve Aydın (2020), orta ölçekli şehirlerde jeolojik zemin, eğim ve yolcu talebinin proje başarısında belirleyici olduğunu vurgulamıştır. Raylı sistemlerin en önemli avantajı yüksek kapasite ve düşük işletme maliyetidir. Vuchic (2007), enerji verimliliğinin lastik tekerlekli otobüslere göre %40’a kadar fazla olduğunu; Özden (2012) ise bakım maliyetlerinin %25 daha düşük olduğunu belirtmiştir. Toprak ve Aktürk (2001) raylı sistemlerin sessiz ve çevreye duyarlı yapısına dikkat çekerken, Uçar (2020) HRS’nin kampüs güvenliği ve öngörülebilirliği açısından avantajlı olduğunu vurgulamıştır. Raylı sistemler doğaya doğrudan ve dolaylı katkılar sunar. Tüfekçi (2019), en önemli faydanın karbon salınımının azaltılması olduğunu; Cagman vd. (2022) ise HRS’nin hava kalitesini iyileştirip yıllık CO₂ salınımını %30–40 azalttığını belirtmiştir. Litman (2021) ve UITP (2019), yolcu başına karbon ayak izinin karayoluna göre %60 azaldığını ifade etmiştir. Gürültü ve titreşimin düşük olması, özellikle üniversite kampüslerinde ekolojik dengeyi korur (Aydın, 2020).

Toplumsal düzeyde, raylı sistemler ulaşım hakkı eşitliğini güçlendirir, sosyal mekânlara erişimi artırır (Kızılay, 2022) ve kentsel hareketliliği düzenler (Vuchic, 2007). Deniz (2021), HRS’nin yerel ekonomiye katkı sağlayarak istihdam oluşturduğunu, Pucher ve Buehler (2012) ise raylı sistem bölgelerinde yaya ve bisiklet trafiğinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, yoğun yolcu talebi olan bölgelerde HRS trafik sıkışıklığını azaltır (Arlı & Öztürk, 2009; Düzkaya, 2016). HRS sistemleri rejeneratif frenleme teknolojisiyle %30’a kadar enerji geri kazanımı sağlayabilir (Cagman vd., 2022). Yılmaz ve Demir (2023), elektrikli raylı sistemlerin 1 km başına enerji tüketiminin dizel otobüslerden %35 daha düşük olduğunu, Deniz (2021) ise Van gibi kentlerde enerji maliyetlerinin 15 yıl içinde geri kazanılabileceğini belirtmiştir. Tüfekçi (2019), kent içi emisyonların %40’ının karayolu taşımacılığından kaynaklandığını ve HRS’nin bu oranı önemli ölçüde düşürdüğünü ifade etmiştir.

Yılmaz ve Demir (2023), 20 yıllık süreçte CO₂ salınımının %55 azaldığını saptamıştır. Aydın (2020) ve Düzkaya (2016), eğimi düşük kampüslerde HRS'nin optimum performans ve ekonomik sürdürülebilirlik sağladığını vurgulamıştır.

Elde edilen veriler, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (Van YYÜ) Kampüsü gibi orta ölçekli alanlarda hafif raylı sistemlerin (HRS) teknik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Kampüsün geniş alanı, düşük eğim oranı (%3) ve mevcut yol altyapısı, HRS'nin kurulumu için uygun fiziksel koşullar sunmakta; bu durum dizel minibüs taşımacılığına çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif oluşturmaktadır.

Van YYÜ'de planlanacak elektrikli HRS uygulaması, minibüs trafiğini azaltarak enerji tüketimini ve güvenlik risklerini düşürebilir; aynı zamanda düzenli, zaman tasarrufu sağlayan bir ulaşım yapısı oluşturabilir. Ayrıca, yıllık yaklaşık 150 ton CO₂ salınımının önlenmesi sayesinde üniversitenin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Tüm bu özellikler değerlendirildiğinde, Türkiye'de bu ölçekte uygulama bulunmamakla birlikte, Van YYÜ özelinde yürütülen çalışma, bölgesel ölçekte öncü niteliktedir. Van YYÜ Kampüsü'nde hafif raylı sistem uygulaması hem teknik hem de çevresel açıdan uygulanabilir bir proje olarak öne çıkmakta ve Türkiye'deki üniversite kampüsleri için örnek bir model niteliği taşımaktadır.

1. RAYLI SİSTEM VE TOPLU TAŞIMA

1.1.Dünyadaki Tarihsel Gelişim

Ulaşımın günümüzdeki modern hâline ulaşmasında iki temel dönüm noktası öne çıkmaktadır: ilki tekerleğin icadı, ikincisi ise 17. ve 18. yüzyıllarda ivme kazanan Sanayi Devrimi'dir. Sanayileşme süreciyle birlikte yaşanan teknik yenilikler, önce üretim süreçlerinde, ardından da sosyal ve ekonomik alanlarda kendini göstermiştir. Bu gelişmeler, dünya genelinde hızlı bir küreselleşmeyi tetiklemiş, ulaşım alanında ise coğrafi ve sosyal sınırların giderek belirsizleşmesine neden olmuştur.

17.yüzyılda Paris başta olmak üzere Avrupa'nın birçok kentinde kullanılan atlı arabalar, zamanla yerini "omnibüs" adı verilen toplu taşıma araçlarına bırakmıştır. 1825 yılında Paris'te hizmete giren bu omnibüsler, yaklaşık 18 yolcu taşıyabilen at arabaları niteliğindeydi. Sanayi Devrimi'nin hız kazandığı 19. yüzyılın ikinci yarısında ise bu araçların yerini, "cable car" olarak bilinen kablo destekli taşıtlar almıştır. (Gourvish, 1995). Türkçede trolleybüs olarak adlandırılan bu sistemler, günümüz raylı ulaşım sistemlerinin ilk örnekleri olarak kabul edilmektedir. Teleferik benzeri bir kablo hattı üzerinde hareket eden bu araçlar, kısa mesafeli ulaşımında kolaylık sağlamasına karşın uzun mesafeler için yeterli verimliliğe sahip değildi (Akagündüz, 2016).

Sanayi Devrimi'nin öncüleri arasında yer alan Thomas Newcomen (1705) ve James Watt (1760) tarafından geliştirilen buharlı sistemler, insan yaşamına büyük bir dönüşüm kazandırmış ve modern ulaşım araçlarının temelini oluşturmuştur. Motor gücünün devreye girmesiyle birlikte ulaşım, yalnızca kısa mesafelerle sınırlı kalmaktan çıkmış, daha geniş alanlarda hızlı ve etkin bir biçimde yapılabilir hâle gelmiştir. 19. yüzyılın başlarında ilk otomobilin icadı, 20. yüzyılın başlarında ise kitle taşımacılığı kavramının ortaya çıkmasıyla ulaşım alanında yeni bir dönem başlamıştır. (Smith,2002)

Kitle taşımacılığı, özellikle kent içi ulaşımında büyük bir dönüşüm yaratmış; insanların iş, eğitim, seyahat ve sosyal ihtiyaçlarını karşılamak üzere bir yerden başka bir yere daha hızlı ve güvenli biçimde ulaşmasını sağlamıştır. Böylece ulaşım, yalnızca bir gereksinim değil, aynı zamanda bir ekonomik sektör haline gelmiştir.(Berger,2010)

Buhar gücünün sanayide kullanılmaya başlanmasıyla birlikte ulaşım sistemleri de hızla çeşitlenmiştir. 1819'da ilk buharlı gemi Atlantik Okyanusu'nu geçmeyi başarmış, 1825'te ilk buharlı tren hattı İngiltere'de hizmete girmiştir. 1863'te Londra'da ilk yeraltı treni, 1867'de ise New York'ta tren yolculukları başlamıştır. 1896 yılında dizel motorun icadı, ulaşım teknolojisinde yeni bir evre başlatmış. (Bektaş 2022) Bu sayede elektrikli tramvaylar ve metrolar kent içi taşımacılığın temel unsurları hâline gelmiştir. 1908'de ilk uçağın kullanımı gerçekleştirilmiş, 1928 yılı itibarıyla havayolu taşımacılığı toplu ulaşımın önemli bir parçası hâline gelmiştir (Abbasgil, 1994).

1.2. Türkiye'deki Tarihsel Gelişim

Türkiye'de toplu taşımacılığın gelişimi tarihsel açıdan değerlendirildiğinde, 1923–1950 yılları arasında raylı sistemlere öncelik verilen bir dönemin yaşandığı görülmektedir. Türkiye'de raylı ulaşımın temelleri aslında Osmanlı Devleti dönemine kadar uzanmaktadır. Osmanlı'nın yenileşme çabalarının yoğunlaştığı 1830'lu yıllardan itibaren, geleneksel ulaşım biçimlerinin yetersizliği ve verimsizliği nedeniyle, Batı'daki teknolojik gelişmelerden esinlenilerek raylı ulaşım sistemlerine geçiş hedeflenmiştir. (Pektaş,2017)

1856–1922 yılları arasında hem dar hem de normal hatlı demiryolları inşa edilmiştir. Bu dönemde yapılan hatlar arasında Rumeli Demiryolları (2.383 km), Anadolu–Bağdat Demiryolları (2.424 km), İzmir–Kasaba hattı (695 km), İzmir–Aydın hattı (610 km), Şam–Hama hattı (498 km), Yafa–Kudüs hattı (86 km), Bursa–Mudanya hattı (42 km) ve Ankara–Yahşihan hattı (80 km) yer almaktadır. Toplamda 8.619 km'lik bir demiryolu ağı oluşturulmuştur. Bu hatların büyük bir kısmı, özellikle Osmanlı Devleti'nin son dönemlerinde askerî ve lojistik ihtiyaçları karşılamak amacıyla yapılmıştır.

Cumhuriyet'in ilanıyla birlikte demiryolu politikaları hız kazanmış ve 1923–1940 yılları arasında Türkiye demiryolu taşımacılığında “altın çağ” olarak anılan bir döneme girmiştir. 1940 yılına gelindiğinde, 4.559 km olan demiryolu uzunluğu 8.637 km'ye ulaşmıştır. Cumhuriyet hükümetleri, demiryollarını devlet güvencesi altına alarak ulaşım politikasını bu ekseninde geliştirmiştir (Pektaş,2017) Özellikle Birinci

(1932) ve İkinci Beş Yıllık Sanayi Planları (1936) kapsamında ulaşım altyapısının modernleştirilmesi ve sanayi bölgeleriyle bağlantılı demiryolu hatlarının yaygınlaştırılması öncelikli hedef olmuştur. Ancak 1950'lerden itibaren ulaşım politikalarında yön değişmiş, raylı sistem yatırımları azalırken karayolu ulaşımı ön plana çıkmıştır. Bu süreçte demiryolları daha çok yük taşımacılığına yönelik kullanılmaya başlanmıştır (Altınok,2001). Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) verilerine göre, 1950 yılında yük taşımacılığında %68,2 oranında paya sahip olan demiryolları, 2022 yılına gelindiğinde %4,6'ya gerilemiştir. Benzer şekilde, yolcu taşımacılığındaki oran da %42,2'den %1,5'e düşmüştür. Bu durum, karayolu yatırımlarının artması ve motorlu taşıt teknolojilerindeki gelişmelerin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.(Altınok,2001)

1950 sonrası dönemde toplu taşımaya yönelik yatırımlar karayollarına kaymış; modern taşıt üretimi ve otoyol yapım projeleri hız kazanmıştır. Gebze-İzmit, Tarsus-Pozantı ve Kapıkule-Edirne otoyolları gibi projelerle birlikte 1980'lerden sonra karayolu taşımacılığı Türkiye genelinde daha yaygın ve erişilebilir bir hâl almıştır (Saatçioğlu & Yaşarlar, 2012).

2000'li yıllarla birlikte, teknolojik ilerlemeler ve kentleşme hızının artmasıyla toplu taşımacılık anlayışı yeniden şekillenmiştir. Kent nüfuslarının artışı ve mobilite ihtiyacının büyümesi, akıllı ulaşım sistemleri, entegrasyon odaklı planlama ve sürdürülebilir taşımacılık politikalarını ön plana çıkarmıştır. Ulaştırma, Haberleşme ve Denizcilik Bakanlığı'nın (UHDB) 2011 tarihli Ulaşım Strateji Raporu, uzun vadede güvenli, erişilebilir, hızlı, ekonomik ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesini temel hedef olarak belirlemiştir.

Bu strateji kapsamında özellikle nüfusu 500 binin üzerinde olan kentlerde toplu taşımaya öncelik verilmiş; otobüs, tramvay, metro ve bisiklet yolları gibi sistemlerin sürdürülebilir ulaşım politikaları doğrultusunda planlanması öngörülmüştür. Hareket kabiliyeti sınırlı bireylerin toplu ulaşımdan yararlanabilmesi, çevre dostu araçların yaygınlaştırılması ve akıllı ulaşım teknolojilerinin entegre edilmesi gibi hedefler de stratejik planda yer almıştır (Saatçioğlu & Yaşarlar, 2012).

2000 sonrası dönemde bu hedefler doğrultusunda İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlerde önemli toplu ulaşım projeleri hayata geçirilmiştir. İstanbul'da

2007 yılında hizmete giren metrobüs sistemi, uzun mesafeli hızlı toplu taşıma alanında öncü bir adım olmuştur. 2022 verilerine göre İstanbul'da günlük yaklaşık 15 milyon yolcunun taşındığı sistemin %73'ü karayolu taşımacılığına dayanmaktadır (İETT, 2023). Artan nüfus yoğunluğu ve trafik sorunları karşısında metrobüs, metro ve Marmaray gibi projeler hem enerji tasarrufu hem de karbon salınımının azaltılması açısından büyük katkılar sağlamaktadır. (İETT,2023)

Benzer şekilde, Ankara ve İzmir'de de raylı sistem hatlarının genişletilmesi, otobüs seferlerinin artırılması ve toplu ulaşımın entegrasyonunun sağlanması yönünde çalışmalar yapılmıştır. Böylece Türkiye'de toplu ulaşım yatırımları, 2000'li yıllardan itibaren yalnızca altyapı projeleriyle sınırlı kalmamış; aynı zamanda teknolojik yenilikler ve sürdürülebilir kent politikaları çerçevesinde yeniden şekillendirilmiştir. (Tekeli & İlhan, 2015)

1.3. Toplu Taşıma Sistemleri

Ulaşım, insan yaşamının vazgeçilmez bir gereksinimidir. Taşıma, karayolu, demiryolu, denizyolu veya havayolu aracılığıyla insan ve eşyaların bir yerden başka bir yere aktarılması sürecidir. İnsanın hareket etme yeteneğiyle başlayan bu olgu, zamanla modern kent yaşamının temel dinamiklerinden biri haline gelmiştir. (Arslan, 2019)

Sanayileşme süreciyle hız kazanan kentleşme, ulaşım talebini artırmış ve kentlerde yaşayan yoğun nüfusun etkin biçimde taşınabilmesi için toplu taşımacılığın önemi artmıştır. Toplu taşımacılığın temel amacı, bireysel araç kullanımından kaynaklanan trafik yoğunluğu, çevresel zararlar ve enerji israfını azaltarak kent içi ulaşımı daha verimli hale getirmektir (Arslan,2019).Toplu taşımanın başlıca özellikleri şu şekilde özetlenebilir (White, 2002).

•**Trafiği Azaltıcı Etki:** Bireysel araç kullanımının yol açtığı trafik yoğunluğu, toplu ulaşım tercih edildiğinde önemli ölçüde azalmaktadır.

•**Sağlık Üzerindeki Olumlu Etki:** Toplu taşıma, bireylerin daha fazla hareket etmesini teşvik ederek fiziksel sağlık açısından fayda sağlar.

- Yakıt Tasarrufu:** Aynı anda çok sayıda kişinin taşınması, yakıt tüketimini bireysel ulaşımına göre ciddi oranda düşürür.
- Çevre Dostu Olması:** Otomobillerden kaynaklanan karbon salınımı toplu taşımada minimum seviyededir.
- Ekonomik Katkı:** Yakıt tasarrufu ve düşük işletme maliyetleriyle toplu ulaşım, ekonomik kalkınmayı destekleyen bir unsurdur.
- Güvenlik:** Belirlenmiş güzergâhlar, planlı seferler ve profesyonel sürücüler sayesinde toplu taşıma bireysel ulaşımına kıyasla daha güvenlidir.

1.3.1 Demiryolu Toplu Taşıma Sistemleri

1.3.1.1 Banliyö Sistemleri

Banliyö trenleri, genellikle büyükşehirlerin çevresindeki yerleşim alanlarıyla kent merkezleri arasında düzenli yolcu taşımacılığı sağlamak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Ayrıca, birbirine yakın konumda bulunan şehirler arasında da etkin bir ulaşım aracı olarak görev yapmaktadır (Kırmızı,2012).

Banliyö hatları, yüksek yolcu taşıma kapasiteleri nedeniyle genellikle ağır demiryolu sınıfında değerlendirilmektedir. Bu sistemler, çoğunlukla mevcut ana hat demiryolu altyapısını kullandıklarından, altyapı yatırımı, enerji tüketimi ve işletme giderleri açısından diğer kentsel raylı sistemlere kıyasla daha düşük maliyetli çözümler sunmaktadır. (Berke, 1972) Banliyö hatlarında çok sayıda vagon dan oluşan tren setleri kullanılabilir. Ancak duraklar arası mesafeler ile sefer aralıkları, metro veya hafif raylı sistemlere göre daha uzun tutulmaktadır. Bu sistemlerin temel amacı, yüksek hacimli yolcu taşımacılığını düşük maliyetle gerçekleştirmek olduğundan, araçlarda konfor ve bagaj alanı sınırlıdır. Ortalama işletme hızları 55–75 km/saat arasında değişmekte olup, hat açıklığı genellikle 1435 mm’dir. Enerji beslemesi 15–25 kV aralığındaki elektrik akımıyla katener sistemleri üzerinden sağlanmaktadır. (Berke,1972)



Görsel 1:Banliyö Sistemleri(Anadolu Ajansı)

1.3.1.2 Metro Sistemleri

Metro sistemleri, tamamen kendilerine ait hatlarda işletilen, gelişmiş sinyalizasyon teknolojilerine sahip yüksek kapasiteli raylı ulaşım sistemleridir. Bu özellikleri sayesinde yüksek hız, güvenli işletme, enerji verimliliği ve yoğun yolcu taşımacılığı avantajlarını bir arada sunmaktadır (Vuchic, 2007).

Metro hatları, genellikle yoğun nüfuslu ve yüksek trafik sirkülasyonuna sahip kentsel merkezlerde, yüzeydeki araç yükünü azaltmak amacıyla yeraltında tünel yöntemiyle inşa edilir. Arazinin jeolojik yapısına göre hatlar, aç-kapa tünel, delme tünel ya da bazı durumlarda yüzeysel (hemzemin) veya viyadük üzerinde konumlandırılabilir. (Arslan,2019)

Metro sistemleri, tek yönde saatte 70.000–80.000 yolcu taşıma kapasitesine ulaşabilmektedir. Yolcu talebine bağlı olarak dizideki araç sayısı artırılabilir ve buna paralel olarak peron uzunlukları da uzatılmaktadır. Ortalama işletme hızı 42–48 km/saat aralığında olup, maksimum hız 90 km/saat'e kadar çıkabilmektedir. Araç dizileri genellikle 8 vagonlu olup, 200 metre uzunluğa kadar ulaşabilmektedir (Aktop Maden & Avlar,2017) Yüksek inşaat ve otomasyon maliyetleri gerektirmesine karşın, doğru güzergâh planlamasıyla uygulanan metro sistemleri uzun vadede ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan yüksek fayda sağlamaktadır. Bu nedenle metro, modern kent içi ulaşım politikalarının merkezinde yer alan stratejik bir toplu taşıma çözümüdür (Arslan,2019)



Görsel 2: Metro Sistemleri (Türkiye Gazetesi)

1.3.1.3. Hafif Raylı Sistemler

Hafif raylı sistemler, şehir içi raylı toplu taşıma türleri içinde orta kapasiteli bir ulaşım çözümü olarak önemli bir yere sahiptir. Tramvay sistemlerine göre daha fazla, ancak metro sistemlerine göre daha düşük yolcu kapasitesine sahiptir. Bu sistemler genellikle yüksek talep akslarında ana ulaşım hattı olarak ya da metrolarla entegre çalışan tali sistemler biçiminde hizmet vermektedir. (Berke,1072)

Vuchic'e (2007) göre hafif raylı sistemler, aynı güzergâhta farklı yol hakkı türlerini kullanabilme esnekliğiyle birlikte yüksek kapasite, iş gücü verimliliği ve konforlu sürüş avantajlarını da sağlamaktadır. Yoğun şehir merkezlerinde bu hatların yeraltı tünellerine sahip olması tercih edilirken, kent çeperlerinde yüzeysel veya yarı ayrılmış hat düzenleri uygulanabilir.

Hafif raylı sistemlerde genellikle 4 vagonlu tren dizileri kullanılmakta ve sistemler tek yönde saatte 15.000–30.000 yolcu kapasitesine ulaşabilmektedir. Bu sistemler, mümkün olduğunca karayolu trafiğiyle kesişmeyen hatlarda inşa edilir. İstasyon uzunlukları yaklaşık 100 metre, araç genişlikleri ise 2650 mm civarındadır (Kölük, 2005; Toprak ve Aktürk, 2001). Enerji beslemesi katener, rijit katener veya üçüncü ray sistemleriyle sağlanmakta; hat eğimleri genellikle %5,5, karp yarıçapları ise 250 m civarındadır.



Görsel 3: Hafif Raylı Sistem (Yeni Ufuk Gazetesi)

1.3.1.4. Monoray Sistemleri

Monoray sistemleri, kısa ve orta mesafeli kent içi ulaşım için kullanılan, tek ray üzerinde çalışan elektrikli toplu taşıma sistemleridir. Ray hattı, çelik ya da beton kolonlara monte edilmiş tek kiriş üzerinde veya altına asılı biçimde yerleştirilir. Bu yapı tipine göre monoray sistemleri “straddle” (üzerinden giden) veya “suspended” (alttan asılı) olarak sınıflandırılmaktadır (Gültekin vd., 2003).

Monoray araçları genellikle 30–35 km/saat işletme hızına sahip olup, sistemin maksimum yolcu taşıma kapasitesi saatte yaklaşık 35.000 yolcu düzeyindedir. Bu sistemler, kendilerine ait güzergâhlarda çalıştıkları için karma trafikten bağımsız şekilde işletilir. Kolonlar üzerinde konumlanan hat yapısı, yaya ve araç trafiğinin kesintisiz şekilde devam etmesine olanak tanır. Bu nedenle monoray, yer darlığı bulunan kentlerde veya turistik bölgelerde uygun bir ulaşım alternatifi olarak değerlendirilmektedir. (Evren,1996)



Görsel 4: Monoray Sistem (Wikipedia)

1.3.1.5 Füniküler Sistemler

Füniküler sistemler, yüksek eğimli arazilerde yolcu taşımak amacıyla tasarlanmış raylı taşıma sistemleridir. Temel olarak iki araç, bir çelik halat yardımıyla birbirine bağlanır ve aynı hat üzerinde zıt yönlerde hareket eder. Araçlardan biri yukarı çıkarken, diğeri aşağı iner ve bu sayede enerji dengesi sağlanır. (Evren,1996)

Füniküler sistemler, hem asansör hem de demiryolu teknolojisinin birleşimi olarak değerlendirilebilir. Hat üzerinde, belirli bir noktada paralel ray sistemi ile araçların birbirini geçmesi sağlanır; ardından hat yeniden tek raya düşer. Bu sistem, özellikle deniz seviyesinden yüksek yerleşimlerle kıyı bölgeleri arasında ulaşım sağlamak için tercih edilmektedir.



Görsel 5:Füniküler Sistemi (Rayhaber)

1.3.1.6 Tramvay Sistemleri

Tramvay sistemleri, karayolu trafiğiyle aynı güzergâhı paylaşan, düşük kapasiteli ancak düşük maliyetli raylı ulaşım türleridir. Elektrik enerjisini katener hatlarından alan tramvay araçları, alçak tabanlı yapılarıyla şehir içi ulaşımında erişilebilirliği yüksek bir çözüm sunmaktadır. (Toprak & Aktürk, 2001)

Genellikle küçük ve orta ölçekli kentlerde ana ulaşım sistemi, büyük şehirlerde ise besleyici sistem olarak kullanılmaktadır. Karma trafikte çalışmaları nedeniyle araç dizileri kısa tutulur; genellikle iki vagonlu diziler tercih edilir. Ortalama yolcu taşıma

kapasiteleri tek yönde saatte 8.000–15.000 yolcu, işletme hızları ise 15–30 km/saat aralığındadır (Vuchic, 2007).

Tramvay hatları, genellikle 400–600 metre aralıklarla yerleştirilen istasyonlara sahiptir. İstasyon uzunlukları 60 metreyi geçmez. Hat eğimleri %7'ye, kurp yarıçapları ise 35 metreye kadar ulaşabilir. Havai katener hatlarından 750 VDC enerji ile beslenir ve genellikle 1435 mm hat açıklığı standardı uygulanır. Araçlar 14–21 metre uzunluğunda olup 100–180 yolcu kapasitesine sahiptir; bunun yaklaşık %20–40'ı oturma alanıdır. (Toprak & Aktürk, 2001)



Görsel 6: Tramvay Sistemleri(Ulaştırma Bilgi Kaynağı)

1.3.2.Karayolu Toplu Taşıma Sistemleri

Karayolu toplu taşıma sistemleri, otobüsler ve minibüsler gibi karayolu araçlarıyla gerçekleştirilen ulaşım hizmetlerini kapsamaktadır. Bu sistemler, bireylerin toplu olarak seyahat etmelerini sağlamakta ve şehir içi veya şehirlerarası ulaşım ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Karayolu toplu taşıma sistemlerinin temel örnekleri ise şunlardır. (Bektaş,2022)

1.3.2.1 Şehirler Arası Otobüsler

Şehirlerarası otobüsler,farklı şehirleri birbirine bağlayan, genellikle uzun mesafe yolculukları için kullanılan toplu taşıma araçlarıdır .Bu sistemler konforlu ve düzenli seferlerle yolculara hizmet sunar.

Özellikler: Uzun mesafe, konforlu koltuklar, biletli sistemdir.(Bektaş,2022)



Görsel 7: Otobüs (Online Terminal)

1.3.2.2 Dolmuşlar

Dolmuşlar, sabit hat üzerinde ama yolcu talebine göre kalkan minibüs benzeri araçlardır. Özellikle kısa mesafeli şehir içi ulaşımda yaygındır.(Bektaş,2022)

- Özellikler: Talebe göre hareket, düşük bilet maliyeti, sık duraklama.



Görsel 8: Dolmuş (Vanhaber)

1.3.2.3.Minibüsler

Minibüsler, kısa ve orta mesafelerde kullanılan, esnek hatlı toplu taşıma araçlarıdır. Küçük kapasiteye sahip olup, sık duraklamalar yapabilirler.(Bektaş,2022)

- Özellikler: Esnek güzergâh, hızlı hareket, düşük yatırım maliyeti.



Görsel 9: Minibüsler (Vanhaber)

1.3.2.4. Günlük Servisler

Günlük servisler, özellikle fabrikalar, okullar veya şirketler tarafından düzenlenen çalışan ve öğrenci taşımacılığıdır. Genellikle sabah ve akşam seferleri bulunur. Özellikler; Belirli kullanıcı grubu, zamanlı seferler, güvenli ulaşım.(Bektaş,2022)



Görsel 10: Günlük Servisler (Şehrvan)

2.RAYLI SİSTEMİN TÜRLERİ VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

2.1.Raylı Sistemlerin Altyapı Teknik Özellikleri

Bir ulaşım güzergâhında, taşıtların üzerinde hareket ettiği yuvarlanma yüzeyini taşıyan platformun ve bu platformun altında kalan yapı tabakalarının tümüne altyapı denir. Boy kesitte, arazinin doğal yüzeyini temsil eden siyah çizgi ile yol platformunun kotunu gösteren kırmızı çizgi arasındaki farkı ortadan kaldırmak ve bu seviyeyi sabit tutmak amacıyla inşa edilen yapılar altyapıyı oluşturur. Bu sürecin gerçekleştirilmesi için yapılan tüm faaliyetler ise altyapı çalışmaları olarak adlandırılır. Altyapı, bir yolun temel taşıyıcı bölümünü meydana getirir.(Abbasgil,1994) Hizmet kalitesi ve kullanım ömrü açısından üstyapı kadar kritik öneme sahip olmasına rağmen, altyapıya bakım yapmak çoğu zaman daha güçtür. Özellikle demiryolu sistemlerinde altyapının niteliği, hattın tamamının performansını doğrudan etkiler. Üstyapıda belirlenen iki ray aralığı, altyapının şekillenişine; onu meydana getiren sanat yapılarının (örneğin tüneller, köprüler, gabari alanları vb.) boyutlarına; yol geometrisine ve maliyetine doğrudan etki eder. Altyapılarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri oturma ve kabarma olaylarıdır. Bu tür deformasyonlar, altyapının beklenen süre boyunca istenilen fonksiyonu yerine getirmesini engelleyerek sistemin genel verimini düşürür. (Ekin, 2007,)

Bir altyapı sistemi; sanat yapıları, yarma ve dolgu gibi toprak işlerinden meydana gelir. Ulaştırma yapısının hizmet ömrü boyunca, bu altyapının düzenli olarak izlenmesi, bakımının yapılması ve dış etkenlerden korunması büyük önem taşır. Altyapı, yolun temel taşıyıcı bileşenidir; üstyapıdan gelen yükleri kalıcı deformasyonlara yol açmadan güvenli bir şekilde karşılamalı ve bu yükleri geniş bir alan üzerinden doğal zemine aktarmalıdır. Bunun yanında altyapı, ulaşım yapısının konumunu belirleyen ana unsurdur ve yolu çevresel etkilerden koruma işlevi görür. Ancak genellikle üstyapının altında yer aldığı için, denetim ve bakım faaliyetleri çoğu zaman ihmal edilir.(Abbasgil.1994)

Oysa bir yolun hizmet kalitesi ve dayanıklılığı, yalnızca üstyapının değil, aynı zamanda altyapının kalitesi ve korunma koşullarına da doğrudan bağlıdır.

Yol altyapısının üst kısmında yer alan özel tabaka, belirli bir enine eğime sahip olup özel olarak oluşturulmuştur. Bu tabakanın yapısı, farklı demiryolu sistemlerinde

çeşitli biçimlerde tanımlanabilir; örneğin, iyileştirilmiş zemin tabakası veya dışarıdan getirilen yüksek kaliteli dolgu malzemesi şeklinde olabilir. (Sevil,2018).Altyapının bulunduğu bölgede yeraltı su seviyesi yüksekse, bu durum altyapı performansını olumsuz etkiler. Bu nedenle, yeraltı su seviyesinin yol kenarı hendekleri veya derin drenaj sistemleri aracılığıyla belli bir düzeye kadar düşürülmesi gerekir. Ayrıca, yağış sularının yol yüzeyinden ve çevresinden hızlıca uzaklaştırılması, suyun altyapıya sızmasını önlemek açısından son derece önemlidir. (Sevil, 2018)

Tablo 2.1: Altyapı işleri ve altyapı türleri(Erel,2008)

ALTYAPI İŞİ	ALTYAPI TÜRÜ
Arazi düzeyini, zemini kazıp uzaklaştırarak düşürme.	Yarma
Arazi düzeyini, üzerine zemin doldurma ve sıkıştırma ile yükseltme.	Dolgu
Dolgu ve yarma şevlerinin korunması.	Çimlendirme,ağaçlandırma, ankraj, kaplama, vb.
Dolguda şev eteğinin, yarmada şev kretinin korunması.	Blokaj, pere, istinat duvarı vb.
Yüzeysel ve yeraltı sularının uzaklaştırılması.	Drenaj tesisleri
Yolun durgun sular ve akarsular üzerinden geçilmesi.	Köprü
Küçük akarsuların dolgu altından geçirilmesi	Büzler ve Menfezler
Doğal zeminin delinerek, içinden yol geçirilmesi.	Tünel
Yolun vadilerin üzerinden geçirilmesi.	Viyadük
Yol yüzeyinin kardan korunması.	Paranej
Doğal zeminin iyileştirilmesi CFG yöntemi, bağlayıcı katkı malzemeleri, asfalt beton.	Altyapı tesislerinin sürekli denetimi, bakımı,onarımı ve korunması.

2.1.1. Demiryolu Altyapısının Sınıflandırılması

UIC (Uluslararası Demiryolu Birliği) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, altyapının **mekanik davranışı** mikroskobik düzeyde aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

- **S3 sınıfı:** Düşük oturma değerlerine sahip olup tren yüklerini son derece iyi taşıyabilen altyapı türüdür.
- **S2 sınıfı:** Orta düzeyde oturma davranışı gösteren ve tren yüklerini yeterli düzeyde taşıyabilen altyapı tipidir.
- **S1 sınıfı:** Görece yüksek oturma miktarına sahip, ancak yük taşıma kapasitesi sınırlı olan altyapıdır.
- **S0 sınıfı:** Aşırı oturmaların görüldüğü, yük taşıma kapasitesi zayıf altyapı türüdür.
- Yukarıdaki sınıfların dışında, yüksek dayanım özelliklerine sahip kaya zeminli altyapılar da ayrıca R sınıfı olarak tanımlanmaktadır.
- Bu sınıflandırmada temel belirleyiciler, zeminin jeoteknik özellikleri ve hidrojeolojik koşullarıdır. Dolayısıyla UIC standartlarına göre önerilen altyapı sınıflandırması (Tablo 2.2’de görüldüğü üzere), bu parametrelere dayanmaktadır. Sınıflandırmada kullanılan referans kriterleri arasında, ince agrega oranı, plastisite indeksi (PI) ile Los Angeles ve Deval aşınma katsayıları yer almaktadır.(*Profillidis,1995,*)

Tablo 2.2: Altyapı işleri ve altyapı türleri. (Erel,2008)

Zeminin jeoteknik sınıflandırması	Hidrojeol ejik durumu	Demiryolu altyapı kalitesi
Düşük geçirgenli kaya	-	R
Orta geçirgenli kaya (kuru Deval >9, Los Angeles ≤ 30) ince tanecikli zemin < 5%	-	S₃
Yüksek geçirgenli kaya (6 < kuru Deval < 9, Los Angeles < 33) Düzgün dağılılı ince malzemeli kum < 5% İnce tanecikli toprak 5- 15%	İyi	S₃
	Kötü	S₂
Şilt PI > 7 Siltli kum PI > 7 İnce tanecikli toprak 15- 40% Kırma taş Deval < 6 ve Los Angeles > 33	İyi	S₂
	Kötü	S₁
Silt, kısmi plastikince tanecikli toprak > 40%	-	S₁
Organik toprak	-	S₀

Kategori So tipi zeminler, demiryolu hattının inşası için uygun özellikler taşımaz. Bu tür zeminler aşırı miktarda oturma eğilimi gösterir, homojen olmayan bir yapıya sahiptir ve fiziksel özellikleri zamanla değişiklik gösterebilir. Bu durum, balast tabakasının zemine gömülmesine ve taşıma kapasitesinin azalmasına yol açar.

Yeni bir demiryolu hattı planlanırken, organik içerikli zeminlerden mümkün olduğunca kaçınılmalı veya bu zeminler uygun dolgu malzemeleriyle değiştirilmelidir. Ancak, bu tür zeminlerin tamamen önlenemediği ve hattın organik tabakalardan geçmek zorunda olduğu durumlarda, özellikle yüksek dolgularda meydana gelebilecek oturmalar dikkatle izlenmelidir. (Aydın, Kuşkapan & Çodur, 2021)

Zemin stabilitesini artırmak için, balast ve balast altı tabakalarının kalınlığının artırılması, ayrıca jeotekstil malzemelerin kullanılması gibi zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmalıdır.

2.1.2. Altyapının Mekanik Karakteristikleri

Zeminin temel görevi, balast ve balast altı tabakaları tarafından belirli ölçüde azaltılan tren yüklerini taşımaktır. Bu yüklerin güvenli bir şekilde iletilmesi için zeminin belirli mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir.

O.R.E tarafından gerçekleştirilen bir dizi deney sonucunda, U.I.C. standartları kapsamında her bir zemin sınıfı için elastisite modülü aralıkları belirlenmiştir (Şekil 2.2). Kayalık zeminlerde, elastisite modülünün değeri kaya malzemesinin doğal yapısına göre değişkenlik göstermektedir. R sınıfı altyapılar için elastisite modülü yaklaşık olarak 3104 kg/cm² civarındadır. (Laman, Yıldız, Örnek & Demir, 2008)

Altyapı sınıflandırmasında yalnızca elastisite modülünün belirlenmesi yeterli değildir; bunun yanı sıra zeminin taşıma kapasitesi değerlerinin de tespit edilmesi gerekmektedir. , farklı altyapı zemin sınıflarına karşılık gelen CBR (California Bearing Ratio) değerleri görülmektedir.

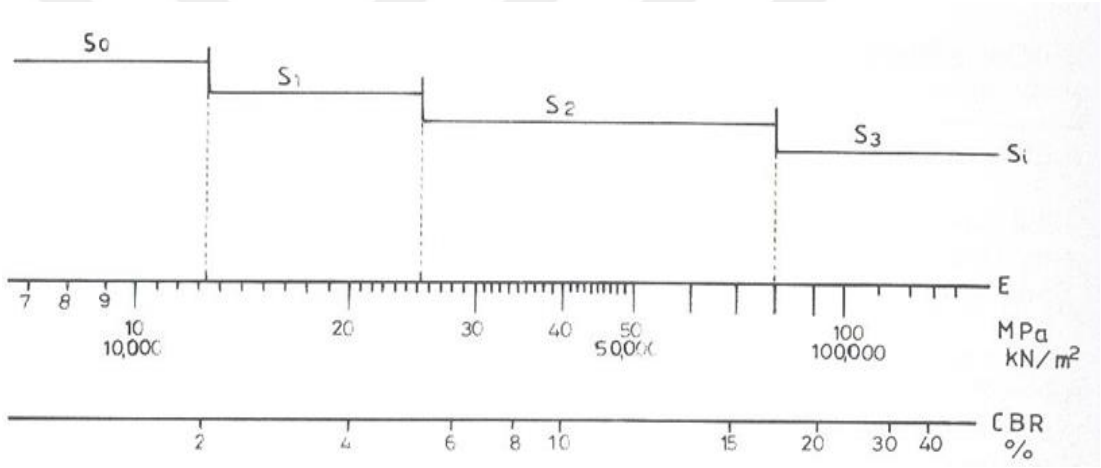
2.2. Raylı Sistemlerin Üstyapı Teknik Özellikleri

Demiryolu taşıtlarının üzerinde hareket ettiği yuvarlanma yüzeyi, tekerleklerden gelen yükleri altyapıya aktaran ve yolun her iki yanında paralel şekilde uzanan raylardan oluşur. Bu raylar, belirli aralıklarla yerleştirilen traversler aracılığıyla

altyapı üzerinde sabitlenir. Böylece, altyapının üzerinde yer alan üstyapı tabakası, yük aktarımını sağlayan temel bileşen olarak görev yapar. (Berke,1972)

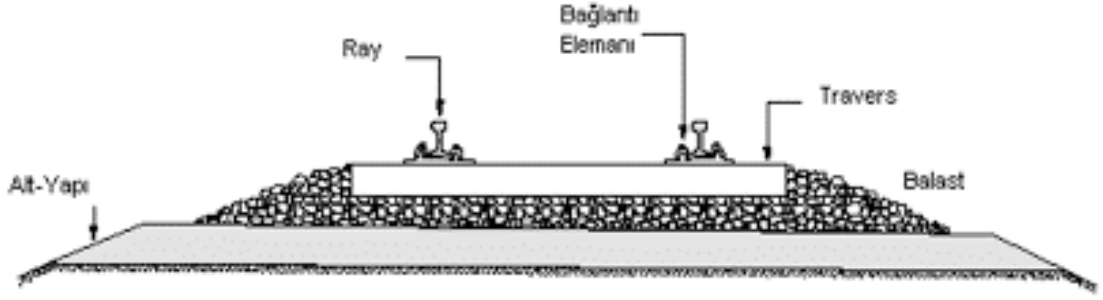
Üstyapının temel görevleri şunlardır:

- Pürüzsüz ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Araçlardan gelen yükleri güvenli bir şekilde altyapıya iletmek,
- Yeterli esneklik göstermek,
- Kullanılan malzemelerin hızlı ve kolay şekilde yenilenebilmesini sağlamak,
- Uzun ömürlü ve dayanıklı olmak,
- Doğal ve çevresel etkileri altyapıya sorunsuz biçimde iletebilmek.



Şekil 2.1. Farklı zemin sınıflarına karşılık gelen CBR indeksleri (Profillidis 1995)

Günümüzde dünya genelinde kullanılan demiryolu üstyapıları genellikle balastlı sistemlerdir. Bu sistemlerde raylar; balast tabakası üzerine yerleştirilmiş ahşap, çelik veya betonarme traversler tarafından taşınır. Balastlı üstyapı; balast tabakası, subbalast (balast altı) tabakası, traversler, çelik raylar ve bağlantı elemanlarından oluşur. (Arslan, 2019)



Görsel 11 : Balastlı üstyapı (Sanal Şantiye)

Balastlı üstyapı sistemleri, yapım, bakım ve onarım açısından sundukları kolaylıklar ile düşük maliyetleri sayesinde, gelecekte de uzun yıllar boyunca kullanılmaya devam edecek sistemler arasında yer almaktadır. Ancak, rijit (balastsız) üstyapılar ilk yatırım maliyeti yüksek ve daha nitelikli iş gücü gerektiren sistemler olmasına rağmen, kullanım ömrü balastlı sistemlere göre daha uzundur. Ayrıca, bakım ve onarım için harcanan zaman ve maliyet de oldukça düşüktür. Bu durum, özellikle günümüzde giderek artan trafik yoğunluğu altında bakım ve yenileme çalışmalarının yürütülmesini kolaylaştırmakta ve önemli bir avantaj sağlamaktadır.(Arslan,2019)

Klasik demiryolu üstyapısı şu temel bileşenlerden oluşur:

- Raylar
- Traversler
- Bağlantı elemanları
- Balast tabakası

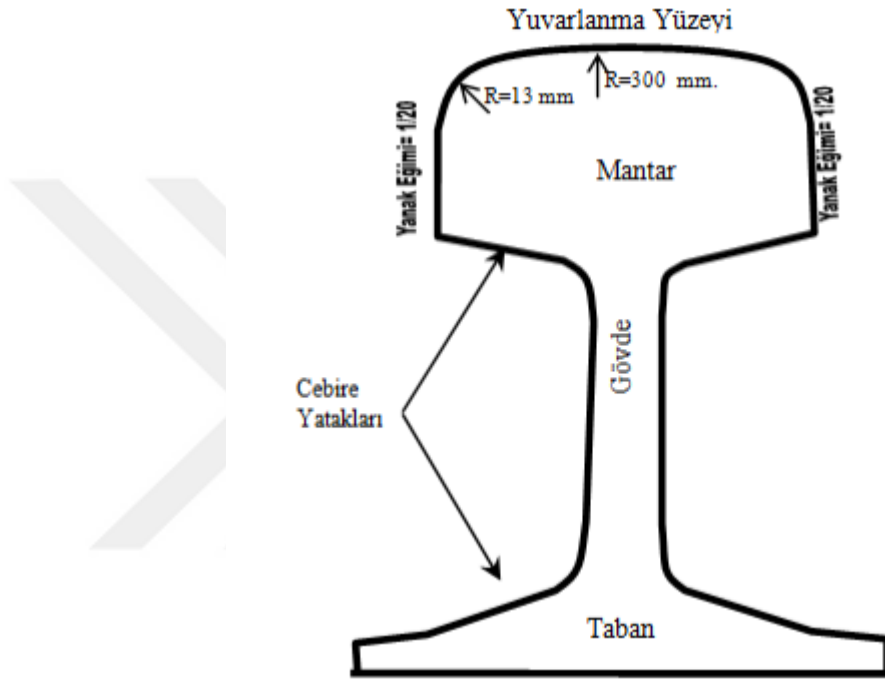
(Not: Betonarme hatlarda travers ve balast yerine betonarme plaklar kullanılmaktadır.)

2.2.1 Ray

Ray, demiryolu araçlarının tekerlekleriyle doğrudan temas eden, bu tekerleklerle yuvarlanma yüzeyi sağlayan üstyapı elemanıdır. Yüksek mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı çelikten imal edilir ve özel bir kesit profiline sahiptir. (Berke,1972)

Bir ray üç ana bölümden oluşur:

- Mantar: Tekerleğin üzerinde yuvarlandığı üst kısımdır. Ray-teker uyumunun sağlanabilmesi için belirli geometrik açı verilmiştir.
- Gövde: Rayın orta kısmıdır; mantarı taban bölümüne bağlar ve yük aktarımında önemli rol oynar.
- Taban: Rayın alt kısmını oluşturur; traversler veya bağlantı elemanları üzerine oturur ve yükün zemine iletilmesini sağlar. (Bkz. Şekil 2.2.)



Şekil 2.2. Demiryolu Rayının Bölümleri (MEB,2013)

2.2.2 Ray Profillerinin Özellikleri

- Rayın üzerinde taşıt tekerleklerinin hareket ettiği yüzey, **yeterince geniş** olmalı ve tekerlek–ray teması sonucu oluşan **yüzey basıncını en aza indirecek** şekilde tasarlanmalıdır.
- **Uzun hizmet ömrü** sağlamak amacıyla, ray başı yüksekliği **aşınmalara karşı dayanıklı** olacak biçimde seçilmelidir.
- **Ray gövdesi**, yük taşıma kapasitesi ve **esneme dayanımı** açısından yeterli kalınlıkta olmalıdır.

- **Taban kısmı**, yüksek **stabilite** sağlayacak ve **traverslere iletilen yüzey basıncını** minimumda tutacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Rayın **kesit modülü**, hem **dikey** hem de **yatay yükler** karşısında optimum performans gösterecek şekilde belirlenmelidir.
- **Geçiş bölgeleri**, gerilme akışının düzenli olabilmesi için **uygun yarıçap değerlerine** sahip olmalıdır.
- Rayın **yüksekliği** ve **taban genişliği**, yeterli **eğilme direnci** sunacak biçimde tasarlanmalıdır.
- Statik denge açısından, rayın **ağırlık merkezi**, genel olarak **ray yüksekliğinin yaklaşık yarısında** yer almalıdır.

Başlıca ray türleri şunlardır:

- Oluklu raylar
- Gömülü tasarım rayları
- Vinyol (tek mantarlı) raylar
- Çift mantarlı raylar

2.2.2.1. Oluklu Raylar

Oluklu raylar, genellikle hemzemin tramvay hatlarında kullanılmaktadır. Bu ray tipinde, oluk bölümü zemine gömülüdür ve ray mantarı ile dış zemin arasında bir boşluk oluşturarak, tekerleğin çevresel etkilerden korunmasını sağlar. Böylece tekerlek, zeminle temas etmeden yalnızca ray mantarı üzerinde yuvarlanır. (Evren & Dündar, 2016)

Ayrıca, demiryolu ile karayolunun kesiştiği bölgelerde de oluklu raylar tercih edilir. BoStrab standardına göre, oluk derinliği en az 13 mm olmalıdır. Eğer budaen ucu yarıçapı 3 mm'den büyükse, bu fark kadar oluk derinliği artırılmalıdır. Oluk genişliği ise düz kesimlerde maksimum 45 mm, kurplarda ise 60 mm değerini geçmemelidir.



Şekil 2. 3. Oluklu Ray(MEB,2013)

2.2.2.2. Gömülü Tasarım Rayı

Gömülü tasarım rayları, özellikle zeminle aynı seviyede inşa edilen tramvay hatlarında kullanılan ray türleridir. (Görsel 12)'de görüldüğü üzere, bu ray tipinde ray doğrudan beton içerisine gömülüdür. Bu nedenle, geleneksel raylarda bulunan taban ve gövde bölümleri bu tasarımda yer almaz. (Evren & Dünder, 2016)

Görece yeni bir sistem olan bu ray tipinde, yük aktarımı klasik raylarda olduğu gibi tabandan değil, doğrudan ray mantarından zemine gerçekleşir.



Görsel 12: Gömülü Dizayn Ray(Vikipedia)

2.2.2.3. Vinyol Raylar (Tek Mantar Raylar)

Bu ray türü ilk kez 1832 yılında Amerikalı mühendis Stevens tarafından geliştirilmiştir; ancak geniş çapta kullanımı sağlayan ve tasarımın yaygınlaşmasına öncülük eden İngiliz mühendis Vignoles olduğu için, ray tipi onun ismiyle

anılmaktadır. Günümüzde hem Türkiye’de hem de dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan ray tipidir. (Evren & Dünder, 2016)

İlk geliştirilen profillerin ağırlığı 25 kg/m’nin altındaydı; ancak dingil yüklerinin ve taşıt hızlarının artması ile birlikte bakım masraflarını azaltmak amacıyla rayların birim ağırlıkları 40, 50, 60 ve hatta 70 kg/m seviyelerine kadar yükselmiştir.

Aşağıda bazı yaygın ray tiplerinin kesit alanı, birim kütlesi, mukavemet momenti ve eğilme rijitliği gibi temel mekanik özellikleri verilmiştir:

Tablo 2.3. Rayların Mekanik Özellikleri

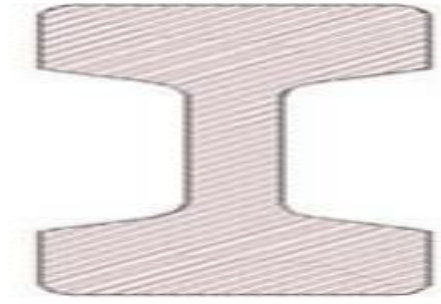
Ray Tipi	Kesit Alanı (mm ²)	Kütle (kg/m)	Mukavemet Momenti (cm ³)	Atalet Momenti (x10 ⁻⁸ m ⁴)	Eğilme Rijitliği (x10 ⁶ Nm ²)	Kesme Faktörü (γ)
S49	6297	49.43	248	1819	3.82	1.33
S54	6948	54.54	276	2073	4.35	1.29
UIC54	6934	54.43	313	2127	4.93	1.14
UIC60	7687	60.34	377	3055	6.42	0.97
BS113A	7183	56.39	278	2349	4.90	1.18

2.2.2.4. Çift Mantar Raylar

Bu ray tiplerinde hem üstte hem altta birer mantar bölümü bulunur ve bu nedenle simetrik bir kesit yapısına sahiptirler (Şekil3.4.). Çift mantarlı rayların tasarlanma amacı, üst mantar aşındığında rayın ters çevrilerek alt mantarın yuvarlanma yüzeyi olarak kullanılabilmesidir. (Evren & Dünder, 2016)

Ancak zamanla yapılan gözlemler, aşınma ve korozyonun sadece üst mantarda değil alt kısımda da meydana geldiğini göstermiştir. Bu nedenle alt mantarın yeniden kullanılabilirliği azalmış ve bu ray tipi işlevselliğini yitirmiştir.

Son olarak İngiltere’de kullanılan bu ray türü, 1938 yılında tamamen terk edilmiştir. Günümüzde yalnızca Fransa’nın bazı ikincil hatlarında sınırlı ölçüde kullanılmaktadır. (Evren & Dünder, 2016)



Şekil 2. 4. Çift mantarlı ray

2.2.3.Rayların İşaretlenmesi ve Taşınması

Rayların ilk üretildiği dönemlerde standart uzunluk 12 metre idi. Ancak, bu uzunluk iki dingilli araçların dingil aralığına yakın olduğundan, ray ek yerlerinde (contalarda) ön ve arka dingillerin eş zamanlı darbeler oluşturması nedeniyle olumsuzluklar yaşanmıştır.

Günümüzde bu sorun, rayların kaynakla birleştirilmesi yöntemiyle ortadan kaldırılmış ve böylece uzun kaynaklı raylar (UKR) üretilmeye başlanmıştır. Modern üretimde en yaygın kullanılan ray uzunlukları 18, 24, 30 ve 36 metre olmakla birlikte, 60 metrelik raylar standart hale gelmiştir. Bazı özel durumlarda 120 metreye kadar ray üretimi de yapılabilmektedir.(Berke,1972)

Uzun rayların sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- Daha düşük maliyetli üretim ve bakım,
- Taşıma araçlarına daha fazla sayıda ray yüklenebilmesi,
- Yükleme ve boşaltma işlemlerinde zaman tasarrufu,
- Gerilme, nötrleştirme ve kaynak işlemlerinde yüksek verimlilik,
- Arazide daha hızlı montaj ve iş süreci,
- Daha yüksek ürün kalitesi ve hizmet ömrü



Görsel 13: Ray

Rayların teknik özelliklerinin tespiti amacıyla, haddelenme süreci sırasında ray gövdesine belirli işaretler işlenir. Bu işaretleme işlemi, EN 13674-1 standardı tarafından tanımlanan kurallar çerçevesinde gerçekleştirilir. Çeşitli ray tiplerine ait değerler (Tablo 2.4.)’te verilmiştir.

Tablo 2.4. Ray Etiketleme Sistemi(Kardemir A.Ş.,2023)

Ray Tipi	Standart Kodu	Çelik Sınıfı / Sertlik	Üretici Etiket	Isıl İşlem Bilgisi	Ağırlık (kg/m)	Üretim Standardı	Etiketleme Örneği
S49	EN 13674-1	R260	KARDEMİR	Normal	49.39	EN 13674-1	S49 R260 KARDEMİR 2022 LOT 12A
UIC 54 (54E1)	EN 13674-1	R260 / R320Cr	VOESTALPINE	HT (Head Hardened)	54.43	EN 13674-1	54E1 R320Cr HT VAE 2023-05
UIC 60 (60E1)	EN 13674-1 / UIC 860-0	R350HT	TATA STEEL	HT	60.21	UIC 860-0	60E1 R350HT HT TATA 2023 LOT B21
AREMA 136 RE	AREMA Standard	1080 MPa min	NIPPON STEEL	Normal	67.6	AREMA 2021	136RE R1080 NSC 2021-11
BS 113A	BS 11:1985	R260	BRITISH STEEL	Normal	50.6	BS 11:1985	BS113A R260 BSI 2020
TCDD 49E1	TSI / EN uyumlu	R260	KARDEMİR	Normal	49.39	EN 13674-1	49E1 R260 TR-KAR 2023
Grooved Rail (Ri60N)	EN 14811	R290GHT	ARCELORMITTA	HT	60	EN 14811	Ri60N R290GHT HT AM 2022-07
Crane Rail (A120)	DIN 536	R340	ANHUI	Normal	119.9	DIN 536	A120 R340 ANHUI 2021

2.2.4.Travers (Ray Yatak Elemanları)

Travers, rayların üzerine oturduğu ve balast tabakası içerisinde yer alan bir üstyapı elemanıdır. Tekerlek yüklerini yayarak altyapıya iletir, ray açıklığını (ekartmanı) sabit tutar ve taşıtın güvenli hareketini sağlar. (Berke,1972)

Traverslerin temel görevleri şunlardır:

- Raydan gelen yüklerin dengeli şekilde dağıtılması,
- Ekartmanın korunması,
- Rayların traverslere 1/20 veya 1/40 eğimle monte edilerek teker bandajlarının doğru şekilde oturmasının sağlanması,
- Yatay ve düşey kuvvetlere karşı yeterli dayanımın temin edilmesi.

Kullanılan traversler;

- Yüksek aşınma direncine,
- Yeterli elastikiyete,
- Kırılma ve ezilme dayanımına,
- Çevresel koşullara karşı dirençli bir yapıya sahip olmalı,
- Ekonomik, hafif ve kolay monte edilebilir nitelikte olmalıdır.

Ayrıca elektriksel yalıtım sağlamalı ve bakım sırasında fazla işgücü gerektirmemelidir.

2.2.4.1. Ahşap Traversler

Tarihsel olarak en yaygın kullanılan travers türü ahşap traverslerdir. Bu traversler genellikle meşe, kayın veya tropik ağaç türlerinden üretilir. Kaliteli bir ahşap traversin üzerinde budak, düğüm veya eğrilik bulunmamalıdır. Dış etkenlere karşı dayanıklılığını artırmak için ahşap traversler kreozot yağıyla emprenye edilir. Ortalama kullanım ömürleri 20–25 yıl civarındadır. (Bozkurt,1989)

Ahşap traverslerin avantajları:

- Hafif olmaları,
- Elektriksel olarak yalıtkan özellik göstermeleri,
- Kolay işlenebilir ve elastik olmaları,
- Arızalı durumda hızlı değiştirilebilmeleri.

Dezavantajları ise:

- Yüksek maliyetli olmaları,
- Beton traverslere kıyasla daha çabuk deformasyona uğramaları,
- Çevresel faktörlerden (nem, sıcaklık, böcek vb.) kolay etkilenmeleridir

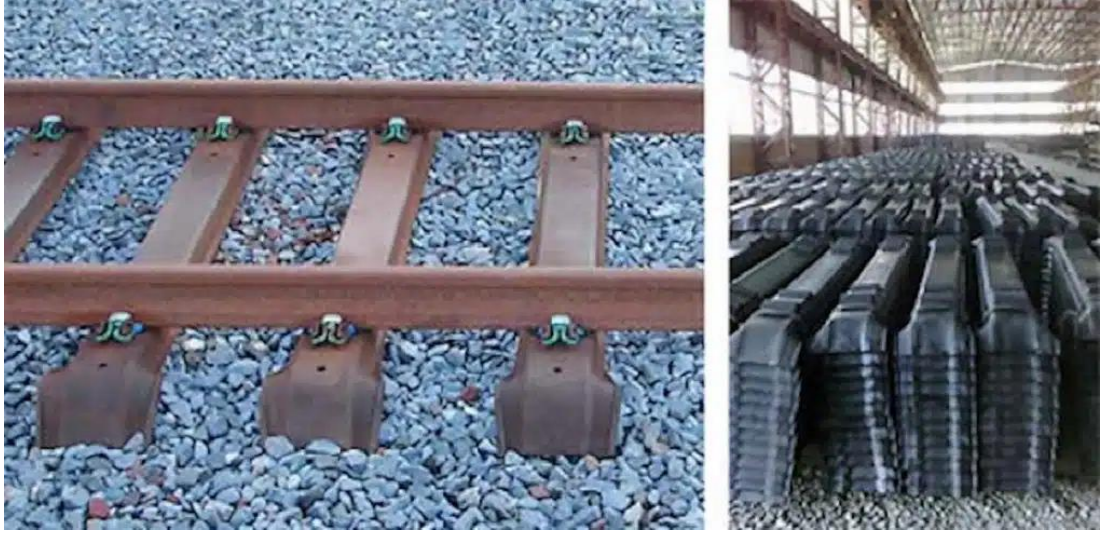


Görsel 14: Ahşap travers(Vikipedi)

2.2.4.2.Demir Traversler

Demiryolu ulaşımının hızla geliştiği ilk dönemlerde, ahşap traverslerin yerini çelik traversler almaya başlamıştır. Bu traversler genellikle yumuşak çelik malzemeden üretilmiştir. Ancak, hafif olmalarına rağmen bakım zorlukları, yetersiz elektrik yalıtımı ve yüksek gürültü seviyesi gibi dezavantajları nedeniyle günümüzde kullanımları oldukça azalmıştır. (Berke,1972)

Çelik traverslerin en önemli sorunlarından biri korozyon (paslanma) problemidir. Özellikle nemli iklim koşullarında oksitlenme sonucu hızla bozulurlar ve kullanım ömürleri kısalmır. Ancak kuru iklime sahip, iyi balastlanmış ve düşük trafikli hatlarda çelik traverslerin ömrü yaklaşık 50 yıla kadar ulaşabilmektedir. (Bozkurt,1989)



Görsel 15: Çelik travers(Sanal Şantiye,2021)

2.2.4.3.Betonarme Traversler

Demiryolu hatlarında ilk kullanılan travers türü ahşap traverslerdir. Ancak, ahşabın pahalı oluşu ve çevresel etkilere karşı dayanıksızlığı nedeniyle zamanla çelik traversler tercih edilmiştir. Beton teknolojisindeki gelişmelerin sonucunda ise, 1950’li yıllardan itibaren betonarme traversler kullanılmaya başlanmış ve günümüzde makas (değişim) bölgelerinde dahi yaygın hale gelmiştir. (Berke,1972)

Betonarme traverslerin avantajları şunlardır:

- Çevresel koşullara karşı yüksek dayanıklılık,
- Uzun ömür ve düşük bakım ihtiyacı,
- Plastik dübeller sayesinde kolay onarım,
- Daha iyi yol stabilitesi ve güvenliği,
- Uygun maliyet-performans oranı.

Bununla birlikte, çatlama durumunda tamir edilememeleri, ilk üretim maliyetlerinin yüksek olması ve bakım sırasında değişimlerinin zor olması en önemli dezavantajlarıdır.

Beton traversler genel olarak iki ana tipe ayrılır:

- İkiz bloklu donatılı beton traversler,

- Monoblok ön germeli veya art germeli beton traversler



Görsel 16: Beton travers çeşitleri(Sanal Şantiye,2021)

2.2.5. Bağlantı Elemanları

Bağlantı elemanları, rayları traverslere, çelik seletlere veya birbirine sabitleyen demiryolu bileşenleridir. Bu elemanlar, ray açıklığını (ekartmanı) ve ray eğimini koruyarak hattın geometrik bütünlüğünü sağlar. Ayrıca raydan gelen yüklerin traverslere güvenli biçimde iletilmesini, titreşimlerin azaltılmasını ve yol stabilitesinin korunmasını temin ederler. (Bozkurt,1989)

İyi bir bağlantı elemanının sahip olması gereken başlıca özellikler şunlardır:

- Montaj ve bakım kolaylığı (sökülüp takılabilir olma),
- Yalıtkanlık özelliği sayesinde elektriksel izolasyon sağlama,
- Yeterli esneklik ile dinamik yükleri sönmüleme,
- Aşınma ve korozyona karşı direnç,
- İç gerilmelere izin vermeyecek dayanım,
- Ekonomik maliyet ve çevresel etkilere karşı dayanıklılık.

Demiryolu hatlarında kullanılan bağlantı elemanları üç temel grupta incelenir:

- Rijit bağlantı elemanları,
- Elastik bağlantı elemanları,
- Cebireler (ray uçlarını birbirine bağlayan bağlantı parçaları).

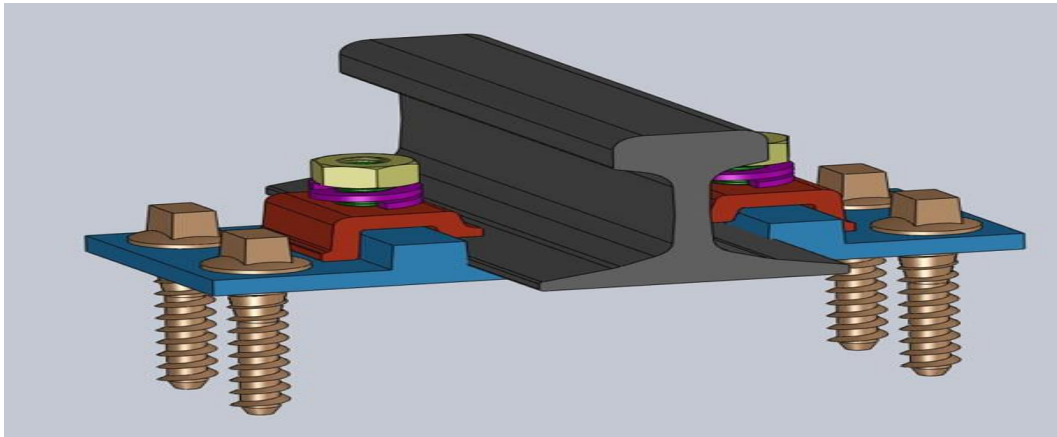
2.2.5.1.Rijit Bağlantı Elemanları

Rijit bağlantı sistemleri genellikle ahşap veya çelik traverslerde kullanılır. Bu bağlantılar, bulon veya çivi yardımıyla traverse sabitlenir. Tren geçişi sırasında raylar travers üzerine bastığında plastik deformasyon meydana gelir; bu da yük geçtikten sonra ray ile çivi başı arasında boşluk oluşmasına yol açar. Sürekli geçen tren yükleri bu boşluğu artırarak bağlantının gevşemesine (laçkalaşmasına) ve yol güvenliğinin azalmasına neden olabilir. (Özalp,2008)

Ayrıca, yüksek frekanslı titreşimler bu boşluğu genişleterek bağlantı elemanlarının gevşemesini hızlandırır. Rijit bağlantılar, seletli veya seletsiz olarak uygulanabilir:

- Seletsiz bağlantılarda, raylar doğrudan traverslere tirfon veya krampon çivisi ile sabitlenir.
- Seletli bağlantılarda ise, ray ile travers arasına dökme demirden yapılmış selet yerleştirilir ve bağlantı yine tirfon veya krampon çivileriyle yapılır.

Bu sistem, bağlantının ömrünü uzatarak titreşimlerin sönümlenmesini ve daha kararlı bir hat geometrisinin korunmasını sağlar (Görsel 17).



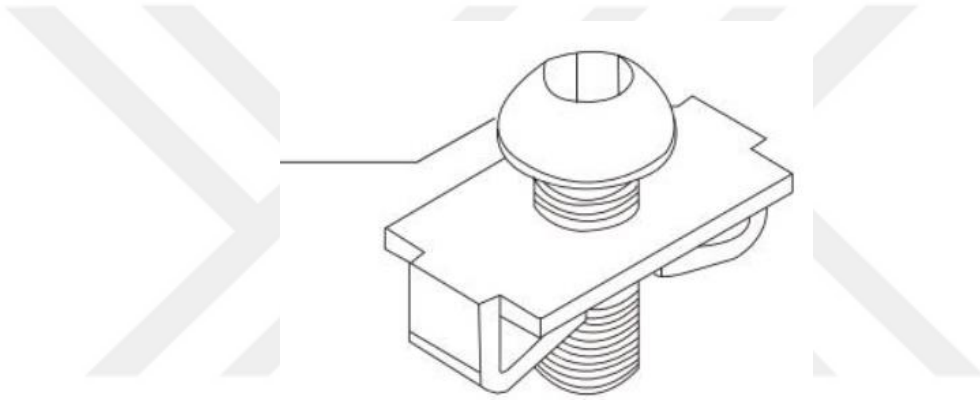
Görsel 17: Rijit bağlantı elemanı. (Rail-Fastener.com)

2.2.5.2.Elastik Bağlantı Elemanları

Beton traverslerde elastik bağlantı sistemlerinin kullanılması zorunludur. Bununla birlikte, ahşap ve metal traverslerde de bu tür bağlantılar tercih edilebilir. Elastik bağlantılar genel olarak iki tipe ayrılır:

Cıvatalı tip:

Bu bağlantı türünün en önemli avantajları, bakım ve değiştirme işlemlerinin kolay olması ile yüksek germe kuvveti sağlamasıdır. Ancak montajın düzgün bir şekilde yapılması, çevresel koşullara bağlıdır. Bu tip bağlantılara örnek olarak RN, Nabla, Vossloh ve benzeri sistemler verilebilir (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Cıvata tipli elastik bağlantı(Made-in China.com)

2.2.5.3. Cıvatalı Tip Elastik Bağlantıların Ortak Elemanları

- **Somunlu eleman (a):** Yay elemanına kuvvet uygulayarak sistemin sabitlenmesini sağlar ve gerektiğinde travers üzerinden çıkarılabilir.
- **Çelik yay elemanı (b):** Çubuk veya plaka formunda olabilir; ray ile travers arasında oluşan titreşim ve darbeleri sönümleme görevini üstlenir.
- **Elastik ped (c):** Ray ve travers arasında yer alır; darbeleri azaltır, elastik bir temas yüzeyi oluşturur ve elektriksel yalıtım sağlar.

- **İzole eleman (d):** Raydan gelen elektrik akımının metal temas yoluyla traverslere geçmesini engeller.



Görsel 18: Cıvata tipli elastik bağlantı çeşitleri(calenberg-ingenieure.com)

2.2.5.4. Yay Tipli Elastik Bağlantı Elemanları

Traverslere monte edilen bağlantı elemanları, üretim aşamasında traversle bütünleşik biçimde de imal edilebilir. Çelik yaylı eleman, ray tabanına belirli bir germe kuvveti uygulayarak sistemin sabitlenmesini sağlar. Ray ve travers arasına yerleştirilen elastik ped, titreşimleri ve darbeleri sönmüleyerek hem konforu artırır hem de sistem ömrünü uzatır. İzolasyon elemanı ya da izole tabakası ise ray ile travers arasında elastik bir ara tabaka oluşturur ve aynı zamanda elektriksel yalıtım işlevi görür. Bu sayede, raydan metal bağlantı elemanları aracılığıyla traverslere elektrik akımının geçmesi engellenmiş olur. (Bozkurt,1989)



Görsel 19: Yay tipli elastik bağlantı (Rail-Fastener.com)

Demiryolu hattında, araç geçişleri sırasında elastik bağlantıların taşıdığı kuvvetlerin, balastlı hattın boyuna direnç kuvvetinden yüksek olması gerekir. Bu, ray ile travers arasındaki kayma direncinin güvenli seviyede kalmasını sağlar. Ayrıca bağlantı sisteminin rezonans frekansı, rayın rezonans frekansından daha yüksek olmalı; uzun süre boyunca yeterli bağlantı kuvvetini koruyabilmeli ve bağlantının gevşemesi demontaj yapılmadan da tespit edilebilmelidir. Montajdan sonra uzun süre geçse bile sistem elastikiyetini kaybetmemeli, ray tabanına uygulanan kuvvetin traverslere iletilen kuvvete oranı mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır. (Özalp,2008)

2.2.5.5.Cebireler

Ray uçlarını birbirine bağlayan parçalara cebire adı verilir (Görsel 20). Cebireler, ray türüne ve kullanım koşullarına göre yumuşak çelikten veya özel profil malzemeden imal edilir. Ray gövdesine açılan delik sayısına göre 4 veya 6 delikli olarak üretilirler. Montaj sırasında cebireler ray gövdesine tam oturmaz; genellikle 5–6 mm’lik bir açıklık bırakılarak bağlanırlar. Bu boşluk, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan genleşmelere izin verir. (Bozkurt,1989)

Cebire bağlantılarında, rayın genleşebilmesi için cebire bulon delikleri ile ray delikleri farklı çaplarda açılır. Cebirelerin periyodik bakımı da oldukça önemlidir; her 2–3 yılda bir sökülerek yüzeyleri tel fırça ile temizlenmeli, kaliteli bir yağ ile yağlanarak yeniden monte edilmelidir.

İki ray ucu arasına, sıcaklık etkisiyle oluşabilecek boy değişimlerine imkân tanımak amacıyla belirli bir dilatasyon payı bırakılır. Günümüzde, geçmişte oldukça yaygın olan cebireli bağlantı sistemlerinin yerini, gelişen teknolojiyle birlikte kaynaklı ray bağlantıları almıştır. (Bozkurt,1989)



Görsel 20: Cebire bağlantısı(esnmetal.com)

2.2.6. Balast

Demiryolu üstyapısında, tekerleklerden raylara iletilen düşey ve yatay yüklerin traversler aracılığıyla alt tabakalara aktarılmasını sağlayan ve traverslerin yer aldığı yatak malzemesine balast, bu malzemenin oluşturduğu tabakaya ise balast tabakası adı verilir.

Balast; genellikle bazalt, granit, diyorit, dolomit veya andezit gibi dayanıklı kayaların konkasörlerle kırılması sonucu elde edilen, 30 mm’lik elekten geçmeyen ve 60 mm’lik elekten geçen kırmataşlardan oluşur. Bu malzeme hem yük aktarımı hem de yol geometrisinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. (Arslan, 2019)

İyi nitelikte bir balastın taşınması gereken temel özellikler şu şekilde özetlenebilir:

- Temiz, homojen ve topraktan arındırılmış olmalıdır.
- Su emme oranı düşük, donma-çözülme döngülerine ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olmalıdır.
- Basınç, darbe ve aşınma etkilerine karşı yüksek mukavemet göstermelidir.
- Hem elle hem de makineli buraj işlemleri sırasında darbeye dayanıklı olmalıdır.
- Traverslerin yanal ve boyuna kaymasını önleyecek biçimde keskin kenarlı, köşeli ve kübik şekilli olmalıdır.

- Yol boyunca yeterli miktarda ve homojen dağılımda bulunmalıdır.

Balast tabakası kalınlığı, ülkelere göre farklılık göstermektedir. Günümüzde birçok gelişmiş demiryolu sisteminde bu kalınlık yaklaşık 50 cm'ye ulaşmıştır. Türkiye'de ise genellikle 30–40 cm aralığında uygulanmaktadır.

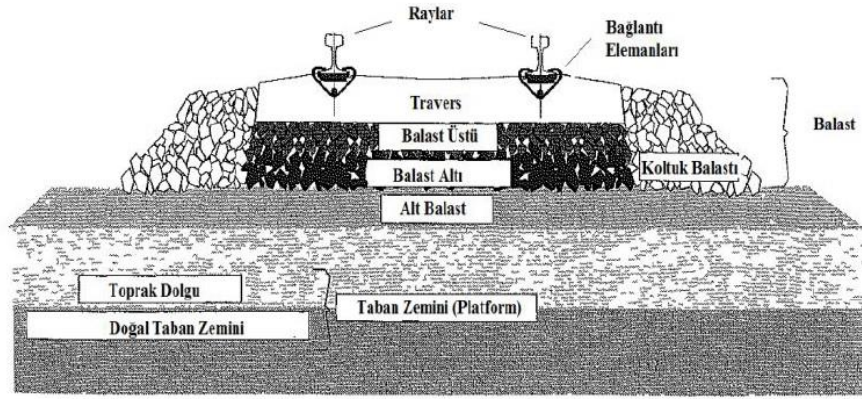
Balast tabakasının başlıca görevleri şu şekilde sıralanabilir:

- Platformu don etkilerinden korumak,
- Üstyapıya elastikiyet kazandırmak,
- Traverslerden gelen yükü yayarak ve azaltarak platforma iletmek,
- Yağmur ve kar sularını drene ederek altyapının kuru kalmasını sağlamak,
- Traverslerin doğrudan toprakla temasını önleyip çürümesini engellemek,
- Yolda meydana gelen oturmaları veya düşüklükleri dengelemek,
- Yol geometrisinin ve stabilitesinin korunmasına katkı sağlamak,
- Yol dresajı ve şev stabilitesini koruyarak deformasyonları önlemek,
- Bitki örtüsünün yol yatağında oluşmasını engellemek.

Balast malzemesi üretiminde kullanılan taşlar genellikle bazalt, granit, diyabaz, diyorit, kuvarsit ve trafir gibi dayanıklı kaya türleridir. Bu taşlar konkasörlerde kırılarak, 3–6 cm çap aralığında sınıflandırılır. Yani, balast taneleri 3 cm'lik elekten geçmemeli ve 6 cm'lik elekten geçebilmelidir.

Balastın yüzey özellikleri de büyük önem taşır. Travers altındaki sürtünme direncini artırmak için balastın keskin kenarlı, köşeli ve kübik biçimli olması gerekir. Ayrıca, malzeme aşınmaya karşı dayanıklı, organik madde içermeyen, homojen, su emme oranı düşük ve donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklı olmalıdır.

Balast, yola döşenmeden önce —özellikle tünel kesimlerinde— yıkanarak içerisindeki toz ve ince partiküllerden arındırılmalıdır. Bu işlem, drenajın sürekliliğini sağlarken, yolun uzun ömürlü ve stabil kalmasına da katkıda bulunur.



Şekil 2.6. Balast tabakası(INSAPEDIA)

2.2.6.1. Balastsız (Betona Tespitli) Üstyapı

Balastsız (betona tespitli) üstyapı sistemi, geleneksel balast tabakası yerine beton, betonarme veya asfalt gibi daha rijit ve şekil değiştirmeye karşı dayanıklı taşıyıcı tabakaların kullanıldığı bir demiryolu üstyapı türüdür. Bu sistemde taşıyıcı tabaka asfalt veya beton malzemeden oluşabilir. Rijit üstyapılarda gerekli elastikiyet, ray ile travers arasında veya traversin altında yer alan elastik ara tabakalar yardımıyla sağlanır (Erel, 2002). Bu tür üstyapılar Almanya’da Feste Fahrbahn, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri’nde ise Slab Track, Ballastless Track ya da Direct Fixation Track adlarıyla bilinmektedir. Ancak, yüksek ilk yatırım maliyetleri, bu sistemlerin geniş ölçekte yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Buna karşın, tünel ve köprü gibi alanlarda, bakım ve erişim kolaylıkları nedeniyle balastsız üstyapı sistemleri önemli avantajlar sağlamaktadır. (TCDD,2013)

Geliştirilen modern inşaat yöntemleri sayesinde, bu tür hatların yapım maliyetleri günümüzde daha da azaltılabilmektedir. Balastsız sistemlerin temel özellikleri, gevşek bağlantılara sahip balastlı hatlarda yetersiz kalan yük iletimini daha rijit bir taşıyıcı tabaka aracılığıyla gerçekleştirmesi ve sistem elastikliğini ray tabanı veya travers altına yerleştirilen elastik elemanlarla sağlamasıdır (TCDD,2013)

Dünya genelinde kullanılan belli başlı balastsız hat sistemleri aşağıda listelenmiştir:

- Rheda, Züblin ve benzeri sistemler (Almanya)

- Stedef ve Sonneville düşük titreşimli sistemleri (Fransa)
- Walo sistemi (İsviçre)
- Edilon blok hat ve gömülü ray sistemleri (Hollanda)
- Shinkansen döşeme hattı (Japonya, Güney Kore)
- IPA hattı (İtalya)
- ÖBB–Por sistemi (Avusturya)

Balastsız sistemlerde, özellikle köprü ve tünel gibi yapılarda raylar doğrudan beton yüzeye sabitlenir. Balast tabakasının eksikliğinden kaynaklanan esneklik kaybını dengelemek amacıyla, sisteme ilave elastik tabakalar eklenir. Bu esnekliği sağlamak için genellikle ray altına kalınlaştırılmış ray pedleri veya gömülü ray sistemleri, travers ya da beton blok altına ise ikincil elastik tabakalar yerleştirilir.

Bu yaklaşım, araçlardaki birincil ve ikincil süspansiyon sistemine benzer biçimde, iki kütleli yay sistemi prensibini etkin bir şekilde uygular. Hem ray altına hem de travers altına elastik tabaka yerleştirilmesiyle, sistemin dinamik davranışı iyileştirilir. Bu konuda Delft Teknik Üniversitesi, farklı sistem tiplerinin dinamik özellikleri üzerine kapsamlı araştırmalar yürütmektedir (Esveld, 2001).

Balastsız Hatların Avantajları ve Dezavantajları

Balastsız (betona tespitli) hatlar, geleneksel balastlı hatlarla karşılaştırıldığında yüksek stabilite, düşük bakım gereksinimi ve uzun servis ömrü gibi önemli üstünlüklere sahiptir. (Berke,1972) Özellikle yüksek hızlı tren hatları ve şehir içi raylı sistemlerde tercih edilmelerinin temel nedenleri bu avantajlardır.

Balastsız hatların başlıca avantajları şunlardır:

- Hat ömrü boyunca bakım maliyetleri, balastlı hatlara kıyasla oldukça düşüktür.
- Balastlı hatlarda gerekli olan buraj, tesviye, takviye ve temizlik işlemleri gerektirmez.
- Sistem ömrü, balastlı üstyapıya göre daha uzundur.

- Üstyapı elemanlarının deformasyonu durumunda, yenileme ve onarım işlemleri kolaylıkla yapılabilir.
- Yüksek hızlı hatlarda, balastlı sistemlerde görülen balast fırlaması (ballast flight) problemi ortadan kalkar.
- İlave önlemler gerektirmeden elektromanyetik ray freni kullanılabilir.
- Farklı hız ve yükteki trenlerin aynı hatta çalıştığı durumlarda deformasyon oranı daha düşüktür; bu da güvenlik katsayısını artırır.
- Düşey yönde 26 mm, yatay yönde 5 mm'ye kadar küçük deformasyonlar sınırlandırılabilir.
- Üstyapı kesit yüksekliği ve ağırlığı, balastlı hatlara kıyasla daha azdır.
 - Örneğin, İstanbul LRT hattında balastlı kesim yüksekliği 1 m, balastsız kesim yüksekliği ise 0,80 m'dir.
 - Ağırlık bakımından balastlı yol 5,5 t/m, balastsız yol ise 4,9 t/m'dir.
- İşletme sırasında betona tespitli hatlara ek statik yük binmez.

Balastsız hatların dezavantajları ise şunlardır:

- Balast yerine beton kullanıldığı için ilk yatırım maliyeti oldukça yüksektir.
- Sistem, balastlı yollara göre daha rijit bir yapıya sahiptir.
- Hat üzerinde gürültü seviyesi daha yüksektir.
- Hattın geometrisinde değişiklik yapmak veya yüksek dever uygulamak zordur.
- Alt yapıda meydana gelen zemin deplasmanlarına uyum sağlayamaz.
- Hasar veya deformasyon durumunda onarım işlemleri daha uzun sürer.

Günümüzde balastsız hat sistemleri, özellikle yüksek hızlı tren hatlarında, metro ve hafif raylı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, uzun ömür, düşük bakım maliyeti ve yüksek geometrik kararlılık özellikleri nedeniyle modern demiryolu altyapılarında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. (Berke,1972)

Tablo 2.5. Uygulanan balastsız hatların burulma rijitlikleri (Anonim)

BALASTSIZ HAT SİSTEMLERİ	Burkulma rijitliği	
	Düşük	Yüksek
Travers veya blok betona gömülü	←→	→
Traversler asfalt yatağın üstünde	←→	
Prefabrike beton plak	←→	→
Tek parça yerinde dökülen plak	←→	→
Gömülü ray	←→	→
Kenetlenmiş ve sürekli raya sabit	←→	→

2.2.6.2. Balastsız Üstyapı Sistemleri

Düşük burkulma rijitliğine sahip balastsız hat sistemlerinde, taşıyıcı performans tamamen zeminin taşıma gücü ve rijitliğine bağlıdır. Prefabrik elemanlardan oluşturulan veya yerinde beton dökülerek inşa edilen bu tür hatlarda, üstyapı zamanla bükülme momentlerine maruz kalabilir. Özellikle yumuşak zeminlerde, sistemin stabilitesini artırmak amacıyla burkulma rijitliği genellikle öngerilmeli beton elemanlar kullanılarak sağlanır. (Berke,1972)

Balastsız üstyapılar, döşeme biçimlerine göre iki temel gruba ayrılmaktadır: mesnetli döşeme sistemi ve sürekli döşeme sistemi.

2.2.6.2.1 Mesnetli Döşeme Sistemi

Mesnetli döşeme sisteminde, ray tabanları genellikle 0,50–0,80 m (ortalama 0,65 m) aralıklarla yerleştirilmiş sabit mesnetlere oturtulur. Bu mesnetler, iki parçalı bağlantı elemanlarıyla ve ayarlanabilir yaylı sistemlerle alttaki taşıma tabakasına bağlanır. Böylece ray, belirli bir elastikiyet içinde sabitlenmiş olur. (Evren &Dündar, 1996)

2.2.6.2.2 Sürekli Döşeme Sistemi

Sürekli döşeme sisteminde ise raylar, beton taşıyıcı tabaka üzerine yol eksenine doğrultusunda kesintisiz biçimde yerleştirilir. Raylar, genellikle beton veya bazı özel durumlarda çelikten imal edilen paralel iki kirişin içinde oluşturulan oluklarda, doğal veya sentetik kauçuk yataklar üzerine monte edilir. (Evren & Dündar, 1996) Bu sistemin iki temel uygulama türü bulunmaktadır:

1. Rayların doğrudan oluk içine gömüldüğü gömülü ray sistemleri,
2. Rayların elastik malzeme üzerine sabitlendiği yüzer ray sistemleri.

2.2.6.2.2 Beton Traversli Balastsız Üstyapı Sistemi

Bu tür üstyapı sistemlerinde, prefabrik beton traversler, taşıyıcı beton plaka üzerine ya elastik bağlantılar aracılığıyla ya da rijit (sıkı) biçimde sabitlenir. Elastik bağlantılı sistemlerde, traverslerin altına lastik sömeller (kauçuk tabanlar) yerleştirilerek elastikiyet sağlanır. (Arlı, 2019)

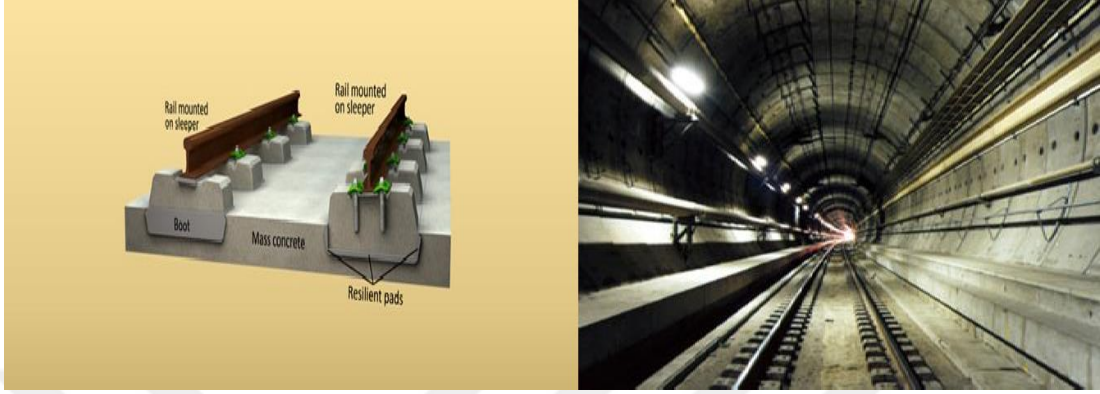
Genellikle sistemin elastiklik katsayısı 20–30 kN/mm arasında olacak şekilde tasarlanır. Ray ile travers arasına, elastikiyeti daha düşük olan selet pedleri eklenerek titreşim ve darbe emilimi optimize edilir.

Balastsız üstyapılarda kullanılan traverslerin taşıyıcı tabaka üzerine serbest biçimde yerleştirilmesi ya da beton içerisine gömülmesi, montaj kolaylığı ve hat geometrisinin doğruluğunu artırır. Bu yöntem, özellikle yüksek hızlı demiryolu hatlarında, ray açıklığı ve eğim toleranslarının hassas biçimde korunmasına olanak tanır (Arlı, 2019).

2.2.6.2.3 Bloklü Betona Tespit Sistemi

Bu sistemde, geleneksel traversler yerine beton bloklar kullanılır (Görsel 21). Bloklar, taşıyıcı beton tabaka üzerine sabitlenir ve hattın yanal stabilitesini artırmak amacıyla tabaka içine U biçiminde donatılar yerleştirilir.

Bloklu sistemler; İsviçre, Manş Tüneli ve Madrid Metro Tüneli gibi altyapı projelerinde başarıyla uygulanmıştır. Bu sistemlerde deray (raydan çıkma) riskini azaltmak için genellikle konray raylar kullanılmaktadır.



Görsel 21: Bloklu betona tespit sistemi bölümleri

2.2.6.2.4 İkiz Bloklu Stedef Sistemi

İkiz bloklu Stedef sistemi, ikiz blok traverslerin taşıyıcı beton tabaka içerisine gömülmesiyle oluşturulan bir balastsız üstyapı türüdür. Bu sistem, Fransa kökenli olup günümüzde çeşitli ülkelerde metro ve tünel hatlarında başarıyla uygulanmaktadır. Sistemde kullanılan traversler, kısmen elastomer yastıklarla donatılmış lastik botlar içerisine yerleştirilir. Bu botların çevresi, lastik kılıflarla (çizmelerle) sarılarak traverslerin, taşıyıcı beton tabaka üzerinde kayma veya yer değiştirme yapması engellenir. Traverslerin üst kısmı ile ray tabanı arasında konumlandırılan lastik seletler, balastlı sistemlerde olduğu gibi yüksek frekanslı titreşimleri sönmüleyecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemdeki düşük frekanslı titreşimlerin azaltılması ise, nitrojen gazı ile doldurulmuş küçük hücrelerden oluşan ve beton travers bloklarının altına yerleştirilen elastomer hava yastıkları aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sayede hem titreşim izolasyonu artırılmakta hem de hat konforu iyileştirilmektedir. (Berke,1972). Raylar, traversler üzerine döşendikten sonra bağlantı elemanları yardımıyla sabitlenir (Görsel 22). Hat geometrisinin doğruluğu için eksen ve kot ayarları yapıldıktan sonra, ince agrega içeren akışkan kıvamlı beton, traversleri çevreleyen lastik torbaların üst seviyesine kadar doldurulur. İkiz bloklu Stedef sistemi, yüksek doğruluk gerektiren metro ve tünel hatları için uygun bir çözümdür. Türkiye’de bu sistem, Taksim – 4.

Levent metro hattında uygulanmıştır. Ayrıca Fransa, İsviçre, Seul (Güney Kore) ve San Diego (ABD) gibi şehirlerdeki metro ve tünel projelerinde de kullanılmaktadır



Görsel 22: Stedef sistemi(semanticsscholar.org)

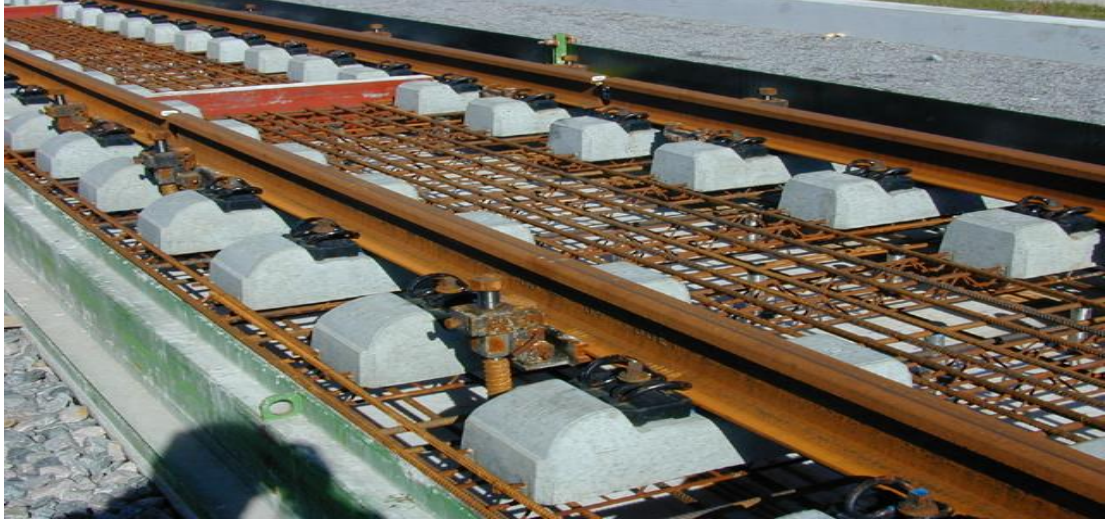
2.2.6.2.5 Rheda Sistemi Uygulama Alanları ve Yapısal Özellikleri

Rheda sistemi, Almanya’da geliştirilmiş bir balastsız üstyapı sistemi olup, ilk olarak 1972 yılında Münih Teknik Üniversitesi tarafından Rheda İstasyonu’nda inşa edilen 850 metrelik deneme hattında uygulanmıştır (Görsel 23).

Sistemin performans değerlendirmesi amacıyla oluşturulan bu test hattı, uzun yıllar boyunca yalnızca ray taşıma işlemi dışında herhangi bir bakım gereksinimi duymadan işletilmiştir. Bu durum, sistemin yüksek dayanım, stabil geometri ve düşük bakım ihtiyacı sunduğunu ortaya koymaktadır. (Evren &Dündar, 1996)

Yapılan izleme ve ölçüm çalışmaları sonucunda, 250 km/sa hızlara kadar yapılan yüksek hızlı tren testlerinde, hatta hiçbir geometrik deformasyonun meydana gelmediği belirlenmiştir. Ayrıca ray yüzeyinde ondülasyon (dalgalanma) oluşmadığı da tespit edilmiştir.

Bu veriler, Rheda sisteminin özellikle uzun ömürlü, rijit ve bakım maliyeti düşük bir çözüm olarak etkin bir şekilde kullanılabileceğini yüksek hızlı hatlarda göstermektedir. (Evren &Dündar, 1996)



Görsel 23: Rheda sistemi(Vikipedia)

Rheda sistemi, Rheda istasyonundaki ilk uygulamasının ardından, 2800 metrelik çift hatlı Sengeberg Tüneli'nde de başarıyla uygulanmıştır. Bu projede kullanılan sistemde, sağlam zemin üzerine betonarme bir yatak oluşturulmuş ve bu yatak üzerine ön germeli veya sonradan germeli beton traversler yerleştirilmiştir.

Uygulamanın son aşamasında, traverslerin arasına boyuna yönde çelik donatılar yerleştirilmiş ve ardından sistemin bütünlüğünü sağlamak amacıyla beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Bu donatılar, hattın boyuna rijitliğini ve eksenel dayanımını artırmak üzere tasarlanmıştır. Üstyapının üst kısmında bulunan ve çekme direnci sağlayan ek donatılar ise, traverslerin alt kısımlarında özel olarak bırakılmış deliklerden geçirilmiştir. Böylece sistem, hem yük aktarımı hem de titreşim dayanımı açısından yüksek performans göstermektedir. (Arlı, 2019)

Hat geometrisinin istenen proje değerlerine göre ayarlanabilmesi amacıyla, traverslerin yatay ve düşey konumları, üzerlerine monte edilebilen uzun saplama somunları yardımıyla hassas biçimde düzenlenmektedir (Görsel 24).

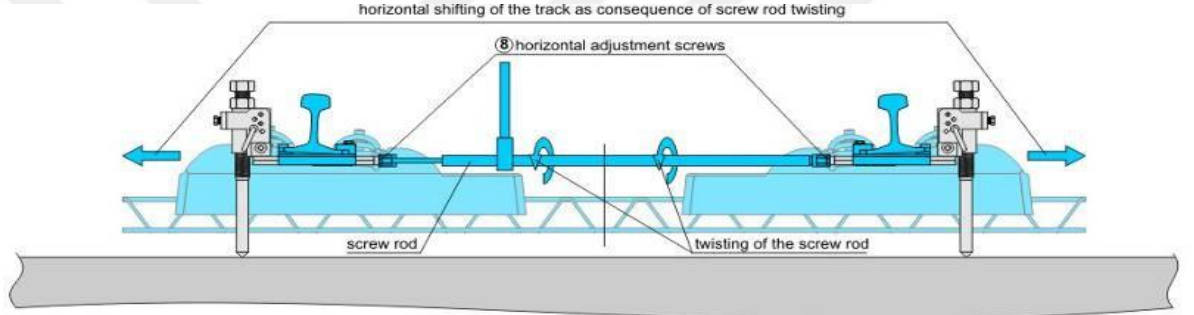
Rheda üstyapı sistemi, günümüzde Alman Demiryolları'nın birçok tüneline ve ayrıca Singapur Metro Sistemi'nde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem, yüksek rijitliği, düşük bakım gereksinimi ve uzun hizmet ömrüyle öne çıkmaktadır. Yapılan mühendislik değerlendirmelerine göre, Rheda sisteminin tasarım ömrü 50 ila 60 yıl arasında tahmin edilmektedir. (Arlı, 2019)



Görsel 24: Rheda sisteminin ayar düzeneği

2.2.6.2.6. Züblin Sistemi

Züblin sistemi, balastsız üstyapı yapımında amaçlanan yüksek kaliteyi koruyarak, betona tespitli yol imalat maliyetini balastlı yol maliyetine yaklaştırmayı hedefleyen bir sistemdir.



Şekil 2.7. Züblin sistemi(Polat,2011)

Sistemin temel yaklaşımı, yol yapım sürecinin mekanize edilmesine dayanır. Öncelikle, alt temel tabakası üzerine yaklaşık 30 cm kalınlığında don koruma betonu serilir. Bu tabakanın üzerine ikiz blok traversler belirlenen hat geometrisine göre yerleştirilir. Ardından traverslerin konumu ve eksenini hassas biçimde ayarlanarak, üzerlerine yaklaşık 28 cm kalınlığında beton tabakası dökülür.

Beton döküm aşamasında çatlak oluşumunu önlemek amacıyla, alt zemin yaklaşık %8–9 oranında takviye edilir ve her 2 metrede bir genişleme boşluğu bırakılır. Döşeme ekipmanları, traversleri kavrayarak özel formüle edilmiş taze beton üzerine belirlenen koordinatlarda titreşim uygular ve malzemeyi sıkıştırır. Titreşim işleminin ardından, ekipman vibrasyonu keserek traverslerin nihai konumda sabit kalmasını sağlar. (Arlı,2019)

Züblin sistemi, yüksek geometrik hassasiyet, mekanik dayanım ve uzun hizmet ömrü hedefleyen modern balastsız hat yapım teknikleri arasında yer almakta; aynı zamanda üretim hızını artırarak maliyetleri optimize etmeyi amaçlamaktadır.

2.2.6.2.7 Asfalt Traversli Üstyapı Sistemi

Asfalt traversli üstyapı sistemi, traverslerin asfalt-beton bir yol yatağı üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulan bir balastsız hat tipidir (Görsel 25). Yol yatağı, genellikle karayolu inşaatında kullanılan asfalt serim makineleri aracılığıyla oluşturulur. Asfalt tabaka, traverslerin altında rijit ve düzgün bir altyapı sağladığından, 2 mm hassasiyetle 180 mm'ye kadar dever (eğim) uygulaması yapılabilmektedir. (Arlı,2019)

Traversler arasındaki boşlukların balast malzemesiyle doldurulması, hem hat stabilitesini artırmakta hem de gürültü seviyesini azaltmaktadır. Ayrıca, asfalt tabaka üzerine gerektiğinde beton plak yerleştirilmesi mümkündür. Asfaltın sertleşme süresi gerektirmemesi, yalnızca soğuma süresinin yeterli olması nedeniyle sistemin yapım süresi oldukça kısadır.

Asfalt malzeme, karayollarında kullanılan geleneksel karışımlardan farklıdır. Karayollarında asfaltın geçirimsizliği ve donma dayanımı öne çıkarken, demiryolu uygulamalarında stabilitesi ve deformasyona karşı direnci ön plandadır. Asfalt, yük değişimleri ve sıcaklık farklarından kaynaklanan gerilmelere uyum sağlayabilen bir malzeme olduğu için, sürekli bir yol yatağı oluşturulmasına olanak verir.

Bu sistemin avantajlarından biri de gürültü ve titreşim düzeylerinin, beton üstyapılara kıyasla oldukça düşük olmasıdır. Ayrıca asfalt, geri dönüştürülebilir bir malzeme olduğundan çevresel sürdürülebilirlik açısından da tercih edilir.

Almanya'da, doğrudan asfalt tabaka üzerine yerleştirilmiş travers ve raylardan oluşan yaklaşık 28.860 metre uzunluğunda bir demiryolu hattı bulunmaktadır. Bu hat, sistemin uzun ömürlü ve ekonomik uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır.

Demiryolu asfalt uygulamaları, karayolu sistemlerinde olduğu gibi ± 2 mm hassasiyetle gerçekleştirilir. Özel karışım teknolojileri sayesinde, aşırı iklim

koşullarında dahi 50–60 yıl arasında hizmet ömrü elde edilmektedir. Ortalama asfalt tabaka kalınlığı 25–30 cm arasında değişmektedir. (Schmidt, 2015)

Sistemde, merkezi bağlantı elemanları yanal kuvvetlere karşı direnç sağlar. Rayların düşey konumları ayarlandıktan sonra, travers ile asfalt yatak arasındaki boşluklar sentetik ve elastik dolgu malzemeleriyle doldurularak sistemin elastik davranışı artırılır.



Görsel 25: Asfalt yataklı üst yapı(Polat,2011)

2.2.6.2.8 Traverssiz Üstyapı Sistemleri

Traverssiz üstyapı sistemleri, demiryolu hattının inşası sırasında rayların doğrudan taşıyıcı beton plaklar veya kirişler üzerine yerleştirildiği, yani travers kullanılmadan gerçekleştirilen bir üstyapı çözümüdür. Bu sistem, özellikle yüksek hızlı tren hatlarında yüksek geometrik stabilite, titreşim azaltımı ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajlar sunar.

Bu prensip, 1972 yılından itibaren Japonya’da Shinkansen hatlarında standart üstyapı yapım yöntemi olarak benimsenmiştir. Shinkansen sisteminde, 5 m uzunluğunda, 2.3 m genişliğinde ve 16 cm kalınlığında, gevşek donatılı prefabrik beton levhalar kullanılmaktadır. Bu levhalar, boyuna ve enine yönde yerleştirilen Ø 40 cm çapında beton silindirlerle sabitlenir ve bu elemanlar taşıyıcı plakla monolitik bir şekilde bütünleşecek biçimde bağlanır. Levhaların altına yaklaşık 4 cm kalınlığında çimento-asfalt harcı uygulanarak rijit bir temas yüzeyi elde edilir. (Ishida, 2008)

Son yıllarda Shinkansen hatlarında levha kalınlığı 19 cm'ye çıkarılmış, boyuna ve enine doğrultuda ön gerilim oranı azaltılmıştır. Ayrıca yerleşim bölgelerinde, gürültü ve titreşim azaltımı amacıyla, levhaların altına yaklaşık 25 mm kalınlığında kauçuk paspaslar yerleştirilmektedir. Bu lastik tabakalar, prefabrikasyon aşamasında beton plakların altına önceden yapıştırılmaktadır.

Shinkansen hatlarının büyük bir kısmı köprüler, viyadükler ve tüneller gibi sanat yapıları üzerinde bulunduğundan, sistemin yatırım maliyeti, geleneksel balastlı üstyapılara kıyasla yaklaşık 1,3–1,5 kat daha yüksek, ancak işletme ve bakım maliyetleri yalnızca %18–33 oranındadır. (Ishida, 2012)

Japonya, yüksek hızlı demiryolu teknolojisinin öncüsü konumundadır. Shinkansen ağının geliştirilmesine 1950'li yılların sonunda başlanmış ve Tokyo–Osaka hattı 1964 yılında hizmete açılmıştır. Günümüzde beş hat işletmede olup, altıncı hat yapım aşamasındadır. 1970 öncesinde devletin hedefi, 3.500 km uzunluğunda çift hatlı demiryolu ağı kurmaktır; 1993 yılına gelindiğinde bunun 1.400 km'si tamamlanmış, 1.000 km'den fazlası balastsız hat sistemi olarak inşa edilmiştir. Japonya'daki balastsız hatların tamamı 5 metreden kısa prefabrik döşeme elemanlarından oluşur. Bu oran yeni hatlarda %96'ya kadar ulaşmıştır. 1972 yılında geliştirilen döşeme tasarımı ise, günümüze kadar esas prensiplerini koruyarak kullanılmaya devam etmektedir. (Tokuda, 2015)

Shinkansen döşeme hattı, çimento ile stabilize edilmiş bir alt tabaka, yatay ve düşey hareketleri sınırlayan silindirik takozlar, ve 4.93 m x 2.34 m x 0.19 m boyutlarında (tünellerde 4.95 m x 2.34 m x 0.16 m) donatılı, ön gerilmeli beton döşemelerden oluşur. Döşemelerin altına ve yanlarına bitümlü çimento harcı enjekte edilerek rijitlik artırılır. Her bir prefabrik döşemenin ortalama ağırlığı yaklaşık 5 ton civarındadır (Görsel 26).



Görsel 26: J-Shinkansen prekast üst yapı (Polat,2011)

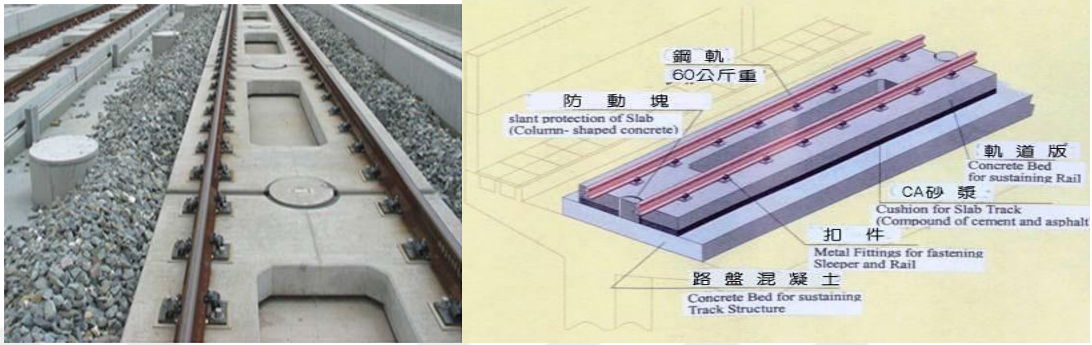
1993 yılı itibarıyla Japonya’da 1.400 km’lik demiryolu ağının 1.000 km’den fazlası balastsız sistemlerle inşa edilmiştir. Bu oran, hat türüne göre değişmekle birlikte yeni yapılan hatlarda yaklaşık %96’ya kadar çıkmaktadır.

Benzer sistemler Güney Kore’de Seul–Pusan yüksek hızlı hattında da uygulanmaktadır. Ayrıca İtalya’da Roma–Floransa arasındaki 5,4 km uzunluğundaki yüksek hızlı hat bu prensibe dayalı olarak inşa edilmiştir. Ancak 1992 itibarıyla İtalya’da balastsız hat uzunluğu 100 km’nin altındadır.

Almanya’da yapılan deneysel uygulamalar, prefabrik plaka altına çimento-asfalt harcı dökümünün yapım zorluğu ve yüksek maliyet oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, alternatif sistemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. (Tokuda, 2015; Smith, 1993; Müller, 1990)

Bu kapsamda, Alman inşaat mühendisliği firması Max Bögl, Rheda ve Züblin sistemlerinde olduğu gibi yerinde beton döküm gerektirmeyen, tamamen prefabrik elemanlara dayalı yeni bir sistem geliştirmiştir. “FF Bögl Sistemi” olarak adlandırılan bu yaklaşım, başarılı saha testlerinin ardından Alman Demiryolları (Deutsche Bahn) tarafından 300 km/sa hıza kadar olan hatlarda kullanılmak üzere onaylanmıştır.

FF Bögl sistemi, birbirine kenetlenen ön döküm beton paneller sayesinde hattın daha kısa sürede işletmeye alınmasını sağlar. Ayrıca, panellerin modüler yapısı, bakım veya onarım gerektiğinde döşemelerin kolaylıkla değiştirilebilmesine olanak tanır. (Max Bögl, 2018; Deutsche Bahn, 2019)



Görsel 27: Bögl prekast üst yapı (Polat, 2011)

2.2.6.2.9 Max Bögl ve FF Bögl Prefabrik Döşeme Üstyapı Sistemi

Alman mühendislik firması Max Bögl, yüksek hızlı demiryolu hatları için geliştirdiği “FF Bögl” adı verilen prefabrik (prekast) döşeme üstyapı sistemi ile balastsız hat teknolojisinde önemli bir yenilik ortaya koymuştur. Bu sistemde, birbirine kenetlenen ön döküm beton paneller kullanılarak, yerinde döküm beton sistemlerine kıyasla hattın işletmeye alınma süresi önemli ölçüde kısaltılmakta ve döşeme elemanlarının değişimi kolaylaştırılmaktadır.

Max Bögl sisteminin ilk uygulaması, 1977 yılında Almanya’nın Karlsfeld bölgesinde, 160 km/sa hız kapasitesine sahip 430 metrelik bir test hattı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu hatta kullanılan ön gerilmeli (öngerilmeli) 4,76 m uzunluğundaki prefabrik beton paneller, boyuna doğrultuda kenetlenme (interlocking) prensibiyle birbirine bağlanmıştır. (Max Bögl, 2018; Deutsche Bahn, 2019)

FF Bögl döşemeleri, 200 mm yüksekliğinde ve 6,45 m uzunluğunda ön gerilmeli beton elemanlar şeklinde üretilmektedir. Üretim sürecinde hattın geometrik ve yapısal özellikleri dikkate alınmakta, gerekli görülen durumlarda ray bağlantı elemanları fabrika ortamında döşemelere önceden monte edilmektedir. Ayrıca, panellere entegre edilen ayar mekanizmaları yardımıyla hattın yatay ve düşey geometrik konumu (ekseni ve kotu) hassas biçimde düzenlenebilmektedir.

Max Bögl firması, bu sistemle bir günde yaklaşık 650 metre uzunluğunda hat imalatının mümkün olduğunu, hattın geometrik ayarları tamamlandıktan yalnızca iki saat sonra işletmeye açılabileceğini bildirmiştir. Gerçekleştirilen saha denemelerinde, günlük 100.000 tonluk trafik yüküne maruz kalan test hattında herhangi bir bakım veya onarım gereksinimi ortaya çıkmadığı rapor edilmiştir.

ÖBB-Porr Sistemi ve Modurail Deney Hattı; Avusturya Federal Demiryolları (ÖBB) tarafından geliştirilen sistemlerde de benzer prensipler uygulanmaktadır. ÖBB'nin özellikle tünel ve viyadüklerde kullandığı yaklaşık 25 km uzunluğundaki balastsız hatlar, Züblin sistemine benzer biçimde kauçuk kılıflar içine yerleştirilmiş gömülü monoblok traversler içermektedir. Bu sistem, hem titreşim sönümlemesi hem de yapısal dayanım açısından yüksek performans göstermektedir.

ÖBB ayrıca, prefabrike döşemelerin kullanıldığı Porr Sistemi adı verilen alternatif bir yapı tipi de geliştirmiştir. Bu sistem, 1992 yılında Wels–Passau hattı arasında “Modurail” test hattı olarak uygulanmıştır. Modurail sisteminde, öngerilmeli traversler, beton döşeme üzerine elastik bir yataklama tabakası aracılığıyla monte edilmiştir .Bu yapı, yüksek hızlarda titreşim ve deformasyon kontrolünü optimize etmeyi amaçlamaktadır. (ÖBB, 1992)



Görsel 28: Porr prekast üst yapı(Polat,2011)

2.2.6.2.10. Gömülü Balastsız Üstyapı Sistemi

Bu tür üstyapı sisteminde, taşıyıcı eleman olarak yaklaşık 0,40 m kalınlığında, donatılı (betonarme) bir beton tabaka kullanılmaktadır. Bu tabaka üzerinde, simetrik

konumlandırılmış ve derzsiz biçimde oluşturulmuş dikdörtgen kesitli iki adet ray yatağı (çukur) yer almaktadır.

Raylar, bu çukurlar içerisine mantar tabanlı bir levha üzerine yerleştirilir ve PVC borular aracılığıyla konumlandırılır. Söz konusu PVC borular, rayların olası yanal deplasmanlarını (kayma veya ötelenme hareketlerini) sınırlayıcı ve sönümleyici bir görev üstlenmektedir.

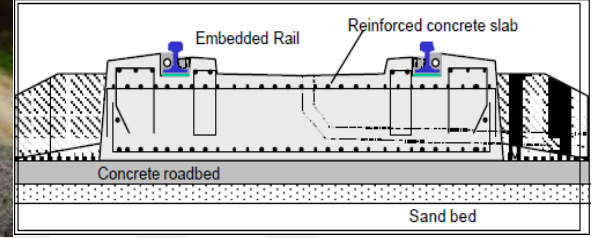
Ray ile beton tabaka arasında kalan boşluklar, yüksek dayanımlı ve elastik özellik gösteren bir dolgu malzemesiyle doldurulmaktadır. Bu elastik dolgu, ray sistemine hem titreşim ve gürültü sönümleme kabiliyeti kazandırmakta hem de sistemin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. (Altenberger & Schütz, 2018)

Her yönden titreşim sönümleyici (damping karakterli) bir yapı sergileyen bu sistem, özellikle gürültü ve titreşime duyarlı çevresel koşullara sahip bölgelerde örneğin kentsel alanlarda, metro hatlarında ve yerleşim içi tünel kesimlerinde tercih edilmektedir (Görsel 29). Edilon sürekli gömülü üstyapı sistemi

Bu yol tipi, ilk olarak 1973 yılında Hollanda'da EDİLON sistemi adıyla geliştirilmiş olup, özellikle tünel ve köprü gibi yapısal ortamlarda başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sistem, daha sonra yapılan teknik iyileştirmeler sonucunda INFUNDO adıyla yeniden tasarlanmış ve bu yeni versiyon tramvay hatları ile şehirler arası demiryolu hatlarında da yüksek verimlilik göstermiştir.

Hollanda'da yaklaşık 10 km uzunluğunda yüksek hızlı hat, çeşitli hafif raylı sistem güzergâhları ve Madrid Metrosu'nun yaklaşık 100 km'lik bölümü bu sistemin önemli uygulama alanlarını oluşturmaktadır.

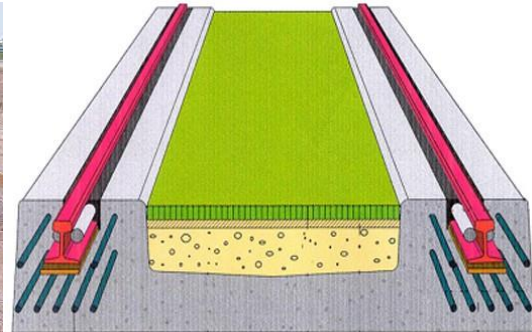
Ayrıca, Almanya’da yapılan çeşitli balastsız üstyapı sistemi denemeleri arasında, EDİLON/INFUNDO tipi sistem performans, dayanım ve bakım gereksinimleri açısından en başarılı sistem olarak değerlendirilmiştir (Görsel 29).



Görsel 29: Yüksek hızlı hatlar için ERC gömülü ray istemi(Polat,2011)

Günümüzde bu tür gömülü ray sistemleri temel alınarak geliştirilen başlıca balastsız üstyapı tipleri arasında SFF, Saarummi ve ERC (Embedded Rail Construction) sistemleri yer almaktadır.

Hollanda Devlet Demiryolları (NS), özellikle ERC tipi balastsız üstyapı sistemi üzerinde yaklaşık 20 yılı aşkın bir işletme ve bakım deneyimine sahiptir. Bu süreçte elde edilen gözlemler ve performans ölçümleri, ERC sisteminin bakım gereksiniminin son derece düşük olduğunu ve uzun vadede ekonomik sürdürülebilirlik sağladığını ortaya koymuştur



Görsel 30: Yüksek hızlı hatlar için ERC gömülü ray sistemi çim hat

2.3 Raylı Sistem Araç Özellikleri

Raylı sistem taşıtları, temel olarak raylar üzerinde tekerlekler aracılığıyla hareket eden ulaşım araçlarıdır. Tekerlek ile ray arasındaki metal temas yüzeyinin düşük sürtünme katsayısı, bu sistemlerde enerji kayıplarının minimum düzeyde olmasını sağlar. Bu özellik sayesinde raylı sistemler, hem Türkiye’de hem de dünya genelinde yük ve yolcu taşımacılığında ekonomik, verimli ve sürdürülebilir bir ulaşım yöntemi olarak yaygın biçimde tercih edilmektedir. (TCDD, 2020)

Raylı sistem taşıtları; kullanım alanı, yolcu kapasitesi, maksimum işletme hızı ve hizmet türü gibi teknik ve işletmecilik kriterlerine göre sınıflandırılabilir. Genel olarak bu taşıtlar; tren, metro, hafif metro, tramvay, monoray ve manyetik levitasyon (maglev) trenleri olmak üzere çeşitli türlere ayrılmaktadır. (TCDD, 2021)

Küresel ölçekte raylı sistemlerde kullanılan taşıt türlerinin dağılımı incelendiğinde, sistemlerin yaklaşık %30’unu hızlı trenler, %28’ini yük vagonları, %26’sını lokomotifler ve %16’sını metro ile hafif raylı sistem taşıtları oluşturmaktadır (Pektaş, 2017).

Şehir içi ulaşım odaklı sistemlerde, tek araçlı veya dizi hâlinde çalışan, karayolu trafiğiyle entegre veya kendine ayrılmış hatlarda hizmet veren raylı araçlar “hafif raylı sistem taşıtları” olarak adlandırılmaktadır. Bu kapsama giren en yaygın örnekler tramvaylar ve hafif metro sistemleridir.

Tramvaylar, genellikle katener hattından alınan 750 V DC enerji ile çalışan hafif raylı sistem araçlarıdır. Ancak bazı uygulamalarda enerji, hat boyunca yer alan üçüncü ray (third rail) sistemi üzerinden sağlanmakta olup, bu durumda katener hattı bulunmamaktadır. Tramvay sistemleri, çoğunlukla şehir içi karayolu trafiğiyle birlikte işletildiğinden, azami işletme hızları diğer raylı sistemlere kıyasla daha düşüktür. (UIC, 2019)

Tasarım aşamasında tramvay araçları genellikle 80 km/sa hıza uygun şekilde üretilmekle birlikte, işletme koşullarında hız sınırı genellikle 50 km/sa civarındadır. Bununla birlikte, tramvayların diğer raylı sistem taşıtlarına göre önemli bir avantajı, alçak tabanlı yapıları sayesinde yükseltilmiş peron gerektirmemeleridir. Bu özellik, erişilebilirlik ve kentsel entegrasyon açısından önemli bir üstünlük sağlamaktadır. Tramvaylarda genellikle basamak yüksekliği 350 mm olacak şekilde bir tasarım standardı benimsenmiştir. Görsel 31’de, Türkiye’nin tramvay aracı gösterilmektedir.



Görsel 31: Kabataş-Bağcılar Tramvayı (Metro İstanbul,2025)

Bir diğer hafif raylı sistem taşıtı türü olan hafif metro araçları, tramvay sistemlerinden farklı olarak tamamen kendilerine ayrılmış, kapalı bir hat altyapısı üzerinde işletilmektedir. Araçların teknik özellikleri bakımından tramvaylarla belirli benzerlikler bulunsa da, bağımsız hat yapısı sayesinde daha yüksek hızlarda ve daha düzenli bir işletme rejimiyle hizmet verebilmektedirler. (UIC, 2019)

Hafif metrolar, yolcu taşıma kapasiteleri açısından tramvaylara kıyasla daha yüksek verimlilik sunmaktadır. Ancak bu sistemlerde kullanılan araçlar yüksek tabanlı olduklarından, istasyonlarda yükseltilmiş peron yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, hat inşa maliyetlerinin tramvay sistemlerine göre önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Görsel 32’de hafif metro aracına ait bir örnek görsel sunulmaktadır. (UIC, 2019)



Görsel 32: M1A Hafif Metrosu (İstanbul, 2022)

2.4. Elektrifikasyon ve Enerji Sistemleri

Bu bölümde, raylı sistemlerde elektrifikasyonun genel yapısı açıklanarak, sistem bütünlüğü içinde pandül bileşenlerini de içeren katener sistemleri ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Raylı sistem elektrifikasyonu, demiryolu hatları üzerinde hareket eden elektrikli araçlara gerekli enerjiyi ileten güç aktarım altyapısı olarak tanımlanabilir. Bu sistemler, buharlı ve dizel tahrikli sistemlere kıyasla yakıt verimliliği, düşük bakım maliyeti, azaltılmış gürültü ve çevresel etkiler ile enerji temininde süreklilik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. (UIC, 2020)

Bir elektrifikasyon sistemi temel olarak; demiryolu hattını besleyen trafo merkezleri, güzergâh boyunca yer alan iletim hatları ve kontrol-kumanda merkezlerinden oluşmaktadır. Enerji temini ve dağıtım yöntemi, hattın kullanım amacına bağlı olarak farklılık gösterir. Kentsel raylı sistemlerde (metro, hafif raylı sistem, tramvay vb.) hat uzunluklarının kısa ve istasyon aralıklarının sık olması nedeniyle doğru akım (DC) sistemleri ile üçüncü ray veya rijit katener sistemleri tercih edilirken; şehirlerarası demiryollarında, uzun mesafe enerji iletimi için daha uygun olan standart katener sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

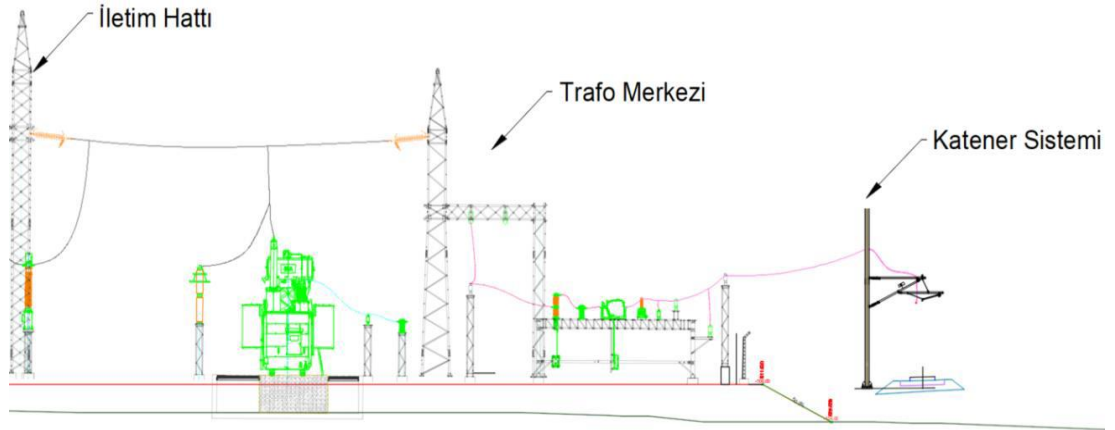
Katener sistemleri, trenlerin pantograf aracılığıyla enerjiyi havai hattan aldığı elektrifikasyon yapılarıdır. Bu sistemlerin önemli bir alt bileşeni olan pandül telleri, katener teli ile taşıyıcı tel arasındaki bağlantıyı sağlayarak, enerji iletiminin

sürekliliğini ve temas stabilitesini güvence altına alır. (UIC, 2020; Siemens Mobility, 2019)

2.4.1. Trafo Merkezleri

Trafo merkezleri, elektrifikasyon sistemlerinde enerji iletim hatlarının düzenli olarak beslenebilmesi için belirli aralıklarla tesis edilen kritik yapılardır. Kentsel raylı sistemlerde, hat uzunluklarının kısa olması ve enerji talebinin görece düşük olması nedeniyle genellikle doğru akım (DC) sistemleri tercih edilir. Buna karşılık, şehirlerarası hatlarda yüksek gerilimli alternatif akım (AC) sistemleri daha uygundur.

Uluslararası standardizasyon kapsamında, temas sisteminden bağımsız olarak en yaygın altı nominal gerilim değeri belirlenmiştir: 600 V DC, 750 V DC, 1500 V DC, 3000 V DC, 15 kV 16.7 Hz AC ve 25 kV 50 Hz AC (Srivastava, Singh & Singhal, 2013). Bu gerilim seviyeleri, trafo merkezlerinde uygun biçimde dönüştürülerek hattın farklı kesimlerine iletilir. Türkiye’de, şehirlerarası demiryolu hatlarında 25 kV 50 Hz AC gerilim seviyesi standart olarak kullanılmaktadır.



Görsel 33: Demiryolu hattı havai hat (Katener) besleme şeması(Polat,2011)

2.4.2. İletim Hatları

Demiryolu araçlarının enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla, güzergâh boyunca kesintisiz şekilde tesis edilen enerji iletim hatları, raylı sistem elektrifikasyonunun temel bileşenlerinden biridir. Bu hatlar, trenlerin enerji kaynağıyla sürekli temasını

sağlayarak hareketin sürekliliğini güvence altına alır. (Srivastava, Singh & Singhal, 2013).

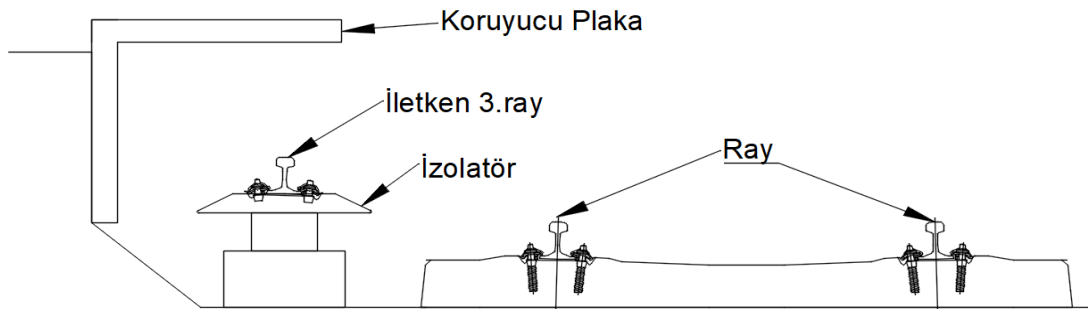
Kentsel demiryolu sistemlerinde, genellikle düşük gerilimli enerji iletimi tercih edilir. Bu sistemlerde trenlerin enerji temini çoğunlukla üçüncü ray (third rail) adı verilen, mevcut iki kılavuz rayın yanına yerleştirilen ek bir ray üzerinden sağlanır. Tren, bu raya temas eden enerji pabuçları aracılığıyla hareket için gerekli enerjiyi alır.

Buna karşın, 1 kV'un üzerindeki gerilimlerle çalışan sistemlerde, yolcu ve personel güvenliğini korumak amacıyla enerji iletimi genellikle havai hatlar (katener sistemleri) aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu sistemlerde trenin pantografı, enerjili iletken teli temas ederek gerekli akımı iletir (Srivastava, Singh & Singhal, 2013).

2.4.3. Üçüncü Ray Sistemleri

Üçüncü ray sistemleri, trenlerin yönlendirme görevini üstlenen iki ana rayın yanı sıra, hattın sağ veya sol tarafına döşenen ek bir iletken ray aracılığıyla enerji iletimini sağlar. Bu ray, belirli aralıklarla kurulan trafo merkezleri tarafından beslenerek hattın enerji taşıyıcısı işlevini üstlenir.

Trenler, lokomotif üzerine monte edilen akım alma pabuçları yardımıyla üçüncü raydan enerji alır. Üçüncü ray, genellikle 2,5 ila 5 metre aralıklarla zemine monte edilmiş izolatörlerle desteklenir. Güvenlik risklerinin azaltılması için bu rayların dış yüzeyleri koruyucu kılıflarla kapatılmıştır; ancak yine de açıkta enerji taşıdıklarından dolayı, yaya erişiminin kısıtlı olduğu metro sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Şekil 2.8 Üçüncü ray sistemi kesiti.)



Şekil 2.8. Üçüncü ray sistemi kesiti(Polat,2011)

2.4.4. Katener Sistemleri

Katener sistemleri, elektrikli lokomotiflerin veya tren setlerinin pantograf aracılığıyla enerji aldığı, havai iletken tellerden ve bunları taşıyan yardımcı elemanlardan oluşan enerji iletim hatlarıdır. Katener sistemleri yapısal özelliklerine göre rijit katener sistemleri ve standart katener sistemleri olarak iki ana gruba ayrılır.

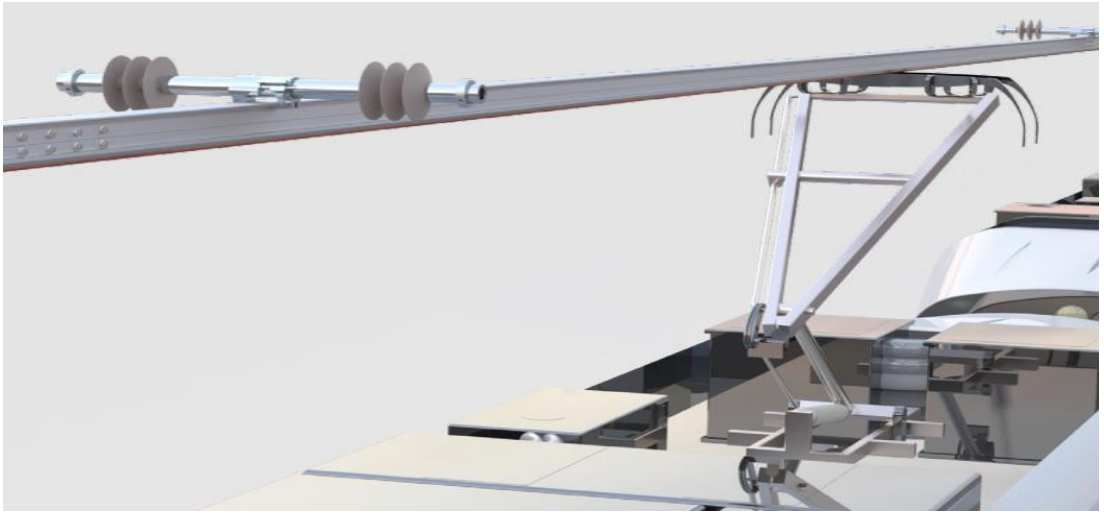
Her iki sistemde de pantograf, tren hızından bağımsız olarak iletken tel ile belirli bir temas kuvveti altında mekanik temas kurar. Elektrik akımı, pantografin sürtünen temas yüzeyi aracılığıyla tren setine iletilir (Zdziebko, Martowicz & Uhl, 2019).

Temas kuvvetinin büyüklüğü kritik bir parametredir: Bu kuvvet, akım yoğunluğunu düşürmeyecek kadar yüksek, aşırı aşınmayı önleyecek kadar düşük ve mümkün olduğunca sabit olmalıdır. Böylece, hem aşınma hem de iletim kalitesi açısından sistemin tasarım sınırları korunur (Bautista, Montesinos & Pintadoa, 2016).

2.4.4.1 Rijit Katener Sistemleri

Rijit katener sistemleri, iletken profil, bu profile entegre edilmiş iletken tel, koruyucu elemanlar ve mesnet izolatörlerinden oluşur. Bu sistemde, tren pantografı rijit yapıya sürekli temas ederek enerji alışverişini sağlar.

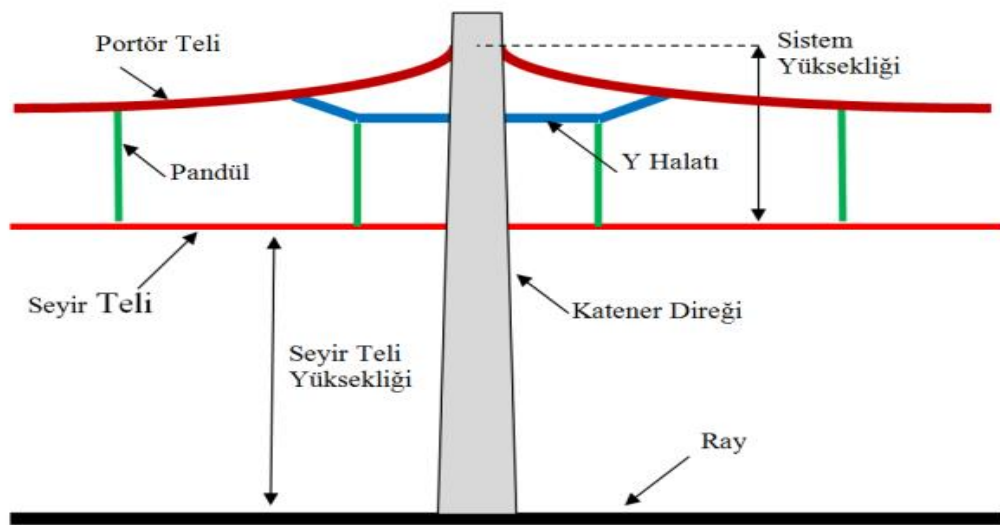
Standart katener sistemlerine göre fiziksel olarak daha kompakt bir yapıya sahip olduklarından, tünel içi uygulamalarda montajı daha kolay ve yatırım maliyeti açısından daha ekonomiktir. Bu nedenlerle rijit katener sistemleri, özellikle metro ve hafif raylı sistem hatlarında tercih edilmektedir.



Görsel 34: Rijit katener sistemi kesiti(Asasalu.com)

Sistemde, seyir teli doğrudan iletken profile bağlandığı için yapısal olarak herhangi bir esneklik bulunmamaktadır. Bu durum, rijit katener sistemlerinde trenlerin yüksek hızlara ulaşmasını sınırlandıran temel etkenlerden biridir. Her ne kadar günümüzde bu sistemlerin yüksek hızlı tren hatlarına uyarlanabilmesi yönünde çalışmalar yürütülse de, rijit katener sistemleri hâlen hız kapasitesi açısından belirli sınırlamalara sahiptir.

2.4.4.2 Standart Katener Sistemleri Standart katener sistemleri, enerji iletimini sağlamak amacıyla demiryolu hattı boyunca belirli aralıklarla tesis edilen destek noktaları (direkler, portallar veya şezler), bu destek elemanlarının ankraj sistemleri ve bunlara asılan katener iletkenlerinden oluşur. Tren setleri, pantografin temas teline sürekli temas etmesi sayesinde enerjilendirilir.



Görsel 35: Standart katener sistemi (Uluskan&Atam,2023)

2.4.5. Katener Direkleri

Katener direkleri, sistem bileşenlerinin istenilen konumda sabitlenmesini sağlamak amacıyla hattın belirli aralıklarına yerleştirilir. Bu aralıklar, her projenin tasarım dokümanlarında yapılan mühendislik hesapları doğrultusunda belirlenir.

Direklerin malzeme türü, projenin gereksinimlerine göre beton veya çelik olarak seçilmektedir. Direk yüksekliği, üzerine monte edilecek donanımların özelliklerine ve hat geometrisine bağlı olarak belirlenir. Tüm yapısal yükler analiz edilerek, direklerin mekanik dayanımı ve stabilitesi mühendislik prensipleri doğrultusunda hesaplanır. (Chattopadhyay & Ashok, 2013).



Görsel 36: Katener Direği(Alfamet.com)

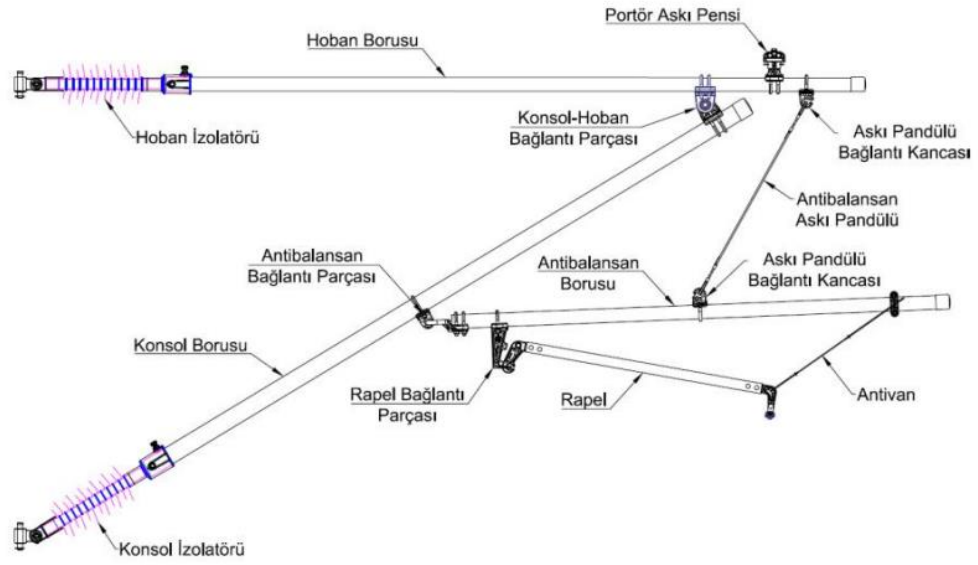
2.4.6. Konsol-Hoban Takımları

Konsol-hoban takımı, katener sisteminde yer alan seyir teli, portör teli, Y halatı ve pandül gibi iletken elemanları taşıyan; bu elemanların istenilen seviyede ve eksende konumlandırılmasını sağlayan, ayrıca katener direklerine sabitlenen mekanik donanımı ifade eder.

Şekil 2.9.'da gösterilen sistemde, portör askı pensine portör teli, rapel ekipmanının ucuna ise seyir teli bağlanmaktadır. Bu şekilde oluşturulan konsol-hoban

takımı, rapel donanımının seyir telini kendine doğru çekmesi nedeniyle “çekiye tip” konsol tasarımı olarak adlandırılmaktadır. (Esveld, 2001)

Seyir telinin yatay düzlemde konum değişikliğine neden olan etkenler ve bunun gerekliliği, ilerleyen bölümlerde “Dezeksman” başlığı altında ayrıntılı biçimde açıklanacaktır.



Şekil 2.9. Konsol-hoban takımı (Uluskan&Atam,2023)

2.4.7. Katener İletkenleri

Katener iletkenleri, destek noktalarına konsol-hoban takımları aracılığıyla sabitlenen ve pantografin geçişine uygun biçimde konumlandırılan, tren setine elektrik enerjisinin iletimini sağlayan genellikle alaşımlı bakırdan imal edilmiş iletken tellerdir. (Özmen, 2014).

Bu iletkenler, kendi ağırlıklarının etkisi ile sarkma eğiliminde olduklarından ve mevsimsel sıcaklık değişimleri nedeniyle genleşme ve büzölmeye maruz kaldıklarından, sistemde mekanik gergi mekanizmaları kullanılarak sürekli bir çekme kuvveti altında tutulurlar (Özmen, 2014).

2.4.8. Seyir Teli Yüksekliği

Seyir telleri, trenlerin hareketi sırasında —özellikle yüksek hızlarda— pantograf ile sürekli temas halinde olduklarından, hattın dinamik kararlılığının korunabilmesi için her noktada aynı yükseklik seviyesinde bulunmaları büyük önem taşır. Bu yüksekliğin sürekliliği sağlanamadığında, özellikle yüksek hızlarda tel salınımları artar ve bu durum mekanik zorlanmalara bağlı olarak tel kopmalarına neden olabilir.

Nominal seyir teli yüksekliği, tasarımda öngörülen en düşük ve en yüksek seyir teli yükseklikleri arasında belirlenir. TS EN 50367 standardında, uluslararası işletilebilirliği sağlamak amacıyla bu yükseklik değerleri için belirli sınırlar tanımlanmış ve hatlar kategorilere ayrılmıştır. (Uluskan, 2023)

Hattın işletme hızına bağlı olarak, kullanılacak seyir teli yüksekliği proje bazında belirlenir. Yükseklik ayarları yapılırken, seyir telinin ray üst kotuna göre mesafesi esas alınarak optimum konumlandırma sağlanır.

2.4.8.1 Seyir Teli Yükseklik Değişimleri

Seyir teli yüksekliklerinin, üst geçit, köprü, tünel veya hemzemin geçit gibi yapısal unsurlar nedeniyle değiştirilmesi gerektiği durumlarda, tel seviyeleri belirli eğim sınırları dâhilinde yükseltilebilir veya alçaltılabilir. Bu işlemler sırasında, katener sisteminin mekanik sürekliliğini ve pantograf temas kalitesini koruyabilmek için destek noktaları arasındaki yükseklik geçiş eğimleri dikkatle tasarlanmalıdır.

Seyir teli yüksekliğinde izin verilen maksimum eğim değerleri, hattın tasarım hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu sınır değerler, TS EN 50119 standardında tanımlanmıştır.

2.4.9. Portör Teli

Seyir tellerinin belirlenen yükseklikte ve konumda sabitlenebilmesi için, bu tellerin üzerine paralel biçimde yerleştirilen portör teli tesis edilir. Portör teli, pandüller aracılığıyla seyir telinin iki destek noktası arasındaki sehimini dengeleyerek, hattın

istenilen yükseklikte tutulmasını sağlar. Taşıyıcı görevinden dolayı bu teller çok damarlı yapıda üretilir. Akım iletim kapasitesini artırmak amacıyla genellikle bakır, bazı durumlarda ise alüminyum iletken tercih edilmektedir.(Srivastava, Singh & Singhal, 2013)

Portör teli kullanılmadığında, demiryolu hattının dinamik davranışı olumsuz yönde etkilenir ve özellikle yüksek hızlı işletmecilik mümkün olmaz. Ayrıca, seyir telindeki sehim artışı nedeniyle askı açıklıkları kısılır ve daha fazla askı noktası tesis edilmesi gerekir. Bununla birlikte, seyir teli sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenir ve sistemin akım taşıma kapasitesi yetersiz kalabilir. (Park, 2017)

2.4.10. Y Halatı

Hattın işletme hızı arttıkça, pantograf ile seyir teli arasındaki dinamik etkileşim de artmaktadır. Bu durum, seyir teli seviyesinin hassasiyetle korunmasını gerektirir. Bu amaçla, her destek noktasında portör telini destekleyen ek bir tel olan Y halatları kullanılır. Y halatları genellikle bakır iletken malzemeden üretilir ve her iki ucundan pandüller aracılığıyla destek noktalarına asılır. (Esveld, 2001)

2.4.11. Pandül

Seyir telinin portör teline bağlanmasını sağlayan ara bağlantı elemanlarına pandül adı verilir. Pandüller, destek noktası sayısını artırmadan hattın esnekliğini iyileştiren elemanlardır (Tan 2019). Seyir teli, pandüller vasıtasıyla istenilen düşey seviyede tutulur. Günümüzde kullanılan pandüller, yalnızca taşıyıcı elemanlar olmanın ötesinde, akım paylaşımını da sağlayan bakır iletken yapılara sahiptir

Pandül setleri, sabit uzunlukta üretilbildiği gibi, ayar cıvataları yardımıyla uzunluğu değiştirilebilen türlerde de temin edilebilir. Pandüllerin geometrisi, katener hattının dinamik karakteristikleri açısından kritik öneme sahiptir. Portör ve seyir telleri, iki direk arasında portör telinin sehiminden dolayı birbirine yaklaştığından, pandül boyları bu noktada en kısa hâlini alır. En kısa pandül boyu, hattın dinamik davranışını doğrudan etkileyen bir parametredir. Siemens'in *Contact Lines for Electric*

Railways adlı eserinde (Kiessling, Puschmann, Schmieder & Schneider, 2009) önerilen değerler Tablo 2.6.'da verilmiştir.

Hız (km/h)	En Küçük Pandül Boyu (mm)
$v \leq 120$	300
$v > 120$	500

Tablo 2.6. Pandül boyu ve hızı

Pandül tasarımında;

- Seyir teli ağırlığı, buz yükleri (mevcutsa), rüzgâr yükleri ve teli oluşturan profilin etkileri,
- Titreşim ve pandül bükülmesinden kaynaklanan dinamik yükler,
- Montaj aşamasındaki mekanik zorlanmalar,
- Komşu pandüllerdeki geçici yük aktarımı,
- Demiryolu hattının yatay ve düşey geometrisi,dikkate alınmalıdır.

TS EN 50119 standardına göre, pandüllerin kullanılmadan önce çeşitli mekanik testlerden geçirilmesi zorunludur. Bu kapsamda, pandüller işletme koşullarını simüle eden bir test düzeneğinde, her biri bir pantograf geçişine karşılık gelecek şekilde iki milyon döngüye maruz bırakılır. Test süresince pandüllerin mekanik bütünlüklerini koruması beklenir. Ayrıca, döngü testine ek olarak, pandüller çekme testine de tabi tutulur.

2.4.12. Sistem Yüksekliği

Sistem yüksekliği, seyir teli ile portör teli arasındaki düşey mesafe farkını ifade eder. Bu yükseklik, katener hattının esnekliğini belirleyen temel parametrelerden biridir. Sistem yüksekliği azaldıkça hat daha rijit hale gelir, bu durum esnekliği azaltarak iki destek noktası arasındaki mesafe kısalmasını ve daha fazla direk kullanımını gerektirir. Katener sisteminin esnekliği, ilgili standartlarda belirlenmiş olup, proje tasarımı aşamasında hat hızına bağlı olarak optimize edilir. (Esveld, 2001)

2.4.13. Dezeksmen

Pantografin seyir teline sürekli temas etmesi sonucu oluşan sürtünme, temas yüzeyinde aşınmaya neden olur. Bu aşınmanın tek noktada yoğunlaşmasını önlemek ve pantograf kömürünün homojen aşınmasını sağlamak için, katener hattı hat ekseninden belirli yatay mesafelerle saptırılarak yerleştirilir. Bu yatay sapmaya dezeksman adı verilir.

Dezeksmen, seyir ve portör tellerinin destek noktalarındaki konsol-hoban takımlarında yer alan rapeller aracılığıyla sağlanır. Dezeksmen değerleri, her proje için ayrı ayrı açık hat ve kurp (eğri) bölümleri dikkate alınarak, pantograf temas yüzeyi ve rüzgâr yükleri göz önünde bulundurularak belirlenir.

2.5. Sinyalizasyon Ve Kontrol Sistemleri

Raylı Ulaşım Sistemlerinde Sinyalizasyon; Demiryolu ulaşımında hız, dakiklik ve güvenlik, sistemin sürdürülebilirliği açısından en temel önceliklerdir. Ulaşımın planlanan zamanda, düzenli ve emniyetli bir biçimde gerçekleşebilmesini sağlayan sinyalizasyon sistemleri, modern demiryolu taşımacılığının en kritik bileşenlerinden biridir.

Sinyalizasyon sistemlerinin temel amaçları şu şekilde özetlenebilir (Gündoğdu ve Söylemez, 2005):

- Hat üzerindeki trenler arasında çarpışmaların önlenmesi,
- Güzergâh gereksinimlerine uygun olarak makasların düzenlenmesi ve kilitlenmesi yoluyla raydan çıkma riskinin azaltılması,
- Aynı rota üzerinde birden fazla tren için eşzamanlı hareketin engellenmesi,
- Hemzemin geçitlerde güvenliğin sağlanması.

2.5.1. Sinyalizasyon Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi

1814 yılında George Stephenson tarafından geliştirilen ilk buharlı lokomotifin hizmete alınmasıyla birlikte demiryolu taşımacılığı resmen başlamıştır. Bu dönemde

yapılan çalışmalar, daha çok hat güzergâhlarının planlanması, lokomotif ve vagon üretimi gibi konular üzerinde yoğunlaşmıştır (Özdemir, 2000).

Demiryollarının ilk yıllarında öncelik hız ve taşıma kapasitesine verilmiş, güvenlik arka planda kalmıştır. O yıllarda hat ve kavşak sayısının azlığı, trenlerin kısa ve hafif oluşu, hızlarının ise görece düşük olması nedeniyle tren kontrolü manuel yöntemlerle yapılabiliyor, ek güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulmuyordu (Söylemez ve Açıkbaş, 2005).

Ancak tren sayısının artmasıyla birlikte kazalar da çoğalmış ve bu durum güvenliğin önemini ortaya koymuştur. İlk önlem olarak, hat boyunca trenlerin konumu hakkında bilgi vermek amacıyla işaretçi personel görevlendirilmiştir. Bu kişiler el veya bayrakla sinyal vererek tren hareketlerini yönlendiriyordu. Fakat tren hızlarının artmasıyla bu yöntem yetersiz kalmış, kazaların önüne geçilememiştir. Görüş mesafesinin sınırlı olması nedeniyle işaretlerin artırılması da çözüm olmamıştır (Söylemez ve Açıkbaş, 2005).

1840'lı yıllarda “zaman aralığı yöntemi” uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemde trenler arasına belirli süre aralıkları konularak çarpışmaların önlenmesi hedeflenmiştir. Ancak trenlerin birbirlerinin konumundan habersiz olması nedeniyle, arızalanan trenlerin arkasından gelenler çarpışmalara neden olmuştur.

Bu yöntemin yerine daha güvenli olan “mesafe aralığı yöntemi” geliştirilmiştir. Demiryolu hattı belirli bloklara ayrılmış, her bloğun girişine sinyal yerleştirilmiştir. Makinistler bu sinyaller aracılığıyla önlerindeki bloğun dolu veya boş olduğunu anlayabiliyordu.

Telgrafın icadı ile birlikte, istasyonlar arasında iletişim kurulmuş ve sinyaller telgraf devreleri ile kontrol edilmeye başlanmıştır. Ancak bu sistem de insan hatasına açık olduğundan, otomatik sinyal sistemlerinin gelişimine zemin hazırlamıştır.

1900'lü yıllardan itibaren sinyalizasyon teknolojileri hızla ilerlemiş; elle kontrol edilen blok sistemleri, yarı otomatik blok sistemleri ve nihayetinde tam otomatik blok sistemleri geliştirilmiştir (Söylemez ve Açıkbaş, 2005). Günümüzde, otomatik tren kontrolü (ATC) ve sürücüsüz tren işletmeciliği seviyesine ulaşılmıştır.

2.5.2. Sinyalizasyon Sisteminin Temel Bileşenleri

Sinyalizasyon sistemleri, trenlerin güvenli, düzenli ve planlı biçimde işletilmesini sağlayan altyapının temel parçalarından biridir. Bu sistemin ana amacı, demiryolu üzerindeki trenler arasında güvenli mesafe ve iletişim sağlamaktır.

Genel olarak üç temel bileşenden oluşur:

1. Saha Elemanları
2. Trafik Kontrol Merkezi
3. Anlaşman (İlişkilendirme) Sistemi

2.5.3. Saha Elemanları

Saha elemanları, hat üzerindeki fiziksel bileşenleri kapsar ve şu dört ana grupta incelenir:

- Ray devreleri
- Makaslar
- Sinyaller
- Hemzemin geçit sistemleri

2.5.4. Ray Devreleri

Ray devreleri, trenlerin hat üzerindeki konumunu algılamak amacıyla kullanılır. Çeşitli türleri bulunur:

1. İzole Cebireli Ray Devreleri Hat belirli bölgelere ayrılır ve bu bölgeler izole cebirelerle elektriksel olarak birbirinden ayrılır. Bir uçtan uygulanan gerilim diğer ucta ölçülüyorsa blok boştur; ölçülemiyorsa tren var demektir. Bu sistem, hata durumlarında bile güvenli çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Söylemez ve Açıkbaş, 2005).
2. Kodlu Ray Devreleri Kapasitif ayırıcılar kullanılarak sinyal iletimi sağlanır. Ray boyunca belirli bir ses frekansı gönderilir; frekansta sapma varsa blok dolu

kabul edilir. Bu sistem, konforu artırır ve bakım maliyetini düşürür (Söylemez ve Açıkbaş, 2005).

3. Aks Sayıcılı Sistemler Trenin varlığı, ray bölgesine giren ve çıkan aks sayılarıyla belirlenir. Bu sistem, ray kırıklarını algılayamama dezavantajına sahiptir ancak yüksek hızlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
4. Hareketli Blok Sistemleri Bu sistemde bloklar sabit değil, trenin hızı ve fren mesafesine göre dinamik olarak değişir. Böylece hat kapasitesi artırılır ve trenler arası mesafe en verimli şekilde ayarlanır.

2.5.5. Raylı Sistem Makas Türleri

Makaslar, trenlerin bir hat üzerinden diğerine geçmesini sağlayan elemanlardır. Araç bulunduğu sürece makas sistemleri kilitli kalır ve hareket etmez. Ayrıca makas motorları yüksek akım çektiğinden, aynı güç kaynağından beslenen makasların eşzamanlı çalıştırılması önlenir (Söylemez ve Açıkbaş, 2005).

2.5.5.1. Basit Makas (Simple Turnout)

Ana hatta doğru yol, sapan (yan) hat bir yönde ayrılır. En yaygın makas türüdür. Basit yapısı nedeniyle uygulaması kolaydır ancak eğrilik nedeniyle hız sınırlamaları olabilir (YYRail, 2021; Railway-Fasteners, n.d.).

2.5.5.2. Simetrik / Eşit Kollu Makas (Equilateral Turnout)

Ana hattın iki yönde eşit olarak ayrıldığı makas türüdür. Ayrılan iki kolun eğri yarıçapları eşittir. Daha büyük eğrilik yarıçapı sayesinde istasyonlarda sıkça kullanılır (Railway-Fasteners, n.d.; YYPail, 2021).

2.5.5.3. Üç Yollu Makas (Three-Way Turnout)

Ana hattan üç farklı kolun ayrıldığı makas türüdür. Sınırlı alanlarda (örneğin sahalarda, depo girişlerinde) kullanılır. Bakımı karmaşıktır ve ömrü daha kısa olabilir (Railway-Fasteners, n.d.; YYPail, 2021).

2.5.5.4. Çapraz Makas / Kruvazman (Diamond Crossing)

İki ray hattının birbirini kesmesi ve/veya iki yönlü geçişin sağlandığı yapıdır. Karmaşık hat bağlantılarında kullanılır ancak bakım maliyeti yüksektir (Trackopedia, n.d.; MEB, n.d.).

2.5.5.5. Kaymalı Makas / Slip Switch (Slip Turnout)

Bir makas ile diğer makasın birleşimi gibidir. Çok yollu yerleşimlerde alan tasarrufu sağlar ancak yapısı karmaşık ve bakım maliyeti yüksektir (Railway-Fasteners, n.d.; YYRail, 2021).

2.5.6. Sinyaller

Sinyaller, tren trafiğini yönlendiren ışıklı göstergelerdir. Genellikle üç veya dört renkli lambalardan oluşur:

- Kırmızı: Dur
- Sarı: Bir sonraki blok dolu, izin verilen hızda ilerle
- Yeşil: En az iki blok boş, devam et

Sinyaller yüksek sinyaller (ana hatlar) ve cüce sinyaller (yan hatlar) olmak üzere ikiye ayrılır.

2.5.7. Hemzemin Geçitler

Karayolu ve demiryolunun aynı seviyede kesiştiği noktalardır. Geçitlerde tren geçişi sırasında bariyer sistemleri otomatik olarak devreye girer. Bariyer, tren geçene kadar kapalı kalır ve kontrol sinyali kesildiğinde karayolu trafiği yeniden açılır. Bu sistemlerin tümü, demiryolu ulaşımında otomasyon, güvenlik ve sürekliliğin sağlanmasında temel rol oynar. Modern sinyalizasyon sistemleri sayesinde günümüzde trenler, insan müdahalesine ihtiyaç duymadan tam otomatik biçimde işletilebilmektedir

2.6. Hafif Raylı Sistemlerin İstasyon Ve Peron Özellikleri

Hafif raylı sistemler (HRS), şehir içi ulaşımında orta-yüksek kapasiteli, çevreci ve hızlı taşımacılığı sağlayan sistemlerdir. Metro sistemlerine kıyasla daha düşük inşaat maliyetine sahip olmaları, yüzey veya sığ tünel üzerinde çalışabilmeleri ve esnek hat planlamasına uygunluklarıyla öne çıkar (Akkaya,&Kızıldaş,2022). HRS istasyonları, yolcu erişimi, biletleme, bekleme, tren bağlantısı ve güvenlik gibi fonksiyonları içeren, şehir dokusuyla bütünleşmiş ulaşım odaklı yapılardır (Patterson, 1996).

2.6.1 Hafif Raylı Sistem İstasyonlarının Özellikleri

Hafif raylı sistem istasyonları, metro istasyonlarına göre daha küçük ölçekli ve sade yapılardır. Genellikle zemin seviyesinde (at-grade) veya kısmen yükseltilmiş (elevated) olarak inşa edilirler.

Tasarım ilkeleri; erişilebilirlik, yolcu güvenliği, yönlendirme, konfor ve entegrasyon üzerine kuruludur (Yıldız, 2020).

İstasyonların temel bileşenleri şunlardır:

- Giriş – Çıkış Alanları: Turnike veya açık giriş sistemleri, merdiven, rampa ve asansörlerle erişim.
- Biletleme Alanı: Otomatik bilet makineleri, akıllı kart okuyucular ve bilgi ekranları.
- Bekleme Alanları: Üstü kapalı peron barınakları, oturma üniteleri, bilgilendirme panoları.
- Teknik Mekanlar: Elektrik, sinyalizasyon ve haberleşme sistemlerinin kontrol üniteleri.

İstasyonlar ayrıca bisiklet park alanları, aktarma noktaları (otobüs–tramvay bağlantısı) ve yayalaştırılmış erişim yolları ile şehirle entegre edilir (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

2.6.2 Peron (Platform) Özellikleri

Hafif raylı sistem peronları, tren setlerinin boyutuna ve hat kapasitesine göre tasarlanır.

Peronlar, binış–iniş güvenliği, engelli erişimi ve yolcu yönlendirmesi açısından kritik öneme sahiptir.

2.6.2.1 Peron türleri

1. Kenar Tipi Peron (Side Platform): Her hat için ayrı peron bulunur; yolcular karşılıklı yönlerde biner.
2. Ada Tipi Peron (Island Platform): Ortada tek bir peron bulunur, iki yandaki hatlara hizmet eder.

3. Yükseltilmiş veya Alçak Peronlar: Sistem tipine göre değişir. Yükseltilmiş peronlar (900–1100 mm), yerden binış kolaylığı sağlar; alçak peronlar (300–350 mm) tramvay tipi araçlar içindir (TCDD, 2020).

2.6.2.2 Temel teknik özellikler

- Peron Uzunluğu: 60–120 metre (tren set uzunluğuna bağlı).
- Peron Genişliği: Ortalama 4–8 metre.
- Yükseklik: Ray üst kotuna göre sistem standardına göre ayarlanır (örneğin 350 mm – alçak tabanlı sistemlerde).
- Malzeme: Kaymaz yüzeyli beton veya granit kaplama, taktıl yüzeylerle yönlendirme.
- Aydınlatma & Güvenlik: LED aydınlatma, acil durum alarmı, CCTV kameralar, uyarı zeminleri.
- Barınak & Donatı: Üst örtü, oturma bankları, bilgilendirme panoları, yönlendirme tabelaları.

2.6.3. Güvenlik, Erişilebilirlik ve Konfor Kriterleri

Tablo 2.7. Güvenlik, Erişilebilirlik ve Konfor Kriterleri(Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022)

Kriter	Açıklama
Güvenlik	Platform kenarında uyarı çizgileri, sesli ikazlar, CCTV sistemleri
Erişilebilirlik	Asansör, rampa, engelli geçiş alanları, taktıl yüzeyler, Braille yazılı yönlendirme.
Konfor & Estetik	Gölgelik alanlar, ergonomik oturma düzeni, hava koşullarına dayanıklı malzeme seçimi
Yolcu Bilgilendirmesi	Dijital sefer ekranları, anons sistemleri, durak içi yönlendirme panoları

Hafif raylı sistem istasyonları, şehir içi ulaşımın sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayan kentsel altyapı elemanlarıdır. Peron ve istasyon tasarımı, erişilebilirlik, güvenlik, yolcu akışı, konfor ve estetik faktörlerinin dengelenmesini gerektirir.

Yeni nesil HRS projelerinde (örneğin Konya, Antalya ve Kayseri sistemleri), dijital bilgilendirme, enerji verimli aydınlatma ve engelli dostu tasarım standart hale gelmiştir (TCDD, 2020).

2.7 İşletme Özellikleri

2.7.1 Raylı Sistem İşletmeciliği: Yapısı, İşleyişi ve Yönetim İlkeleri

Raylı sistem işletmeciliği, demiryolu, metro ve hafif raylı sistemlerin planlanması, yönetimi, bakım ve işletme süreçlerinin bütüncül şekilde yürütülmesini kapsayan bir ulaşım yönetimi alanıdır. Temel amaç, güvenli, düzenli, ekonomik ve sürdürülebilir taşımacılığı sağlamaktır (TCDD, 2021).

Raylı sistem işletmeciliği; teknik altyapı yönetimi (hat, enerji, sinyalizasyon), araç filosu planlaması, yolcu hizmetleri, personel yönetimi, işletme planlaması (sefer düzeni, hat sıklığı, kapasite) ve bakım-onarım süreçleri olmak üzere birbiriyle bağlantılı alt sistemlerden oluşur (Beirão&Sarsfield, 2007).

2.7.2 Raylı Sistem İşletmeciliğinin Temel Unsurları

a) Hat ve Altyapı Yönetimi

Raylı sistemin işletilebilmesi için hat geometrisi, enerji temini, sinyalizasyon, kontrol merkezleri ve bakım birimleri sürekli olarak izlenir. İşletmeci kuruluş, ray açıklığı (gauge), hat eğimleri, makas noktaları ve bakım zamanlamalarıyla ilgili standartları düzenli olarak uygular (UAB, 2019).

Hat ve altyapı yönetiminde üç ana unsur bulunur:

1. Bakım Yönetimi: Periyodik kontroller, yol yenilemeleri, enerji kesintisi planları.
2. Sinyalizasyon ve Trafik Yönetimi: Trenlerin güvenli aralıkta hareket etmesini sağlayan otomatik sistemler (CBTC, ATP, ATS).
3. Enerji ve İletişim Sistemleri: Kesintisiz işletim için güç temini, SCADA ve fiber iletişim altyapısı (İstanbul Ulaşım A.Ş. 2023).

b) İşletme Planlaması ve Sefer Yönetimi

Raylı sistem işletmeciliğinde hat planlaması, sefer sıklığı (headway), kapasite ve vardiya düzeni titizlikle belirlenir.

Planlama şu unsurları içerir

- Günlük yolcu talebine göre yoğun saat ve düşük talep saatleri için farklı tren sıklıkları.
- Hat kapasitesi (tren/saat) hesaplanarak optimum sefer planı hazırlanır.
- Otomatik Zaman Çizelgesi (Timetable) oluşturulur.
- İstasyon yönetimi ile tren işletmesi senkronize çalışır.

Tüm sistem Ana Kontrol Merkezi (OCC – Operation Control Center) tarafından yönetilir; trenlerin hareketi, enerji tüketimi, sinyalizasyon ve acil durumlar merkezi yazılımlar aracılığıyla izlenir (Köseoğlu, 2021).

c) Personel ve Kurumsal Yönetim

Raylı sistem işletmelerinde işletmeci kuruluş genellikle kamuya bağlı veya belediye iştirakidir (örneğin, Metro İstanbul A.Ş., İzmir Metro A.Ş., Kayseri Ulaşım A.Ş.).

Bu kurumlarda başlıca görev alanları:

- Tren sürücüleri (mashinistler)
- Trafik kontrol personeli
- Bakım-onarım teknisyenleri
- İstasyon görevlileri
- Yönetim ve planlama birimleri (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

İşletme disiplini içinde tüm personel, Demiryolu Emniyet Yönetim Sistemi (DEYS) çerçevesinde eğitim almak ve sertifikalı olmak zorundadır (TCDD, 2021).

d) Güvenlik ve Emniyet Yönetimi

Raylı sistem işletmeciliğinde güvenlik, hem yolcu güvenliği hem de işletme emniyeti anlamına gelir. Sinyalizasyon sistemleri, hat izleme sensörleri, kamera gözetimi,

platform ayırıcı kapılar, yangın algılama sistemleri, acil durum tahliye senaryoları bu kapsamda değerlendirilir (Mısırlı,2017). Ayrıca işletmeler, Uluslararası Demiryolu Güvenliği Yönetimi (ISO 45001, EN 50126/28/29) standartlarına uygun şekilde düzenlenmiştir (ITU Rail Systems Report, 2020).

e) Bakım, Onarım ve Süreklilik

İşletme performansının sürdürülebilmesi için araç ve altyapı bakım yönetimi kritik öneme sahiptir. Bakım türleri:

- Periyodik Bakım: Belirli km/saat aralıklarında planlı bakım.
- Düzeltici Bakım: Arıza sonrası müdahale.
- Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance): Sensör verileri ve yapay zekâ ile arızayı önceden tahmin eden sistemler (TCDD, 2020).

Yeni nesil işletmecilikte, dijital ikiz (digital twin) ve IoT tabanlı veri izleme teknolojileriyle bakım süreçleri otomatikleştirilmektedir (ITU Rail Systems Report, 2020).

2.7.3 Raylı Sistem İşletmeciliği Türleri

Tablo 2.8. Raylı Sistem İşletmeciliği Tablosu

İşletme Türü	Özellikleri
Metro İşletmeciliği	Yüksek kapasiteli, tam sinyalli, genellikle yeraltı sistemleri.
Hafif Raylı Sistem (LRT)	Yüzeyde veya viyadükte, orta kapasiteli, daha düşük maliyetli sistem.
Banliyö / Kentsel Tren İşletmeciliği	Şehir merkezini çevre bölgelerle bağlayan uzun mesafeli hatlar.
Tramvay İşletmeciliği	Kent içi kısa mesafe, alçak tabanlı, sık duraklı ulaşım biçimi.

İşletme türü, hattın kapasitesi, hız sınırı, sinyalizasyon tipi ve istasyon aralıkları ile belirlenir (Eryiğit, 2016; Aydın, 2017).

Raylı sistem işletmeciliği, güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle yönetilen karmaşık bir sistemdir. Başarılı bir işletme için;

- Modern sinyalizasyon ve otomasyon,
- Bakım-onarım planlaması,
- İyi eğitilmiş personel,
- Güçlü veri izleme ve planlama altyapısı gereklidir.

Türkiye’de son yıllarda Ankara, İstanbul, İzmir, Konya ve Kayseri gibi şehirlerde raylı sistem işletmeciliği giderek entegre ulaşım ağı yönetimine evrilmiştir. Bu dönüşüm, şehirlerin karbon salımını azaltmak ve toplu taşımayı teşvik etmek açısından önemli bir adımdır (UAB, 2019).

3.RAYLI SİSTEMLER İLE LASTİK TEKERLEKLİ SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

3.1 Çevresel Etki Açısından Değerlendirme

Raylı Sistemler ile Lastik Tekerlekli Sistemlerin Karşılaştırılması: Çevresel Etki Açısından Değerlendirme

Kent içi ulaşım, hızla artan nüfus, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Bu bağlamda, raylı sistemler (metro, hafif raylı, tramvay) ile lastik tekerlekli sistemler (otobüs, minibüs, özel araçlar) arasında çevresel etki açısından önemli farklar bulunmaktadır

Raylı sistemler, elektrik enerjisiyle çalışan, yüksek kapasiteli, düşük emisyonlu ulaşım araçları iken; lastik tekerlekli sistemler çoğunlukla fosil yakıtla çalışan, daha yüksek karbon salımı ve gürültü kirliliği yaratan sistemlerdir (Yıldız & Aydın, 2019). Bu çalışmada, iki sistemin çevresel etkileri; enerji tüketimi, karbon emisyonu, arazi kullanımı, gürültü düzeyi ve yaşam döngüsü maliyeti (LCA) açısından incelenmiştir.

3.1.1 Enerji Verimliliği

Raylı sistemler, birim yolcu başına düşen enerji tüketimi açısından lastik tekerlekli sistemlere göre daha verimlidir.Örneğin, bir metro hattında 1000 yolcu/km başına enerji tüketimi, modern elektrikli trenlerde ortalama 0,1–0,2 kWh/pkm, otobüslerde ise 0,35–0,5 kWh/pkm düzeyindedir (Patterson,1996).

Ayrıca elektrikli trenlerde rejeneratif frenleme sistemleri sayesinde, frenleme sırasında açığa çıkan enerji hat üzerinden yeniden kullanılır (TCDD, 2020). Bu durum, toplam enerji tüketimini yaklaşık %20'ye kadar azaltmaktadır (ITU Rail Systems Report, 2020).

Buna karşın dizel otobüs veya minibüs sistemlerinde frenleme enerjisi ısı olarak kaybedilir, dolayısıyla enerji verimliliği düşer (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

3.1.2 Karbon Emisyonu ve Hava Kalitesi Üzerindeki Etkiler

Raylı sistemlerin sıfır doğrudan egzoz emisyonu bulunur. Eğer elektrik üretimi yenilenebilir kaynaklardan sağlanıyorsa, sistemin karbon ayak izi neredeyse nötr hale gelebilir. (Toprak& Aktürk,2002)

Lastik tekerlekli sistemlerde ise, CO₂, NO_x, PM10 gibi zararlı gazların doğrudan salımı söz konusudur.

Tablo 3.1. Ulaşım Türü ve Emisyon

Ulaşım Türü	CO ₂ Emisyonu (g/pkm)	NO _x Emisyonu (mg/pkm)	PM10 (mg/pkm)
Metro (elektrikli)	25–35	0	0
Hafif Raylı Sistem	30–40	0	0
Dizel Otobüs	90–120	350	20
Benzinli Araç	150–200	250	10

Raylı sistemlerin elektrikli yapısı, kent içi hava kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Özellikle kapalı ortamlarda (örneğin tünellerde veya yoğun yerleşimlerde) sıfır egzoz emisyonu, halk sağlığı açısından kritik önemdedir (Toprak& Aktürk,2002)

3.1.3 Gürültü ve Titreşim Etkileri

Raylı sistemlerde gürültü ve titreşim, özellikle eski ray hatlarında önemli bir çevresel etkidir. Ancak modern sistemlerde elastik travers, ray altı titreşim yalıtımı ve sessiz teker teknolojisi sayesinde bu etki azaltılmıştır (Toprak& Aktürk,2001)

Lastik tekerlekli sistemlerde ise motor sesi, egzoz, fren gıcırıtısı ve yol yüzeyi sürtünmesi nedeniyle gürültü kirliliği 70–85 dB(A) düzeyindedir (Toprak& Aktürk,2002) Metro ve LRT hatlarında bu değer 60–70 dB(A) aralığındadır (ITU, 2020).Ayrıca raylı sistemlerin kapalı tünel veya viyadüklerde işletilmesi, gürültü yayılımını sınırlayıcı bir faktördür.

3.1.4 Arazi Kullanımı ve Kentsel Etki

Raylı sistemler, daha az alan kaplayan yüksek kapasiteli ulaşım modlarıdır. Bir metro hattı 3–4 şeritli bir otoyol kadar yolcu taşıyabilirken, sadece %10–15 oranında arazi kullanımı gerektirir (UAB, 2021). Lastik tekerlekli sistemler ise geniş yollar, park alanları ve bakım tesisleri nedeniyle daha fazla kent alanını işgal eder.

Ayrıca raylı sistem hatları, kentsel gelişimi yönlendirme etkisine sahiptir. İstasyon çevresinde yoğunluk artışı (TOD – Transit Oriented Development) görülür; bu da karbon ayak izini dolaylı olarak azaltır (Köseoğlu, 2021).

3.1.5 Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment – LCA)

Çevresel etki değerlendirmesinde sadece işletme süreci değil, altyapı inşaatı, bakım, enerji üretimi ve araç imalatı süreçleri de dikkate alınmalıdır (Aydın, 2018).

LCA analizlerine göre:

- Raylı sistemlerin inşaat aşamasında enerji tüketimi yüksek olsa da, uzun ömür (40–50 yıl) nedeniyle toplam çevresel etki amorti edilir.
- Lastik tekerlekli sistemler daha düşük yatırım maliyetine sahip olmakla birlikte, yakıt tüketimi ve emisyon nedeniyle işletme sürecinde çevresel yükleri daha fazladır (Yıldız & Aydın, 2019).

Çevresel etki açısından değerlendirildiğinde;

- Raylı sistemler, düşük karbon salımı, yüksek enerji verimliliği, düşük gürültü ve arazi kullanımıyla çevre dostu bir çözüm sunar.
- Lastik tekerlekli sistemler, esneklik ve ilk yatırım maliyeti açısından avantajlı olsa da, emisyon ve gürültü açısından sürdürülebilir değildir.

Gelecekte, elektrikli otobüslerin yaygınlaşması ve yenilenebilir enerji temelli raylı sistemlerin artmasıyla, her iki sistemin çevresel etkileri daha da dengelenecektir. Ancak mevcut durumda, uzun vadeli çevre dostu ulaşım planlamasında raylı sistemler öncelikli tercih olmalıdır (UAB, 2021; TCDD, 2020).

3.2 Ekonomik Açıdan Değerlendirme

3.2.1 Raylı Sistemler ile Lastik Tekerlekli Sistemlerin Karşılaştırılması: Ekonomik Açıdan Değerlendirme

Kent içi ulaşım sistemleri, sadece teknik veya çevresel değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmelidir. Raylı sistemler (metro, hafif raylı, tramvay) genellikle yüksek ilk yatırım maliyetine sahip olmakla birlikte, uzun ömürlü, düşük işletme giderli ve yüksek kapasite sunan sistemlerdir(UAB,2021).

Lastik tekerlekli sistemler (otobüs, minibüs, özel araçlar) ise daha düşük başlangıç maliyeti taşırken, yüksek işletme ve bakım maliyetleri nedeniyle uzun vadede daha maliyetli hale gelebilir (Akkaya & Kızıltaş,2022).

Bu çalışmada iki sistemin ekonomik boyutu; yatırım maliyeti, işletme gideri, kapasite maliyeti, ömür döngüsü maliyeti ve kentsel ekonomiye etkiler açısından karşılaştırılmaktadır.

3.2.1.1 Yatırım (İlk Kurulum) Maliyetleri

Raylı sistemlerin inşaatı, altyapı, enerji, sinyalizasyon ve araç temini gibi bileşenlerden oluşur. Ortalama olarak 1 km hat maliyetleri şu şekildedir (UAB, 2021; TCDD, 2020).

Tablo 3.2. Yatırım Maliyetleri

Sistem Türü	Ortalama Hat Maliyeti (Milyon USD/km)	Ortalama Ömür (yıl)
Metro (Yeraltı)	70–120	50+
Hafif Raylı Sistem	25–60	40+
Tramvay (Yüzeysel)	15–30	35+
Otobüs (BRT Hariç)	2–10	10–15
Metrobüs (BRT)	10–20	15–20

Raylı sistemlerin yüksek ilk maliyeti, altyapının uzun ömürlü olması nedeniyle zaman içinde amorti edilir. Lastik tekerlekli sistemlerde altyapı basittir; ancak araç yenileme, yakıt, bakım ve personel giderleri sık tekrarlandığından toplam maliyet artar.

3.2.1.2 İşletme ve Bakım Giderleri

Raylı sistemlerde enerji verimliliği ve araç ömrü yüksek olduğu için birim yolcu başına işletme maliyeti düşüktür. Metro hatlarında bu değer genellikle 0,08–0,15 USD/yolcu.km, otobüs sistemlerinde ise 0,25–0,35 USD/yolcu.km civarındadır.

Raylı sistemlerde en büyük gider kalemleri:

- Personel giderleri (%30–40),
- Enerji tüketimi (%20–25),
- Bakım-onarım (%15–20).

Lastik tekerlekli sistemlerde ise:

- Yakıt gideri (%35–45),
- Araç yenileme (%20),
- Yedek parça ve bakım (%20–25) oranındadır

Yani kısa vadede otobüs işletmesi ucuz görünse de, uzun dönemde yakıt ve bakım masrafları nedeniyle toplam maliyet artışı kaçınılmazdır.

3.2.1.3 Kapasite ve Ekonomik Verimlilik

Ekonomik etkinlik, sistemin yatırım başına taşıdığı yolcu sayısı ile ölçülür. Raylı sistemlerde yüksek kapasite – düşük birim maliyet ilişkisi söz konusudur.

Tablo 3.3. Kapasite ve İşletme Maliyeti (ITU Rail Systems Report, 2020)

Sistem Türü	Saatte Tek Yönde Kapasite (yolcu/saat)	Ortalama İşletme Maliyeti (USD/yolcu.km)
Metro	30.000–60.000	0,10
Hafif Raylı	10.000–20.000	0,12
Tramvay	5.000–10.000	0,15
Metrobüs	15.000–25.000	0,25
Otobüs	3.000–8.000	0,30

Dolayısıyla raylı sistemlerin başlangıç maliyeti yüksek olsa da, kapasite artışıyla kişi başına düşen maliyet azalmaktadır. Lastik tekerlekli sistemlerde kapasite sınırına ulaşıldığında, yeni araç ve hat yatırımı gerekliliği ekonomik sürdürülebilirliği azaltır (Köseoğlu, 2021).

3.2.1.4 Ömür Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost – LCC)

Raylı sistemlerin ortalama ömrü 40–50 yıl, otobüs sistemlerinin ise 10–15 yıldır (TCDD, 2020). Birim kilometre başına toplam yaşam döngüsü maliyeti analizlerinde:

Tablo 3.4. Ömür Döngüsü Maliyeti (40 yıl)

Sistem Türü	LCC (Milyon USD/km – 40 yıl için)
Metro	100–150
Hafif Raylı	60–90
Tramvay	40–60
Metrobüs	50–80
Otobüs	70–90

Raylı sistemler, ilk yatırım yüksek olsa da uzun ömür ve düşük işletme gideri sayesinde toplam döngü maliyetinde avantajlıdır. Ayrıca raylı sistemlerin enerji maliyetleri yakıt fiyat dalgalanmalarından daha az etkilenir, bu da ekonomik istikrar sağlar.

3.2.1.5 Kentsel Ekonomiye Katkı ve Dışsallıklar

Raylı sistem yatırımları, sadece ulaşım değil, kentsel gayrimenkul değeri, ticari hareketlilik ve istihdam yaratımı gibi dışsal ekonomik etkiler de doğurur. Araştırmalar, raylı sistem hatlarının çevresindeki arsa değerlerinin %10–30 oranında arttığını göstermektedir (Köseoğlu, 2021).

Lastik tekerlekli sistemlerde ise bu etki daha sınırlıdır; çünkü hat sabitliği ve güvenilirlik daha düşüktür. Raylı sistem yatırımları, Transit-Oriented Development (TOD) yaklaşımıyla birlikte değerlendirildiğinde, yerel ekonomik canlılığı ve vergi gelirlerini artırıcı bir etki yaratmaktadır (Köseoğlu, 2021).

Ayrıca, trafik sıkışıklığının azalması, zaman tasarrufu, yakıt tasarrufu ve hava kalitesi iyileşmesi gibi dolaylı ekonomik kazançlar, raylı sistemlerin toplumsal fayda-maliyet analizinde üstünlüğünü güçlendirir (UAB, 2021).

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde:

- Raylı sistemler, uzun vadeli, yüksek kapasiteli ve enerji verimliliği yüksek sistemler olarak daha düşük yaşam döngüsü maliyeti sunmaktadır.
- Lastik tekerlekli sistemler, düşük yatırım maliyetiyle kısa vadede avantajlı görünse de, yüksek işletme giderleri ve düşük kapasite nedeniyle uzun vadede ekonomik sürdürülebilirlik açısından dezavantajlıdır.

Dolayısıyla kentsel nüfusu yüksek, yoğun hatlarda raylı sistemler ekonomik olarak daha rasyonel bir tercihtir. Buna karşılık, düşük yoğunluklu bölgelerde lastik tekerlekli sistemler, esneklik ve yatırım maliyeti bakımından geçici bir çözüm olabilir. Uzun vadeli ulaşım planlamasında ise entegre sistem yaklaşımı (örneğin metro + otobüs aktarmalı hatlar) en ekonomik çözümdür (UAB, 2021).

3.3 Enerji Tüketimi Açısından Değerlendirme

3.3.1 Raylı Sistemler ile Lastik Tekerlekli Sistemlerin Karşılaştırılması: Enerji Tüketimi Açısından Değerlendirme

Kent içi ulaşım sistemleri, artan enerji talebi ve çevresel baskılar nedeniyle enerji verimliliği odaklı bir dönüşüm sürecindedir. Ulaşım sektörü, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %28'ini, karbon emisyonlarının ise %23'ünü oluşturmaktadır

Bu nedenle raylı sistemler (metro, tramvay, hafif raylı sistemler) ve lastik tekerlekli sistemlerin (otobüs, minibüs, özel araçlar) enerji tüketimi performanslarının doğru karşılaştırılması, sürdürülebilir ulaşım politikaları açısından kritik öneme sahiptir (Gökdağ & Yüksel,1999)

Raylı sistemler genellikle elektrik enerjisiyle çalıştığından, yüksek enerji verimliliği ve düşük birim enerji tüketimi sunar.Lastik tekerlekli sistemler ise çoğunlukla fosil yakıt temellidir ve motor verimliliği, yol koşulları, trafik sıklığı gibi etkenlerle enerji tüketimi artar (Hayırlıoğlu,2017)

3.3.2. Enerji Kaynakları ve Verimlilik Yapısı

a) Raylı Sistemlerde Enerji Yapısı;

Raylı sistemlerin enerji kaynağı büyük oranda elektriktir, bu da yenilenebilir enerji kaynaklarına entegrasyon olanağı sağlar. Elektrikli trenlerde çekiş motorları yüksek verimle çalışır (%85–90), dizel motorlu otobüslerde ise bu oran %25–35 aralığındadır (TCDD, 2020).Ayrıca raylı sistemlerde kullanılan rejeneratif frenleme (regenerative braking) teknolojisi sayesinde frenleme sırasında ortaya çıkan kinetik enerji geri dönüştürülür ve hatta şebekeye geri beslenebilir. Bu yöntem toplam enerji tüketimini %20–25 oranında azaltabilir (ITU, 2020).

b) Lastik Tekerlekli Sistemlerde Enerji Yapısı

Otobüs, minibüs ve özel araçlar büyük ölçüde dizel, benzin veya LPG kullanmaktadır. Bu yakıtların dönüşüm verimi düşük olup, enerji kayıpları motor ısısı ve mekanik sürtünme nedeniyle yüksektir (Gökdağ & Yüksel,1999) Ayrıca bu sistemlerde rejeneratif frenleme sınırlıdır; ancak elektrikli otobüslerin yaygınlaşması bu farkı kısmen azaltmaktadır.

3.3.3. Enerji Tüketimi Değerleri (kWh/pkm) Karşılaştırması

Enerji tüketimi, sistemlerin taşıma kapasitesi ve teknolojik yapısına göre değişmektedir. Ortalama değerler aşağıdaki gibidir (UAB, 2021)

Tablo 3.5. Enerji Tüketim Tablosu

Ulaşım Türü	Enerji Tüketimi (kWh/yolcu.km)	Enerji Kaynağı	Ortalama Doluluk (%)
Metro (elektrikli)	0.10 – 0.20	Elektrik	70–80
Hafif Raylı Sistem	0.15 – 0.25	Elektrik	60–75
Tramvay	0.20 – 0.30	Elektrik	60
Elektrikli Otobüs	0.25 – 0.35	Elektrik	50–60
Dizel Otobüs	0.40 – 0.60	Dizel	45–55
Benzinli Araç	0.55 – 0.80	Benzin	25–40

Tabloda görüldüğü üzere raylı sistemler, birim yolcu başına tüketilen enerji miktarında açık farkla avantajlıdır. Metro sistemleri, özellikle yoğun hatlarda, dizel otobüslere göre yaklaşık %60–70 daha az enerji tüketmektedir.(UAB,2021)

3.3.4. Trafik Koşullarının Etkisi

Lastik tekerlekli sistemlerde trafik sıkışıklığı, dur-kalk hareketleri ve bekleme süreleri enerji tüketimini ciddi biçimde artırır. Bir otobüsün enerji verimliliği, duraksız akan yolda 0,35 kWh/pkm iken, yoğun şehir trafiğinde bu değer 0,60 kWh/pkm'ye kadar çıkar (UAB 2021).

Raylı sistemler ise sabit hatlar, otomatik hız kontrolü ve özel koridorlarda işletim sayesinde trafiğe bağımlı değildir. Bu nedenle enerji tüketimi sabit ve öngörülebilirdir. Bu öngörülebilirlik, enerji planlaması ve bütçeleme açısından önemli bir ekonomik avantaj sağlar (UAB, 2021).

3.3.5. Enerji Yoğunluğu ve Kapasite Kullanımı

Enerji yoğunluğu, sistemin taşınan yolcu kapasitesine oranla harcadığı enerji miktarını gösterir. Raylı sistemler, yüksek taşıma kapasitesi sayesinde enerji yoğunluğunu düşürürken, lastik tekerlekli sistemler düşük doluluk oranı nedeniyle enerji verimsiz hale gelir. Bir metro hattında aynı enerjiyle bir saatte 40.000 yolcu taşınabilirken, aynı enerji miktarıyla otobüs hattında yalnızca 8.000–10.000 yolcu

taşınabilir (TCDD, 2020). Bu fark, enerji maliyeti kadar emisyon azaltımı ve kaynak verimliliğini de doğrudan etkiler.

3.3.6. Yenilenebilir Enerji Kullanımı Potansiyeli

Raylı sistemlerin elektrik altyapısı, yenilenebilir enerji entegrasyonu açısından büyük potansiyel sunar. Güneş enerjisiyle beslenen metro istasyonları, rejeneratif enerji geri kazanımı ve batarya destekli tren sistemleri buna örnektir (ITU, 2020).

Örneğin, İstanbul Metro A.Ş. 2022 yılı itibarıyla enerji ihtiyacının %15'ini yenilenebilir kaynaklardan sağlamayı hedeflemiştir (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

Buna karşın lastik tekerlekli sistemlerde yenilenebilir enerji kullanımı, elektrikli otobüs altyapısının sınırlı olması nedeniyle kısıtlı kalmaktadır.

Enerji tüketimi açısından yapılan değerlendirmelere göre:

- Raylı sistemler, birim yolcu başına enerji tüketimi açısından %50–70 daha verimlidir.
- Rejeneratif frenleme, yüksek kapasite kullanımı ve elektrikli sistem altyapısı sayesinde enerji etkinliği artmaktadır.
- Lastik tekerlekli sistemler, özellikle dizel yakıtlı modellerde, hem düşük motor verimliliği hem de trafik bağımlılığı nedeniyle yüksek enerji yoğunluğu göstermektedir.
- Uzun vadede yenilenebilir enerjiyle beslenen raylı sistemler, hem enerji verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından en uygun ulaşım biçimi olacaktır.

Dolayısıyla, enerji politikalarının odak noktası, raylı sistemlerin şehir içi ulaşımında payının artırılması ve elektrikli otobüs dönüşümünün hızlandırılması olmalıdır (UAB, 2021; TCDD, 2020).

3.4 Erişim Açısından Değerlendirme

Kent içi ulaşım sistemlerinin başarısı, yalnızca taşıma kapasitesi veya hızla değil, aynı zamanda erişilebilirlik (accessibility) düzeyiyle de ölçülmektedir. Erişilebilirlik, bireylerin ulaşım sistemine fiziksel, ekonomik ve zamansal olarak kolayca erişebilme derecesini ifade eder (Litman, 2021). Bu bağlamda, raylı sistemler (metro, hafif raylı sistem, tramvay) ile lastik tekerlekli sistemler (otobüs, minibüs, dolmuş) erişim açısından farklı yapısal ve işlevsel özellikler taşır.

Raylı sistemler, genellikle sabit hat, planlı istasyon yerleşimi ve yüksek kapasite ile çalışırken, lastik tekerlekli sistemler daha esnek güzergâh ve yaygın kapsama alanı sunar (Görcün,2018).Bu iki sistemin erişim açısından karşılaştırılması, şehir planlaması, toplu ulaşım entegrasyonu ve sosyal kapsayıcılık konularında önemli veriler sağlamaktadır.

3.4.1. Erişim Kavramının Boyutları

Ulaşım sistemlerinde erişim üç temel boyutta değerlendirilir (Givoni & Banister, 2013):

1. Fiziksel Erişim: İstasyon veya duraklara ulaşımın kolaylığı (mesafe, engelli erişimi, yaya bağlantısı).
2. Mekânsal Erişim: Ulaşım sisteminin hizmet verdiği coğrafi alanın büyüklüğü ve kapsama oranı.
3. Zamansal Erişim: Sefer sıklığı, hat yoğunluğu, bekleme süresi ve aktarma kolaylığı.

Bu faktörlerin her biri, raylı ve lastik tekerlekli sistemlerde farklı düzeylerde ortaya çıkar.

3.4.2. Raylı Sistemlerde Erişim zellikleri

Raylı sistemlerde erişim, yüksek taşıma kapasitesi ve kısıtlı fakat planlı kapsama alanı özellikleriyle tanımlanır.Genellikle şehir merkezlerini, yoğun nüfuslu koridorları ve aktarma merkezlerini birbirine bağlar.

a) Fiziksel Erişim

Raylı sistem istasyonları, genellikle yaya ve engelli erişimine uygun olarak tasarlanır. Rampalar, asansörler, yürüyen merdivenler, taktik yüzeyler ve yönlendirme sistemleri erişimi kolaylaştırır. Ancak istasyon aralıklarının genellikle 800–1200 metre olması, bazı bölgelerde erişimi sınırlayabilir

b) Mekânsal Erişim

Raylı sistem hatları sabit altyapıya bağlı olduğundan, hizmet verdiği alan belirli koridorlarla sınırlıdır. Bu nedenle kapsama alanı otobüslere göre daha dardır. Ancak yüksek talep bölgelerinde etkin erişim sağlar (TCDD, 2020).

c) Zamansal Erişim

Raylı sistemler, yüksek sefer sıklığı (2–5 dk), zamanında hareket garantisi ve trafikten bağımsız işletim sayesinde yüksek zamansal erişim sunar. Bu yönüyle, lastik tekerlekli sistemlere göre seyahat süresi açısından daha öngörülebilirdir (TCDD, 2020).

3.4.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerde Erişim Özellikleri

Otobüs ve minibüs sistemleri, esneklik ve yaygınlık açısından önemli erişim avantajlarına sahiptir. Hat planlamaları kolay değiştirilebilir; düşük yatırım maliyetleri sayesinde daha geniş alanlara hizmet götürülebilir (UAB, 2021).

a) Fiziksel Erişim

Otobüs durakları genellikle 300–500 metre aralıklarla konumlanır, bu da kısa yürüme mesafesi avantajı sağlar.

Ancak kaldırım, rampa veya durak altyapısının yetersiz olduğu bölgelerde engelli erişimi sınırlı olabilir (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

b) Mekânsal Erişim

Otobüs ağları, sokak dokusuna uyumlu ve esnek güzergâh yapısı sayesinde, kentin çeperlerine kadar erişim sağlayabilir. Raylı sistemlerin ulaşamadığı yerleşim alanlarında tamamlayıcı rol oynar (Litman, 2021).

c) Zamansal Erişim

Trafik koşullarına bağlı işletim, lastik tekerlekli sistemlerde zamanında varış oranını düşürür.Yoğun saatlerde gecikmeler ve sefer düzensizliği erişim kalitesini azaltır.Buna rağmen, düşük yoğunluklu hatlarda talebe göre esnek sefer planlaması yapılabilir (UAB, 2020).

3.4.4. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Tablo 3.6. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Kriter	Raylı Sistemler	Lastik Tekerlekli Sistemler
Fiziksel Erişim	Engelli dostu, planlı istasyon yapısı	Daha kısa yürüme mesafesi ancak altyapı kalitesi değişken
Mekânsal Erişim	Sınırlı koridorlar, sabit hatlar	Geniş kapsama alanı, esnek güzergâh
Zamansal Erişim	Düzenli sefer, trafik etkisinden bağımsız	Trafik yoğunluğuna bağlı gecikmeler
Aktarma Olanakları	Planlı entegrasyon noktaları	Çoğu zaman karmaşık ve manuel aktarmalar
Erişilebilirlik Standartları	Evrensel tasarım ilkelerine uygun	Bazı bölgelerde yetersiz uygulama

Bu tabloya göre, raylı sistemler kalite ve güvenilirlik açısından üstün, lastik tekerlekli sistemler ise yaygınlık ve erişim alanı açısından avantajlıdır. Kapsamlı bir toplu ulaşım planlamasında, her iki sistem birbirini tamamlayacak biçimde entegre edilmelidir.

3.4.5. Kentsel Erişim Açısından Entegrasyon Gerekliliği

Modern kentlerde, erişilebilirlik yalnızca ulaşım aracının türüyle değil, sistemler arası entegrasyonla belirlenir. Raylı sistem istasyonlarının otobüs, bisiklet, yaya ve mikro mobilite araçlarıyla bağlantısı, erişim kalitesini artırır.

Örneğin, İstanbul’da Marmaray ve metrobüs entegrasyonu, kullanıcıların bölgesel geçiş süresini %30 azaltmıştır (UAB, 2021). Benzer biçimde, Konya Hafif Raylı Sistemi, bisiklet park alanları ve toplu taşıma entegrasyonu sayesinde erişim skorunu yükseltmiştir (Görcün,2018).

Bu entegrasyon, çok modlu erişim (multimodal accessibility) yaklaşımının temelini oluşturur ve sürdürülebilir ulaşım planlamasının merkezindedir

Erişim açısından yapılan değerlendirmede:

- Raylı sistemler, fiziksel erişim ve zamanında işletim açısından daha güvenilir, planlı ve konforludur.
- Lastik tekerlekli sistemler, daha geniş alanlara erişim sağlayan esnek bir yapı sunar ancak trafik koşullarına bağımlıdır.
- Engelli erişimi, aktarma kolaylığı ve kullanıcı bilgilendirme sistemleri bakımından raylı sistemler daha gelişmiştir.
- Kentsel ölçekte en verimli erişim, entegre toplu ulaşım ağlarıyla (raylı + otobüs + bisiklet + yaya) sağlanır.

Dolayısıyla, sürdürülebilir ulaşım politikaları için raylı sistemlerin omurga, lastik tekerlekli sistemlerin ise besleyici ve tamamlayıcı rol üstlenmesi ideal yaklaşımdır (UAB, 2021).

3.5. Gürültü Kirliliği Açısından Değerlendirme

Kentleşmenin hızla artmasıyla birlikte ulaşım kaynaklı çevresel etkiler de önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu etkiler arasında gürültü kirliliği, insan sağlığını ve yaşam kalitesini doğrudan etkileyen temel unsurlardan biridir (Aydın, 2019). Ulaşım sistemleri içinde lastik tekerlekli araçlar (otobüs, minibüs, özel araç) ve raylı sistemler (metro, tramvay, hafif raylı sistem) farklı düzeylerde gürültü üretmektedir.

Gürültü; motor, frenleme, tekerlek-yol veya tekerlek-ray etkileşimi, hava sürtünmesi ve yapısal titreşimlerden kaynaklanır (TCDD, 2020). Raylı sistemlerde gürültü genellikle ray-tekerlek teması ve mekanik titreşim sonucu ortaya çıkarken, lastik tekerlekli sistemlerde motor ve egzoz sesi baskındır. Bu çalışma, iki sistemin gürültü düzeylerini, yayılım etkilerini ve kentsel çevre üzerindeki sonuçlarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir.

3.5.1. Gürültü Kirliliği Kavramı ve Etkileri

Gürültü kirliliği, istenmeyen veya rahatsız edici seslerin çevredeki insanları olumsuz etkilemesi durumudur.

Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre uzun süreli 55 dB üzerindeki gürültü, insan sağlığı üzerinde uyku bozuklukları, stres, kalp-damar hastalıkları ve dikkat dağınıklığı gibi olumsuz sonuçlara neden olabilir (WHO, 2018).

Kentsel alanlarda ulaşım kaynaklı gürültü, toplam çevresel gürültünün yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır (UAB, 2021).

Bu nedenle, ulaşım türlerinin gürültü düzeylerinin analizi, sürdürülebilir ulaşım planlamasının önemli bir bileşenidir (UAB, 2021).

3.5.2. Raylı Sistemlerde Gürültü Özellikleri

a) Gürültü Kaynakları

Raylı sistemlerde başlıca gürültü kaynakları şunlardır (Toprak&Aktürk,2002)

- Tekerlek-ray teması: Özellikle yüksek hızlarda titreşim ve sürtünme sonucu oluşur.
- Motor ve fren sistemleri: Elektrikli motorların ses seviyesi düşük olsa da mekanik bileşenler titreşim yaratabilir.
- Hava sürtünmesi: Hız arttıkça aerodinamik gürültü artar (özellikle metro tünellerinde).

b) Gürültü Düzeyi

Ortalama raylı sistem gürültü seviyesi, sistem tipine göre değişmektedir:

- Metro trenleri: 65–75 dB(A)
- Tramvaylar: 60–70 dB(A)
- Hafif raylı sistemler: 63–72 dB(A) (TCDD, 2020).

Bu değerler, gürültü yönetmeliğinde belirlenen sınır değerler olan 75 dB(A)'nın altında kalmaktadır. Ayrıca, raylı sistemler genellikle özel koridorlarda veya yer altı hatlarda çalıştığı için, gürültü etkisi sınırlı bir çevresel alanda hissedilir.

c) Gürültü Azaltım Önlemleri

Raylı sistemlerde kullanılan bazı teknolojik çözümler şunlardır:

- Elastik ray bağlantıları ve titreşim sönümleyici traversler
- Ray taşlama (rail grinding) yöntemiyle yüzey düzgünlüğünün sağlanması
- Tünel kaplamaları ve gürültü bariyerleri
- Regeneratif frenleme ile mekanik fren gürültüsünün azaltılması..

Bu önlemler sayesinde raylı sistemlerde %30'a kadar gürültü azalışı sağlanabilmektedir (UAB, 2021).

3.5.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerde Gürültü Özellikleri

a) Gürültü Kaynakları

Lastik tekerlekli araçlarda gürültü, içten yanmalı motor, egzoz sistemi, lastik-yol teması ve hava sürtünmesi kaynaklıdır. Motor devri yükseldikçe, gürültü düzeyi logaritmik olarak artar

Ek olarak, yollardaki bozukluklar ve araç bakımsızlığı da ses seviyesini yükseltir.

b) Gürültü Düzeyi

- Şehir içi otobüs: 75–85 dB(A)
- Minibüs: 80–90 dB(A)
- Özel araç trafiği: 70–80 dB(A)

Yoğun trafikte, bu değerlerin geçici olarak 95 dB(A) seviyesine kadar çıktığı ölçülmüştür (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022). Ayrıca, bu sistemlerin trafik sıkışıklığı sırasında artan motor devri ve klakson kullanımı ek gürültü kaynağı oluşturur.

c) Gürültü Azaltım Önlemleri

- Elektrikli otobüs dönüşümü: Motor gürültüsünü ortalama 15–20 dB azaltır.
- Asfalt kalitesinin iyileştirilmesi: Lastik-yol temasından kaynaklı sesleri %10 oranında düşürür.

- Trafik akışının düzenlenmesi: Dur-kalk hareketlerinin azaltılmasıyla gürültü kontrolü sağlanır.

Buna karşın, geniş yol ağları ve trafik yoğunluğu nedeniyle gürültü yayılım alanı çok daha geniştir.

3.5.4. Karşılaştırmalı Analiz

Bu karşılaştırmadan anlaşılacağı üzere, raylı sistemler gürültü kontrolü açısından çok daha avantajlıdır. Raylı sistemlerin sessiz işletim ve izole güzergâh avantajı, kentsel çevreye olan etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır. Lastik tekerlekli sistemler, özellikle yoğun trafiğe sahip bölgelerde, motor ve egzoz seslerinden dolayı ciddi gürültü yükü oluşturur.

Tablo 3.7. Karşılaştırmalı Analiz

Kriter	Raylı Sistemler	Lastik Tekerlekli Sistemler
Ana Gürültü Kaynağı	Tekerlek-ray teması, titreşim	Motor, egzoz, lastik-yol teması
Gürültü Düzeyi (dB)	60–75	75–90
Yayılım Alanı	Kısıtlı (tünel veya özel hat)	Geniş (tüm karayolu ağı)
Zamanla Artış	Ray bakımına bağlı	Araç yaşına ve trafiğe bağlı olarak artar
Azaltım Potansiyeli	Ray taşlama, yalıtım, elektrikli çekiş	Elektrikli otobüs, sessiz lastik, trafik yönetimi
Kentsel Gürültü Katkısı	Düşük–Orta	Yüksek

3.5.5. Kentsel Gürültü Yönetimi ve Entegrasyon

Sürdürülebilir ulaşım politikaları, ulaşım kaynaklı gürültüyü azaltmak için iki temel strateji benimser (UAB, 2021):

1. Sessiz ulaşım modlarının (raylı sistem, bisiklet, elektrikli otobüs) yaygınlaştırılması,
2. Karma ulaşım planlamasıyla gürültü yükünün dağıtılması.

Raylı sistemlerin, elektrikli otobüsler ve bisiklet yollarıyla entegre edilmesi, şehir merkezlerinde gürültü seviyesini ortalama %25 oranında düşürmektedir

Ayrıca, gürültü bariyerleri, yeşil kuşaklar ve akustik şehir tasarımı gibi kentsel çözümler de raylı ve karayolu sistemleri arasında denge sağlar (Toprak&Aktürk,2002)

Gürültü kirliliği açısından yapılan değerlendirmeye göre:

- Raylı sistemler, gürültü düzeyi, yayılım alanı ve kontrol edilebilirlik açısından daha çevre dostudur.
- Lastik tekerlekli sistemler, motor ve egzoz kaynaklı sesler nedeniyle yüksek desibel düzeylerinde gürültü üretir.
- Elektrikli raylı sistemler ve rejeneratif frenleme teknolojileri, gürültü seviyesini önemli ölçüde azaltmaktadır.
- Elektrikli otobüslerin ve sessiz yol malzemelerinin yaygınlaştırılması, lastik tekerlekli sistemlerdeki gürültü sorununu hafifletebilir.
- Kentsel ulaşımında entegre sessiz ulaşım politikaları uygulanarak, hem enerji verimliliği hem de yaşam kalitesi artırılabilir.

Sonuç olarak, raylı sistemler sürdürülebilir ve sessiz kentlerin temel bileşenleri olarak öne çıkmaktadır.

3.6 Güvenlik Açısından Değerlendirme

Kent içi ulaşım sistemleri, yalnızca erişilebilirlik ve hız açısından değil, aynı zamanda güvenlik bakımından da şehir planlamasında belirleyici bir unsurdur. Güvenli ulaşım sistemleri, hem yolcuların hem de üçüncü kişilerin can ve mal güvenliğini korumayı amaçlarGünümüzde kent içi ulaşım sistemleri genellikle raylı sistemler (metro, tramvay, hafif raylı sistem) ve lastik tekerlekli sistemler (otobüs, minibüs, özel araçlar) şeklinde iki ana kategoride incelenmektedir

Her iki sistemin de avantajları bulunmakla birlikte, kaza oranı,sistem bütünlüğü, insan hatasına duyarlılık ve acil durum yönetimi açısından önemli farklılıklar vardır (Mısırlı,2017).Bu çalışma, söz konusu iki sistemin güvenlik performansını teknik, operasyonel ve çevresel faktörler çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir.

3.6.1. Ulaşım Güvenliği Kavramı

Ulaşım güvenliği, bir ulaşım sisteminde kazaların önlenmesi, risklerin azaltılması ve yolcu güvenliğinin sürdürülebilir şekilde sağlanması sürecidir. Güvenlik, genellikle şu bileşenlerden oluşur (UAB, 2021):

- Yapısal güvenlik: Araç ve altyapının teknik dayanıklılığı,
- Operasyonel güvenlik: Sürücü veya makinist kontrolü, sinyalizasyon, bakım,
- Yolcu güvenliği: Yangın, tahliye, acil durum planları,
- Çevresel güvenlik: Sistemlerin çevreyle etkileşimi, kaza etkilerinin sınırlandırılması.

3.6.2. Raylı Sistemlerin Güvenlik Özellikleri

a) Sistemsel Yapı ve Kontrol

Raylı sistemler kapalı devre sinyalizasyon ve otomatik tren kontrol sistemleri (ATC) ile işletilmektedir. Bu sistemler, insan hatasını minimuma indirir ve trenler arası güvenli mesafeyi otomatik olarak düzenler (TCDD, 2020). Ayrıca, raylı sistem hatları genellikle erişime kapalı alanlarda bulunduğu için üçüncü şahıs kaynaklı kazalar oldukça düşüktür.

b) Kaza İstatistikleri

Uluslararası Ulaşım Birliği (UITP) verilerine göre, kent içi raylı sistemlerde 100 milyon yolcu başına düşen ölüm oranı yaklaşık 0,06'dır (UITP, 2019). Bu oran, karayolu sistemlerine kıyasla 25 kat daha düşüktür. Türkiye'de de benzer biçimde, 2015–2022 yılları arasında raylı sistem kazalarının oranı %0,03, ölümlü kaza oranı ise %0,002 olarak kaydedilmiştir (UAB, 2021).

c) Acil Durum ve Yangın Güvenliği

Raylı sistemler, tünel, istasyon ve trenlerde yangın algılama, duman tahliye ve acil aydınlatma sistemleriyle donatılmıştır. Ayrıca, otomatik frenleme ve tahliye koridorları ile yolcuların hızlı şekilde güvenli alanlara erişmesi sağlanır.

d) Risk Faktörleri

Raylı sistemlerdeki başlıca riskler; raydan çıkma, enerji kesintisi veya sinyalizasyon arızaları gibi teknik temellidir. Ancak bu durumlar nadiren insan hatasından kaynaklanır ve otomatik sistemlerle hızlı biçimde kontrol altına alınabilir.

3.6.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Güvenlik Özellikleri

a) Sistemsel Yapı ve Kontrol

Lastik tekerlekli sistemler (otobüs, minibüs, otomobil vb.), insan sürücüsüne bağımlı çalışmaktadır. Bu durum, trafik kazalarının büyük bölümünün insan hatası, dikkatsizlik veya aşırı hız gibi faktörlerden kaynaklanmasına neden olur (Yıldız, 2020). Ayrıca, yolların yaya geçitleri, kavşaklar ve sinyallerle paylaşımlı kullanımı, sistemin güvenliğini azaltan unsurlardır.

b) Kaza İstatistikleri

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2022 yılında:

- Karayolu ulaşımında 531.000 trafik kazası,
- Bunların %88'i sürücü hatasından,
- %98'i lastik tekerlekli araçlar ile gerçekleşmiştir (TÜİK, 2023).

Aynı yıl içinde otobüs kazalarında ölüm oranı 100 milyon yolcuda 1,6, özel araçlarda ise 3,8 olarak ölçülmüştür (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

c) Acil Durum Yönetimi

Lastik tekerlekli sistemlerde, araç başına düşen güvenlik ekipmanı sınırlıdır. Yangın veya çarpışma durumunda, müdahale genellikle araç içi personel ve çevresel birimlerin hızlı erişimine bağlıdır. Toplu taşıma otobüslerinde yangın algılama ve otomatik söndürme sistemleri bulunmasına rağmen, bireysel araçlarda bu tür sistemler nadirdir.

d) Risk Faktörleri

- İnsan hatası (dikkatsizlik, hız, yorgunluk),

- Altyapı yetersizliği (kötü yol, bakım eksikliği),
- Trafik yoğunluğu,
- Hava koşulları.

Bu etkenler nedeniyle karayolu sistemleri, en yüksek kaza oranına sahip ulaşım türü olarak değerlendirilmektedir.

3.6.4. Karşılaştırmalı Güvenlik Analizi

Tablo 3.8. Karşılaştırmalı Güvenlik Analizi

Güvenlik Kriteri	Raylı Sistemler	Lastik Tekerlekli Sistemler
Kontrol Sistemi	Otomatik sinyalizasyon (ATC, ATP)	İnsan sürücüsü
Kaza Nedeni	Teknik arıza, sinyal hatası	İnsan hatası, hız, dikkatsizlik
Kaza Oranı (100 milyon yolcu)	0,06	1,6–3,8
Ölüm Riski	Çok düşük	Yüksek
Acil Durum Müdahalesi	Otomatik sistem ve tahliye altyapısı	Sürücü ve çevresel destek gerektirir
Üçüncü Şahıs Etkisi	Düşük (kapalı sistem)	Yüksek (yol paylaşımı)
Yangın Risk Yönetimi	Otomatik algılama ve duman tahliyesi	Manuel müdahale ağırlıklı

Bu tablo, raylı sistemlerin güvenlik bakımından sistematik olarak daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Raylı sistemlerde kapalı işletme yapısı, merkezi denetim ve otomasyon teknolojileri kazaları büyük ölçüde önlerken, lastik tekerlekli sistemlerde insan faktörüne bağımlılık nedeniyle kaza olasılığı çok daha yüksektir.

3.6.5. Kentsel Ulaşım Güvenliği Politikaları

Kentlerde ulaşım güvenliğinin artırılması için önerilen başlıca stratejiler şunlardır (UAB, 2021):

- Raylı sistemlerin payının artırılması: Otomatik kontrol ve düşük kaza oranı nedeniyle toplu taşıma güvenliği artar.
- Akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu: Sürücü destek sistemleri, trafik yönetim merkezleriyle eşgüdümlü çalışmalıdır.
- Sürücü eğitimi ve denetim: İnsan kaynaklı hataların azaltılması için periyodik eğitim programları uygulanmalıdır.
- Elektrikli araç güvenlik standartları: Yangın riski ve batarya güvenliği için yeni düzenlemeler yapılmalıdır.

Raylı sistemlerin yoğun kullanımı, şehirlerin trafik güvenliği ve can kayıplarını azaltmada stratejik bir unsur haline gelmektedir.

Raylı sistemler ile lastik tekerlekli sistemlerin güvenlik açısından değerlendirilmesi sonucunda:

- Raylı sistemler, yapısal bütünlük, otomatik kontrol ve düşük insan hatası oranı nedeniyle en güvenli ulaşım türü olarak öne çıkmaktadır.
- Lastik tekerlekli sistemlerde ise sürücü davranışları, trafik yoğunluğu ve çevresel faktörler güvenliği önemli ölçüde azaltmaktadır.
- Raylı sistemlerin merkezi izleme ve sinyalizasyon sistemleri, kaza riskini minimize eder.
- Kentsel ulaşım planlamasında, güvenlik odaklı ulaşım politikalarının temelinde raylı sistemlerin yaygınlaştırılması yer almalıdır.

Sonuç olarak, raylı sistemler sadece çevre ve enerji açısından değil, güvenlik bakımından da sürdürülebilir kent ulaşımının ana bileşenidir.

3.7 Konfor Açısından Değerlendirme

Kent içi toplu taşıma sistemleri, sadece ulaşımın sürekliliğini ve erişilebilirliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yolcu konforu, güvenliği ve memnuniyeti açısından da kentsel yaşam kalitesini belirler (Görcün,2018).

Toplu taşımada konfor, bir ulaşım sisteminin fiziksel, psikolojik ve çevresel bileşenlerinin yolcu üzerindeki algısal etkisini ifade eder (Arslan,2019).

Günümüzde kentlerde kullanılan iki temel ulaşım türü — raylı sistemler (metro, tramvay, hafif raylı sistem) ve lastik tekerlekli sistemler (otobüs, minibüs, özel araç) farklı düzeylerde konfor sunmaktadır.Bu çalışma, bu iki sistemin titreşim, gürültü, iklimlendirme, oturma düzeni, kapasite, hız sürekliliği ve yolculuk deneyimi gibi konfor parametreleri bakımından karşılaştırmalı değerlendirmesini sunmaktadır.

3.7.1. Ulaşım Sistemlerinde Konfor Kavramı

Toplu taşıma konforu, hem araç içi fiziksel koşulları hem de seyahat sürecinin psikolojik algısını kapsar (Arslan,2019).

Ulaştırma planlamasında konfor, genellikle aşağıdaki unsurlar çerçevesinde ölçülür (UAB, 2021):

- Titreşim ve sarsıntı düzeyi
- Gürültü seviyesi
- Hava kalitesi ve iklimlendirme
- Koltuk düzeni ve oturma ergonomisi
- Yolcu kapasitesi ve doluluk oranı
- Yolculuk sürekliliği (duruş sıklığı, hız değişimi)
- Bilgilendirme, yönlendirme ve aydınlatma sistemleri

Bu faktörler, yolcu memnuniyetinin en belirleyici bileşenleri arasında yer alır

3.7.2. Raylı Sistemlerin Konfor Özellikleri

a) Titreşim ve Sarsıntı

Raylı sistemler, çelik tekerlek ve ray yüzeyinin düzgünlüğü sayesinde düşük titreşim üretir.Modern metro ve tramvay hatlarında kullanılan elastik traversler ve ray altı yastıkları, titreşimleri %40'a kadar azaltır (TCDD, 2020). Bu durum, yolcuların seyahat boyunca sabit bir denge ve sessiz hareket deneyimi yaşamasını sağlar.

b) Gürültü ve Akustik Konfor

Raylı sistemlerde gürültü seviyesi genellikle 60–70 dB(A) aralığındadır ve bu değer, lastik tekerlekli sistemlere göre ortalama %25 daha düşüktür (UAB, 2021). Ayrıca yer altı hatlarda akustik kaplama ve gürültü sönümleyici tünel malzemeleri kullanılmaktadır.

c) İklimlendirme ve Hava Kalitesi

Raylı sistem araçları genellikle otomatik iklimlendirme sistemleriyle donatılmıştır. Hava sirkülasyonu, yolcu yoğunluğuna göre otomatik olarak ayarlanır. Bu durum, mevsimsel farklılıklardan bağımsız sabit iç ortam konforu sağlar (Karakurt, 2021).

d) Oturma ve Yolcu Alanı

Tren vagonlarında koltuk aralıkları daha geniştir (genellikle 70–80 cm). Yolcu kapasitesi yüksek olduğundan, kalabalık anlarda bile dengeli ağırlık dağılımı ve sabit tutunma noktaları mevcuttur. (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

e) Sürüş Sürekliliği

Raylı sistemler özel hatlarda çalıştıkları için dur-kalk sayısı azdır. Bu da daha sabit hız profili ve daha az sarsıntılı hareket anlamına gelir. Sabit hız, hem enerji verimliliğini hem de yolcu konforunu artırır.

3.7.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Konfor Özellikleri

a) Titreşim ve Sarsıntı

Lastik tekerlekli sistemlerde, yol kalitesi ve sürücü davranışı konforu doğrudan etkiler. Bozuk asfalt, hız tümsekleri ve ani frenlemeler, yüksek dikey titreşim ve denge kaybı oluşturur. Bu titreşim düzeyi, genellikle 1,5–2 kat daha fazladır.

b) Gürültü ve Motor Titreşimi

Otobüs ve minibüslerde içten yanmalı motorların yarattığı titreşim ve ses, 80–85 dB(A)'ya kadar ulaşabilir (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

Özellikle dur-kalk trafikte motor devrinin değişkenliği, yolcu konforunu olumsuz etkiler.

c) İklimlendirme

Kamu otobüslerinde genellikle iklimlendirme sistemleri sınırlıdır; aşırı sıcak veya soğuk havalarda konfor koşulları sabit tutulamaz. Bu durum, mevsimsel memnuniyet farkı (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

d) Oturma ve Alan Kullanımı

Otobüslerde koltuk mesafesi ortalama 60–65 cm’dir. Aşırı doluluk ve ayakta yolcu taşınması, kişisel konforu azaltır. Ayrıca titreşim kaynaklı denge bozulması ayakta yolcular için güvenlik riskidir (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

e) Sürüş Sürekliliği

Trafik, sinyalizasyon ve durak yoğunluğu nedeniyle dur-kalk sıklığı fazladır. Bu durum sarsıntılı, düzensiz hız profili oluşturur ve hem fiziksel hem psikolojik konforu düşürür (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

3.7.4. Karşılaştırmalı Konfor Analizi

Tablo 3.9. Karşılaştırmalı Konfor Analizi

Kriter	Raylı Sistemler	Lastik Tekerlekli Sistemler
Titreşim Düzeyi	Düşük (sabit hat yapısı)	Yüksek (yol kalitesine bağlı)
Gürültü Düzeyi (dB)	60–70	80–90
İklimlendirme	Otomatik, sabit sıcaklık	Değişken, yoğunlukla manuel
Oturma Konforu	Geniş aralık, sabit pozisyon	Dar aralık, sıkışık ortam
Sürüş Sürekliliği	Düzenli, kesintisiz hız	Trafik kaynaklı dur-kalk hareketi
Doluluk Yönetimi	Yüksek kapasite, dengeli yük	Düşük kapasite, sıkışıklık
Kullanıcı Memnuniyeti	Yüksek (sabit zaman ve sessizlik)	Orta/Düşük (trafik ve titreşim etkili)

Bu karşılaştırma göstermektedir ki, raylı sistemler yolcu konforu bakımından açık şekilde daha üstündür. Özellikle titreşim, gürültü, iklimlendirme ve sürüş sürekliliği alanlarında raylı sistemler, lastik tekerlekli sistemlere kıyasla daha kararlı performans sergilemektedir.

3.7.5. Konfor Artırıcı Teknolojiler

Günümüzde her iki sistemde de konforu artırmak için teknolojik uygulamalar geliştirilmektedir:

- Raylı sistemlerde:
 - Hava yaylı süspansiyonlar,
 - Gürültü emici ray bağlantıları,
 - Dijital bilgilendirme ekranları,
 - Ergonomik koltuk tasarımları.
- Lastik tekerlekli sistemlerde:
 - Elektrikli otobüs dönüşümü (daha sessiz motorlar),
 - Aktif süspansiyon sistemleri,
 - Akıllı klima kontrolü,
 - Sessiz lastik teknolojileri

Ancak, altyapısal farklılıklar nedeniyle raylı sistemlerin doğal konfor üstünlüğü korunmaktadır.

Raylı sistemler ve lastik tekerlekli sistemler, kent içi ulaşımın iki temel unsurudur; ancak konfor açısından önemli farklılıklar göstermektedir.

Sonuç olarak:

- Raylı sistemler, düşük titreşim, sessiz işletim, sabit iklimlendirme ve düzenli hız profili sayesinde yüksek düzeyde konfor sağlar.
- Lastik tekerlekli sistemler, yol koşulları, trafik yoğunluğu ve motor titreşimi nedeniyle konfor bakımından dezavantajlıdır.

- Raylı sistemler, kentsel ulaşımın ergonomik ve psikolojik refah düzeyini artıran sistemler olarak öne çıkmaktadır.

Kentlerin geleceğe dönük ulaşım planlamasında, konforu sürdürülebilir ulaşım hedefleriyle birleştiren raylı sistem yatırımlarının önceliklendirilmesi önerilmektedir.

3.8 Taşıma Kapasitesi Açısından Değerlendirme

Kent içi ulaşım sistemlerinde taşıma kapasitesi, sistemin etkinliğini ve verimliliğini belirleyen en temel performans göstergelerinden biridir. Taşıma kapasitesi; bir ulaşım sisteminin birim zamanda taşıyabildiği yolcu sayısı olarak tanımlanır (Kasımoğlu,2015).Bu kavram, sadece fiziksel araç kapasitesiyle değil, aynı zamanda hat yoğunluğu, sefer sıklığı, araç tipi, istasyon düzeni ve işletme stratejisiyle de doğrudan ilişkilidir.

Kentleşme hızının arttığı günümüz şehirlerinde, artan yolcu talebine yanıt verebilmek için sistemlerin yüksek kapasiteli, düzenli ve güvenilir çalışması gerekmektedir (Kasımoğlu,2015).Bu bağlamda, raylı sistemler ile lastik tekerlekli sistemlerin taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması, şehir planlaması ve yatırım önceliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

3.8.1 Taşıma Kapasitesi Kavramı

Taşıma kapasitesi, aşağıdaki formülle ifade edilir (UAB, 2021):

$$K=P \times F \times VK = P \times F \times V$$

Burada:

- K: Taşıma kapasitesi (yolcu/saat/yön),
- P: Araç başına yolcu kapasitesi,
- F: Sefer sıklığı (araç/saat),
- V: Araç doluluk oranı.

Kapasite, hem araç içi düzen hem de işletme aralığı (headway) gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

3.8.2. Raylı Sistemlerin Taşıma Kapasitesi

a) Sistem Özellikleri

Raylı sistemler, sabit hat altyapısı, yüksek taşıma kapasitesi ve düzenli sefer aralıkları ile toplu taşımada büyük ölçekli talepleri karşılayabilen sistemlerdir. Metro, tramvay ve hafif raylı sistemler arasında kapasite farkı bulunur (TCDD, 2020):

Tablo 3.10. Raylı Sistemlerin Ortalama Taşıma Kapasitesi

Sistem Türü	Ortalama Taşıma Kapasitesi (yolcu/saat/yön)
Tramvay	7.000 – 10.000
Hafif Raylı Sistem	15.000 – 25.000
Metro	30.000 – 80.000

Raylı sistemlerde araçlar birbirine entegre diziler halinde (multiple unit) çalıştırılabildiği için, aynı hat üzerinde çok sayıda yolcu taşınabilir.

b) Sefer Sıklığı ve Süreklilik

Metro sistemlerinde sefer aralıkları 2–3 dakika, hafif raylı sistemlerde ise 5–7 dakika civarındadır.

Bu süreklilik, sistemin yüksek kapasite ve zaman verimliliğini destekler

c) İstasyon ve Araç Tasarımı

Raylı sistem istasyonları geniş peron alanları, çoklu giriş-çıkış düzeni ve hızlı tahliye koridorlarıyla yüksek yolcu sirkülasyonuna uygun şekilde tasarlanmıştır (TCDD, 2020)

Ayrıca araç içi tasarımda ayakta yolcu oranı %60–70 düzeyinde planlanır; bu da kapasiteyi artırır.

d) İşletme Güvenirliği

Raylı sistemlerde işletme otomatik kontrol ve sinyalizasyon sistemleriyle yürütüldüğü için gecikme riski düşüktür.

Bu durum, yüksek kapasitenin istikrarlı biçimde sürdürülebilmesini sağlar (UAB, 2021).

3.8.3. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Taşıma Kapasitesi

a) Sistem Özellikleri

Otobüs, minibüs ve özel araçlardan oluşan lastik tekerlekli sistemler, esnek güzergâh avantajına sahip olmakla birlikte, kapasite açısından trafik yoğunluğu, durak sayısı ve yol koşulları gibi faktörlere bağlıdır (TCDD, 2020):

b) Araç Kapasitesi ve Sefer Aralığı

Standart bir şehir otobüsünün ortalama kapasitesi 80–120 yolcu, körüklü otobüslerde 150–180 yolcu civarındadır.

Tablo 3.11. Lastik Tekerlekli Sistemlerin Ortalama Taşıma Kapasitesi

Sistem Türü	Ortalama Taşıma Kapasitesi (yolcu/saat/yön)
Minibüs	1.000 – 2.000
Standart Otobüs	4.000 – 8.000
Metrobüs (özel koridorlu)	20.000 – 30.000

Sefer aralıkları ise trafik koşullarına göre 5–10 dakika arasında değişir (Ulaşım Dairesi Başkanlığı, 2022).

Ancak, trafik akışına bağlı çalışan sistemlerde kapasite istikrarı düşüktür ve pik saatlerde yoğunluk aşımı sık görülür (TCDD, 2020):

c) İşletme Verimliliği

Lastik tekerlekli sistemlerde sürücü değişimi, trafik kazaları veya sinyal gecikmeleri, sefer sürekliliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle gerçek kapasite, teorik kapasitenin genellikle %60–70'i düzeyinde kalmaktadır (TCDD, 2020):

d) Alan Kullanımı

Karayolu sistemleri, taşıdıkları yolcu miktarına göre oldukça fazla alan gerektirir.

Örneğin 10.000 yolcu/saat taşımak için karayolunda yaklaşık 3 şeritlik (her yöne) alan gerekirken, raylı sistemde bu tek hat ile mümkündür (UAB, 2021).

3.8.4. Karşılaştırmalı Analiz

Tablo 3.12. Karşılaştırmalı Analiz Tablosu

Kriter	Raylı Sistemler	Lastik Tekerlekli Sistemler
Araç Kapasitesi	200–2.000 yolcu (tren dizisi)	80–180 yolcu (otobüs)
Taşıma Kapasitesi (yolcu/saat/yön)	15.000–80.000	1.000–30.000
Sefer Aralığı	2–5 dakika	5–10 dakika (trafik bağımlı)
Alan Verimliliği	Yüksek (tek hat yeterli)	Düşük (çoklu şerit gerektirir)
Süreklilik	Otomatik ve düzenli	Trafik koşullarına bağlı
Yatırım Maliyeti	Yüksek başlangıç, düşük işletme	Düşük başlangıç, yüksek işletme
Verimlilik Oranı	%85–95	%60–70

Bu tablo, raylı sistemlerin taşıma kapasitesi açısından açık üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Raylı sistemler, aynı koridorda daha fazla yolcuyu daha kısa sürede taşıırken, lastik tekerlekli sistemler trafik, yakıt ve personel sınırlamaları nedeniyle kapasite açısından dezavantajlıdır.

3.8.5. Kentsel Planlama Açısından Değerlendirme

Kent ulaşımında kapasite planlaması, sadece teknik bir mesele değil, sosyal sürdürülebilirlik ve çevresel verimlilik açısından da stratejik öneme sahiptir (Akkaya& Kızıldaş,2022)

Raylı sistemlerin yüksek kapasitesi şu avantajları sağlar:

- Trafik sıkışıklığının azalması,
- Yakıt tüketiminin düşmesi,
- Kişi başına enerji verimliliği artışı,
- Daha kısa seyahat süreleri,

- Kent merkezlerinde alan tasarrufu (örneğin otopark ihtiyacının azalması).

Bu nedenle, büyükşehirlerde yüksek talep koridorlarında raylı sistemlerin, orta ölçekli bölgelerde ise otobüs veya metrobüs sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir (UAB, 2021).

Raylı sistemler ve lastik tekerlekli sistemler, kent içi ulaşımın iki tamamlayıcı bileşenidir; ancak taşıma kapasitesi bakımından belirgin farklar bulunmaktadır.

Sonuç olarak:

- Raylı sistemler, yüksek kapasite, sabit hat verimliliği ve sefer düzeniyle yüksek talep hatları için en uygun çözümdür.
- Lastik tekerlekli sistemler, daha düşük maliyetli ancak daha sınırlı taşıma kapasitesine sahiptir.
- Raylı sistemlerin birim yolcu başına düşen işletme maliyeti, uzun vadede daha düşüktür.
- Kapasite planlamasında, talep yoğunluğu–yatırım dengesi esas alınarak hibrit (karma) sistemlerin kurulması önerilmektedir.

Bu çerçevede, raylı sistemler kent içi yüksek talep koridorlarının ana taşıyıcısı, lastik tekerlekli sistemler ise besleyici (feeder) sistem olarak konumlandırılmalıdır.

3.9 Teknolojik Özellik Açısından Değerlendirme

Raylı sistemler ile lastik tekerlekli sistemler arasındaki farklar, birçok kentsel ulaşım projesinde teknik, ekonomik ve işletimsel tercihleri etkiler. Teknolojik seviyede incelendiğinde, her iki sistemin avantajları, dezavantajları ve uygulama alanlarına göre uygunlukları belirginleşir. Aşağıda bu karşılaştırmayı; tasarım, çekiş/ada, enerji-verimlilik, bakım, kapasite, güvenlik, konfor ve sınırlamalar başlıklarında ele alacağız.

Tablo 3.13. Teknik Boyutların Karşılaştırılması

Kriter	Raylı Sistem (Çelik Tekerlek)	Lastik Tekerlekli Rehberli Sistem / Rubber-Tyred Sistem
Avantajlar	Uzun mesafelerde ve yüksek kapasitelerde verimli; enerji	Dik eğim kapasitesi, kısa fren mesafeleri, konfor potansiyeli.

	tasarrufu sağlar; düşük işletme maliyeti.	[McGill, Vikipedi, railsystem.net]
Dezavantajlar	Ray ve balast bakımı, yeniden taşıma ve ray değişimi maliyetleri vardır.	Enerji maliyeti yüksek, bakım (özellikle lastik değişimi) ve ısı üretimi dikkate alınmalı. [Vikipedi, railsystem.net]
Yerel Coğrafi ve Altyapı Koşulları	Şehir yapısı, zemin, eğim ve tünel derinliği seçimde etkilidir.	Montreal örneğinde olduğu gibi topografya lastik metroya uygun olabilir; iklim koşulları (kar, yağış, don) dikkate alınmalı. [McGill]
Teknoloji Bağımlılığı & Tedarik Zinciri	Daha standardize, çok üreticili çözümlere açık.	Özelleştirilmiş sistemler (örn. Translohr) üreticiye bağımlı; bakım, yedekleme ve tedarik zinciri açısından zorluklar olabilir. [POLIS, Vikipedi]
Uzun Dönem İşletme & Yaşam Döngüsü Maliyeti	Ray ve balast bakımı gereklidir; sistem ömrü boyunca maliyetler düzenli ama öngörülebilirdir.	İlk yatırım bazen daha düşük olabilir; uzun vadede lastik değişimi, enerji ve bakım maliyetleri yüksektir. [TRB, POLIS]

3.9.1 Teknolojik Özellikler Açısından Karşılaştırma

Aşağıdaki alt başlıklarda, her iki sistemin teknik boyutları karşılaştırılır:

3.9.2 Kritik Değerlendirmeler ve Seçim Ölçütleri

Tablo 3.14. Seçim Ölçütleri

Özellik	Raylı Sistemler	Lastik Tekerlekli Rehberli Sistemler
Rehberleme & Yönlendirme	Raylar kılavuzluk sağlar; trenin yönü ray kılavuzuyla belirlenir.	Rehber ray, rehber bar veya rehber tekerlek mekanizması kullanılır (örn. Translohr, VAL).
Çekiş & Yol Tutuş	Çelik-çelik teması düşük sürtünme; %1–3 ray-teker sürtünmesi.	Lastik-teker ile beton veya özel yüzeyde daha yüksek sürtünme; %13'e kadar eğimlerde çalışabilir.
Hızlanma / Frenleme	İyi kontrol; sürtünme limitleri nedeniyle kayma riski.	Daha agresif hızlanma ve kısa fren mesafesi mümkündür.
Enerji Verimliliği	Geri kazanım sistemleri yaygın; düşük yuvarlanma direnci.	Daha yüksek yuvarlanma direnci; enerji tüketimi fazla, ısı üretimi yüksek.
Isı & Havalandırma	Tünellerde ısı birikimi sınırlı; havalandırma kolay.	Tekerlek sürtünmesi fazla; tünel sıcaklığı artar, güçlü havalandırma gerekir.

Yapı / Altyapı Gereksinimleri	Ray yatağı, travers, balast veya balastsız betonarme ray altyapısı.	Beton veya özel roll-way ve rehber ray; asfalt/beton üzerine rehber yapı oluşturulabilir.
Bakım & Aşınma	Ray, teker, balast düzenli bakım gerektirir; ray taşlaması yaygındır.	Lastik aşınması hızlı; lastik ve roll-way değişimi maliyetli; bazı sistemlerde yıllık binlerce lastik değişir.
Kapasite & Yoğunluk	Yüksek kapasite; uzun tren dizileri ile büyük yolcu hacmi.	Genellikle sınırlı kapasite; orta yoğunluklu şehir içi hatlara uygun.
Gürültü & Konfor	Ray-teker sürtünmesi ses oluşturabilir; iyi bakım konfor sağlar.	Açık alanda sessiz; tünel içinde ısı ve titreşim kaynaklı ses artabilir.
Güvenlik & Arıza Toleransı	Ray uzun ömürlü; kırılma veya balast kayması kritik.	Lastik patlaması riski; bazı sistemlerde çelik teker yedek olarak kullanılabilir.

4. VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ YERLEŞKESİNDE HAFİF RAYLI SİSTEM PROJESİNİN YAPILABİLİRLİK ANALİZİ

4.1 Van YYÜ Hakkında Genel Bilgi

Yüzüncü Yıl Üniversitesi 1982 yılında Van Gölü kıyısında 750 hektar arazi üzerine kurulmuş olan Zeve kampüsünde Yüzüncü Yıl Üniversitesi olarak hizmet veren üniversitenin. 2025 yılı itibariyle 20 fakülte, 2 yüksekokul, 11 meslek yüksekokulu, 5 enstitü ve 50 uygulama ve araştırma merkezi, 3 Değişim programları ve Rektörlüğe bağlı 20 birim sayısına ulaşan Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kurumsal yapılanmasını devam ettirmektedir. 2025 yılı itibariyle ön lisans, lisans ve lisansüstü olmak üzere 35.000 öğrencinin aktif olarak eğitim-öğretim gördüğü üniversite, 2217 akademik personel, 3.333 idari personel ile hizmetlerini sürdürmektedir. Van merkezde bulunan Zeve yerleşkesi dışında üniversitenin, Erciş ilçesinde bir meslek yüksekokulu ve bir işletme fakültesi ile Özalp ve Gevaş ilçelerinde meslek yüksekokulları bulunmaktadır. Zeve yerleşkesinde eğitim ve idari binalar, uygulama ve araştırma hastanesi (Dursun Odabaş Tıp Merkezi), Hayvan Hastanesi, kütüphane, merkezi laboratuvar, Teknokent, tam donanımlı spor kompleksi açık ve kapalı spor tesisleri, kültür merkezi, personel lojmanları, öğrenci yurtları, çiftlik alanları, seralar, restoranlar, marketler, kafeteryalar ile birçok işletme bulunmaktadır. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi şehir merkezine 17 km uzaklıkta bulunan yerleşkeye toplu ulaşım hizmeti, Van Büyükşehir Belediyesi tarafından özel halk otobüsleri ile sağlanmaktadır. Belediye otobüsleriyle kentin bir ucundan diğer ucuna, Zeve Kampüsü içinde bulunan Dursun Odabaş Tıp Merkezi ve Kampüs içinde, İpekyolu üzerinde bulunan Kredi Yurtlar Kurumu'ndan ve kent merkezinden zeve kampüsüne öğrenci taşınmaktadır. Kampüs içerisinde Büyükşehir Belediyesi özel halk otobüslerine ek olarak mor belediye otobüsleri üniversite hastanesine yolcu taşımaktadırlar. Zeve kampüsünün en büyük problemlerinden biri ulaşımıdır.

Belediye otobüs ve dolmuşlarının konfor düzeyi düşük olduğu ve araçların belediye tarafından belirlenen hareket saatlerine gerekli hassasiyet gösterilemediği, seyahat aralıkları düzensiz olmakla birlikte, ulaşım imkanı sağlandığında ise yolcuların büyük kısmı ayakta ve zor şartlarda seyahat etmektedir. Genel olarak kampüs içi hat üzerinde hizmet veren araçlar, zeve kampüsünde seyahatların

istikrarsız bir yapıda olması ve zirve saatler dışında yeterince yolculuk yapılmaması gibi sebeplerle düzenli saat aralıkları ile toplu taşıma hizmetini büyük oranda zorlaştırmaktadır.

Van İlimizde ve Ülkemizdeki toplu taşıma ve raylı sistem araçlarının geliştirilmesi konusunda bilgiler verilerek uzun yıllar raylı sistemlerde ve hususi olarak elektrikli hafif raylı sistemlerin dönüşüm süreciyle kentsel gelişme arasındaki ilişkinin aydınlatılması için çaba sarf edilmiştir. Bu ilişkinin ileride kentsel yolcu taşımacılığındaki sorunların çözümünde raylı sistem yatırımlarından faydalanmayı planlayan Üniversiteler ve kentler için konunun incelenmesi gereken bütün yönlerini birer birer ele alınarak araştırılması amaçlanmaktadır. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi 7,5 km2 alanla, Türkiye'nin en büyük kampüs alanına sahip olmakla birlikte arazi yapısı bir uçtan diğer uca olan 12 km uzun bir mesafe olduğu bilinmektedir. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesinin kampüs yerleşkesinde bulunan Rektörlük, Fakülteler, Yüksekokullar, Meslek Yüksek Okulları, Uygulama ve Araştırma Merkezleri, İdari Birimler, Dursun Odabaşı Tıp Merkezi (Araştırma Hastanesi), Diş Fakültesi ve Hayvan Hastanesine ulaşımın elektrikli hafif raylı sistemle yolcu taşımacılığı karşılanabilmesi için; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanında mevcutta var olan, güneş enerji sisteminden elde edilen elektrik enerjisiyle Hafif Raylı Sistemin devreye alınarak Dursun Odabaşı Tıp Merkezi, Diş Fakültesi, Hayvan Hastanesine gelen hasta ve ziyaretçilerin, Üniversitemizin Öğrencileri, Akademisyenleri ve İdari personellerin olduğu bölgenin üçüncü şahıslardan izole edilmesi ile üçüncü şahısların kampüse giriş çıkışlarının kontrollü ve güvenli olmasını sağlamakla birlikte; Konforlu ve engelli dostu, hızlı, daha güvenli, daha düzenli, daha az alan kullanım ile daha fazla yolcu taşıma kapasitesi, çevre dostu hava ve gürültü kirliliğinin önlenmesi ile ulaşım kolaylığını ve ulaşım maliyetlerini makul bir seviyeye düşürülmesi hedeflenmektedir. Elektrikli Hafif Raylı Sistemle Ulaşımında ki modernleşmeyi ve kaliteyi keşfetmekle beraber finans kaynaklarını pozitif anlamda analiz etmeyi ve ileriye dönük etkili yeni çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Hayata geçirilmesi planlanan projenin gelecekte Van Yüzüncü Yıl Üniversitesine ve diğer Üniversitelere katma değer katacak olan elektrikli hafif raylı sistemin ulaştırma mühendisliği, akıllı, güvenli ve yaşanabilir topluluklar inşa etmeye yardımcı olmak için ulaşım sistemlerinin planlanması,

Üniversiteye ve bölgeye katkı sağlamak ve yerel yönetimlerin bu stratejik öneme sahip projeyi örnek alınması amacıyla söz konusu proje çalışması yürütülmüştür.

4.2. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Yerleşkesinin Ulaşımı Hakkında Genel Bilgi

Zeve Yerleşkesi, Edremit yolu üzerinde yer almakta olup, Van şehir merkezinden D300 karayolu aracılığıyla doğrudan ulaşım mümkündür. Şehir merkezinden kampüse ulaşım ortalama olarak 20–25 dakika sürmektedir (Aslında, 2024). Kampüsün coğrafi konumu, öğrencilerin, akademik personelin ve ziyaretçilerin kara, hava ve şehir içi toplu taşıma araçlarını entegre biçimde kullanmalarına imkân tanır.

Van Ferit Melen Havalimanı, kampüse yaklaşık 17 kilometre uzaklıkta olup, şehir trafiğine bağlı olarak 25–30 dakikalık bir yolculukla kampüse ulaşılabilir (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, t.y.-b). Bu nedenle havayolu ile gelen öğrenciler ve misafirler için kampüs oldukça erişilebilir bir konuma sahiptir.

4.2.1 Şehir İçi Ulaşım

Belediye Otobüsleri

Van Büyükşehir Belediyesi, şehir merkezi ile YYÜ kampüsü arasında düzenli otobüs seferleri düzenlemektedir.

En sık kullanılan hatlar şunlardır:

- 541 numaralı hat: Beşyol – YYÜ Kampüs güzergâhında çalışmaktadır.
- 542 numaralı hat: Maraş Caddesi – YYÜ Kampüs hattı olarak hizmet verir.
- 540 numaralı hat: İkinisan Caddesi – YYÜ Kampüs güzergâhında sefer yapmaktadır (Van Büyükşehir Belediyesi, t.y.).

Bu hatlar sabah erken saatlerden itibaren akşam 22.00'ye kadar hizmet vermekte olup, ders başlangıç ve bitiş saatlerinde sefer sıklığı artırılmaktadır. Otobüslerin kalkış noktaları şehir merkezinin en yoğun bölgeleri (Beşyol Meydanı, Maraş Caddesi vb.) olduğundan öğrenciler açısından erişim oldukça kolaydır.

Özel Halk Otobüsleri ve Minibüsler

YYÜ kampüsüne, özel halk otobüsleri ve minibüs hatları da düzenli olarak sefer yapmaktadır. Minibüsler genellikle Beşyol, İpekyolu ve İskele Caddesi güzergâhlarından kalkarak kampüs içi duraklarda yolcu indirip bindirir (Üniversiteler.net, 2024). Öğrenciler için ekonomik bir seçenek olması nedeniyle minibüs ulaşımı en sık tercih edilen yöntemlerden biridir.

Servis Araçları

Üniversite bünyesinde görev yapan akademik ve idari personel için belirli saatlerde servis araçları hizmet vermektedir. Ayrıca özel etkinlik, kongre veya seminer dönemlerinde, Van şehir merkezindeki otellerden kampüse ulaşım için geçici servis güzergâhları da oluşturulmaktadır (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, t.y.-c)

4.2.2. Kara ve Bölgesel Ulaşım Bağlantıları

YYÜ kampüsüne ulaşımında ana arter Van – Tatvan D300 karayoludur. Bu yol, kampüsü şehir merkezine ve diğer ilçelere bağlamaktadır. Üniversite, Edremit istikametinde yer aldığı için Van merkezden hareket eden araçlar D300 üzerinde doğrudan kampüs girişine ulaşabilmektedir (Google Maps, 2024).

Van Şehirlerarası Otobüs Terminali'nden gelen yolcular için kampüse ulaşım oldukça kolaydır. Terminalden 541 veya 542 numaralı belediye otobüsleri ile kampüse doğrudan ulaşım mümkündür. Ayrıca bazı şehirlerarası otobüs firmaları, öğrenci yoğunluğuna göre “YYÜ durağı” adı altında doğrudan kampüs önünde yolcu indirip bindirmektedir (Van Büyükşehir Belediyesi, t.y.).

4.2.3 Kampüs İçi Ulaşım

Zeve Kampüsü geniş bir araziye yayılmış olduğundan, kampüs içinde yaya yolları, bisiklet yolları ve servis güzergâhları planlanmıştır. Akademik birimlerin birbirine uzak olması sebebiyle üniversite, kampüs içi ulaşımında ring servisi hizmeti sunmaktadır. Ayrıca son yıllarda öğrenciler tarafından elektrikli scooter ve bisiklet kullanımı yaygınlaşmıştır (Yüzüncü Yıl Üniversitesi, t.y.-d).

Kampüsün Van Gölü kıyısına paralel bir eğimli arazi üzerinde bulunması, ulaşım planlamasında yol eğimlerinin ve kış aylarındaki hava koşullarının dikkate

alınmasını gerektirir. Özellikle kar yağışının yoğun olduğu dönemlerde, kampüs yollarında tuzlama ve kar küreme hizmetleri düzenli olarak yapılmaktadır (Van YYÜ Rektörlüğü Basın Bülteni, 2023).

4.2.4. Ulaşım Altyapısının Geliştirilmesine Yönelik Çalışmalar

YYÜ yönetimi, kampüsün büyüklüğü ve öğrenci sayısının artışı nedeniyle ulaşımında sürdürülebilir çözümler geliştirmeye yönelik çeşitli projeler yürütmektedir. 2023 yılında gerçekleştirilen “Van Kent İçi Ulaşım ve Raylı Sistem Çalıştayı”nda, Zeve Kampüsü’nü şehir merkezine bağlayacak hafif raylı sistem hattı önerisi gündeme getirilmiştir (Şehrivan Gazetesi, 2023). Ayrıca kampüs içi yolların yenilenmesi, akıllı durakların yerleştirilmesi ve otobüs duraklarının elektronik bilgilendirme ekranlarıyla donatılması da planlanmaktadır (Van Büyükşehir Belediyesi, 2024).

4.2.5. Değerlendirme ve Sonuç

Van YYÜ Zeve Kampüsü, Van kent merkezinden yaklaşık 15 km uzaklıkta olmasına rağmen, toplu taşıma olanaklarının çeşitliliği sayesinde erişilebilirliği yüksek bir yerleşkedir. Belediye otobüs hatları, minibüsler ve özel servisler sayesinde öğrenciler, akademisyenler ve ziyaretçiler kampüse düzenli biçimde ulaşabilmektedir.

Kampüsün coğrafi konumu, Van Gölü’ne yakınlığı ve D300 karayolu üzerindeki konumu, Van ilinin ulaşım ağı içinde stratejik bir yer teşkil eder. Ulaşım altyapısının güçlendirilmesi, özellikle artan öğrenci sayısı ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından gelecekte önemli olacaktır.

4.3. Üniversite Yerleşkesindeki Akademik ve İdari Birimler Arasındaki Güzergah Analizi

4.3.1. Güzergâhın Genel Durumu

Görselde mor renkle gösterilen yollar kampüsün ana ulaşım omurgasını oluşturuyor.

Bu yolların temel işlevi:

Kampüsün doğu-batı ve kuzey-güney yönlü temel sirkülasyonunu sağlamak,

Fakülteler, rektörlük, hastane ve yurt bölgeleri gibi öncelikli hedef alanları birbirine bağlamak.

Mor hatların kampüsün merkezinde yoğunlaşması, üniversite çekirdek alanının (rektörlük ve fakültelerin olduğu bölge) ulaşım açısından önceliklendirildiğini gösteriyor.

1. Doğu Girişi (D975 bağlantısı):

- Kampüsün ana giriş noktası konumunda.
- Dursun Odabaş Tıp Merkezi ve kampüs içi ana ring yolu bu girişe bağlanıyor.
- Bu aks, şehirden gelen araç trafiğini yönlendiren birincil ulaşım koridoru işlevi görüyor.

2. Merkezi Alan:

- Mor yolların büyük bir kısmı merkezde halkasal (dairesel) bir forma sahip.
- Bu, kampüs içi dağıtımın dengeli ve erişimin kolay olmasını sağlıyor.
- Fakülteler, yemekhane, sosyal tesisler bu halka yol ağıyla birbirine entegre.

3. Batı Bölgesi (Kampüs Sahili - Bardakçı yönü):

- Sahil hattına doğru yol sürekliliği mevcut ama 1. derece yol ağı burada seyrelmiş.



Görsel 37: YYÜ Toplu Taşıma Güzergahı(Tarafımdan Oluşturuldu)

4.3.2. Güzergâhta Durak Noktası

Kampüsün doğu girişinde (D975 karayolu tarafı) Teknokent Dış Nizamiye ve Taş Nizamiye durakları bulunuyor. Bunlar şehir merkezinden gelen hatların giriş noktaları gibi görünüyor.

Tıp Fakültesi ve Dursun Odabaş Tıp Merkezi durakları, sağlık tesislerine erişim için planlanmış.

Kampüs içi hat, mor çizgiyle gösterilmiş ve kampüsün ana yollarını kapsıyor.

Batı tarafında, göl kenarına yakın Alley Yolu, Konuk Evi ve Zeve Ortaokulu durakları yer alıyor Kampüs Ana Durak, merkezî bir transfer noktasını oluşturmaktadır.



Görsel 38: YYÜ Toplu Taşıma Durak Noktaları (Tarafımdan Oluşturuldu)

4.3.3. Güzergâhın Arazi Eğim Analizi

Kampüs alanı içinde öneri hafif raylı sistem güzergahı için Arcgis 10.8 programından 100 metrede bir(güzergaha göre) atılan noktaların rakım değerlerinin sayısal ortamda işlenmesiyle elde edilen eğim analizine göre arazinin ortalama

eğiminin %3 bandında olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar ışığında, kampüs alanının hafif raylı sistem güzergâhı için topoğrafik açıdan uygun özellikler taşıdığı, eğim değerlerinin ulaşım altyapısı açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu değerlendirilmektedir. Eğim değerlerinin düşük olması, hem altyapı maliyetlerinin azaltılmasına hem de hat güzergâhında daha dengeli bir seyir sağlanmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca, %3 civarındaki eğim değerleri ulaşım konforu ve enerji verimliliği açısından da kabul edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, söz konusu güzergâhın mühendislik, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir bir alternatif oluşturduğu değerlendirilmektedir.



Görsel 39: Öneri Hafif Raylı Sistem Güzergâhı Eğim Analizi(%)

4.3.4. Güzergâhtaki Mevcut Yolcuların Karakteristik Özellikleri

Mor Yollar (Karma Kullanım – Akademisyen + Öğrenci)

- Kampüsün ana dolaşım omurgasını oluşturuyor.
- D975 karayolundan başlayıp kampüsün merkezine kadar uzanan hat (Tıp Fakültesi ve Eğitim Fakültesi civarı) bu renkte.
- Ayrıca kampüs sahiline ve lojmanlara bağlanan yan kollar da mor.
- Bu yollar hem toplu taşıma hem de kişisel araç trafiğine uygun görünüyor.

- Kampüsün genel erişilebilirliğini sağlayan “omurga” görevi görüyor.

Sarı Yollar (Sadece Öğrenci Kullanımı)

- Kampüsün iç çekirdeğinde, yani akademik binaların yoğun olduğu bölgede bulunuyor.
- Özellikle derslikler, fakülteler ve yaya hareketliliğinin fazla olduğu alanları birbirine bağlıyor.
- Bu yollar üzerinde özel araç trafiği kısıtlı, daha çok yaya veya servis minibüsü erişimi sağlanıyor.
- Öğrencilerin kampüs içi hareketini kolaylaştırırken, akademik ve idari trafiği dışarıda tutuyor.

Mavi Yol (Protokol Yolu)

- Kuzeyden (Tıp Fakültesi tarafı) başlayıp kampüsün merkezine kadar uzanan kısa bir güzergâhtan oluşmaktadır.
- Rektörlük, idari binalar veya özel ziyaretçi girişleri için planlanmıştır.
- Bu hattın trafiği kontrollü genellikle özel araçlar veya resmi araçlar tarafından kullanılması amaçlanmıştır.



Görsel 40: YYÜ Yolcuların Karakteristik Özellikleri (Tarafımdan Oluşturuldu)

4.3.5. Güzergâhta Yolcu Taşıma Kapasitesi

Van Beşyol–Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Arası Yolculuk Talebi ve Kampüs İçi Ulaşım Analizi (Kaynak: Van Büyükşehir Belediyesi ASİS Verileri, 2025)

Van ili, Doğu Anadolu Bölgesi’nin en yoğun öğrenci ve kamu hareketliliğine sahip şehirlerinden biridir. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (Van YYÜ), şehir merkezine yaklaşık 15 km uzaklıkta olup, kent içi ulaşımın önemli bir merkezidir. Beşyol–YYÜ hattı, hem öğrenciler hem kamu personeli hem de hasta ve vatandaş gruplarının yoğun biçimde kullandığı bir güzergâh niteliğindedir. Bu hattın talep yoğunluğu, toplu taşıma planlaması, raylı sistem yatırımı ve kampüs içi taşımacılık kararları açısından kritik öneme sahiptir .

4.3.6. Van Beşyol–YYÜ Arası Günlük, Aylık ve Yıllık Yolcu Dağılımı

Aşağıdaki bilgiler, Van Büyükşehir Belediyesi ASİS (Akıllı Raylı Sistem Bilgi Sistemi) verilerine göre 2025 yılı ortalama yolculuk sayılarını göstermektedir.

Van Beşyol–YYÜ Arası Yolcu Yoğunluğu (2025)

Tablo 4.1. Yolcu Yoğunluğu (Kaynak: Van Büyükşehir Belediyesi ASİS, 2025.)

Dönem	Yolcu Sayısı	Ortalama Günlük Yoğunluk	Yolcu Profili
Günlük	54.517,20	Yüksek (Pik 07.00–09.00)	Öğrenci, kamu personeli, vatandaş, hasta
Aylık	1.635.516	Artan dönemsel değişkenlik	Akademik takvime göre değişkenlik gösterir
Yıllık	19.626.192	Sabit yüksek talep eğilimi	Eğitim yılı boyunca süreklilik arz eder.

Bu veriler, Van kent merkezinden YYÜ kampüsüne günlük ortalama 54.517 yolcu taşındığını göstermektedir. Bu sayı, özellikle sabah 07.00–09.00 saatleri arasında doruk (pik) talep seviyesine ulaşmaktadır. Akademik dönemlerde (Eylül–Haziran) bu yoğunluk artarken, yaz aylarında düşüş gözlemlenmektedir.

Yıllık 19,6 milyon yolcu, bu hattın Van genelindeki toplu taşıma ağının bel kemiğini oluşturduğunu göstermektedir. Bu nedenle, Beşyol–YYÜ hattı, potansiyel bir hafif raylı sistem (HRS) veya elektrikli otobüs koridoru için uygun bir adaydır

4.3.7 Kampüs İçi Ulaşım Analizi (YYÜ Ring Hatları)

Van YYÜ yerleşkesi, 36.000 öğrenci ve 5.500 akademik-idari personeliyle şehir içindeki en büyük ulaşım yoğunluk alanlarından biridir. Kampüs içi ring hatları, üniversite içindeki fakülteler, yurtlar ve idari birimler arasında günlük ulaşım ihtiyacını karşılamaktadır

YYÜ Kampüs İçi Ring Ulaşımı (2025)

Tablo 4.2. YYÜ Kampüs İçi Ring Ulaşımı (Kaynak: Van Büyükşehir Belediyesi ASİS, 2025.)

Kullanıcı Grubu	Kişi Sayısı	Günlük Ortalama Ring Yolculuk Sayısı	Ulaşım Özelliği
Öğrenciler	36	72.000 (gidiş-dönüş dahil)	Yoğun sabah-akşam hareketi
Akademik Personel	3200	6400	Geniş zaman aralığında hareket
İdari Personel	2300	4600	Düzenli mesai başlangıç ve bitişlerinde
Toplam	41500	83000	Kampüs içi ring taşımacılığı

Bu veriler, kampüs içinde günlük yaklaşık 83.000 yolculuk yapıldığını ortaya koymaktadır. Özellikle sabah 08.00–09.00 ve akşam 16.30–18.00 saatleri arasında ring yoğunluğu pik seviyeye ulaşmaktadır. Bu durum, kampüs içi taşıt sirkülasyonunun oldukça yoğun olduğunu ve yaya–araç etkileşim risklerinin arttığını göstermektedir (UIC, 2019; Siemens Mobility, 2022).

4.3.8. Doruk Saat Analizi ve Ulaşım Planlaması Önerileri

Tablo 4.3. Doruk Saat (Kaynak: Van Büyükşehir Belediyesi ASİS, 2025.)

Saat Aralığı	Yolcu Sayısı (%)	Açıklama
07.00–09.00	0.38	Öğrenci ve personelin YYÜ'ye ulaşım dönemi
11.00–13.00	0.14	Akademik ders arası, hastane hareketliliği
16.00–18.00	0.32	Dönüş trafiği (kampüsten şehir merkezine)
18.00 sonrası	0.16	Sosyal, sağlık ve akşam ders hareketliliği

Raylı sistem planlamasında, bu tür talep eğilimleri “peak hour factor” olarak değerlendirilir. Van Beşyol–YYÜ hattı için doruk saat yük faktörünün %70 üzeri olduğu görülmektedir. Bu da sabah saatlerinde kapasite artışına yönelik ek araç veya alternatif hat ihtiyacını göstermektedir (Siemens Mobility, 2022; UIC, 2019).

Bu durum, iki temel öneriyi beraberinde getirir:

Beşyol–YYÜ arası yüksek kapasiteli bir elektrikli otobüs hattı veya hafif raylı sistem (LRT) hattının planlanması,Kampüs içi ring hatlarında akıllı durak sistemleri, bisiklet paylaşım entegrasyonu ve yaya öncelikli ulaşım düzenlemelerinin geliştirilmesi.Bu öneriler, hem enerji verimliliği hem de sürdürülebilir ulaşım açısından Van’ın gelecekteki ulaşım politikalarına yön verecek niteliktedir (Siemens Mobility, 2022; UIC, 2019).



126

Yüzüncü Yıl Üniversitesi tarafından kurulan Güneş Enerji Santrali (YYÜ GES), Van ilinde yer almakta ve 348,30 kWe kurulu güce sahiptir. Tesis, yılda yaklaşık 508.518 kWh elektrik üretmektedir. Bu üretim miktarıyla yaklaşık 140 kişinin veya 170 konutun yıllık elektrik ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir (Enerji Atlası, 2025).

YYÜ GES, lisanssız elektrik üretim tesisi statüsünde olup üniversiteye ciddi ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Yıllık yaklaşık 528.859 TL değerinde elektrik tasarrufu sağlandığı tahmin edilmektedir (Enerji Atlası, 2025). Ayrıca, Van'ın yüksek güneşlenme potansiyeli göz önüne alındığında, bölgedeki yenilenebilir enerji yatırımları için büyük bir fırsat sunmaktadır .

Üniversite yönetimi, Zeve Kampüsü'nde 6×999 kW kapasiteli yeni bir GES kurulumu için ihale ilanı yayımlamış ve kapasite artışı planlarını duyurmuştur (Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 2024). Bu girişim, hem kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamakta hem de bölgesel yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etmektedir.

BULGULAR

Günümüzde kentleşmenin hızla artması, ulaşım altyapılarına yönelik talepleri çeşitlendirmiş ve şehirlerin planlama anlayışlarını köklü biçimde değiştirmiştir. Kentlerdeki nüfus artışı, bireysel araç sahipliğinin çoğalması, plansız büyüme ve toplu taşımanın yeterince gelişmemesi; trafik sıkışıklığı, çevresel bozulma ve enerji verimsizliği gibi çok boyutlu sorunları beraberinde getirmiştir. Bu çerçevede, ulaşım artık yalnızca fiziksel bir hareketlilik eylemi değil, aynı zamanda kentlerin sürdürülebilir kalkınma düzeyini belirleyen temel bir gösterge hâline gelmiştir.

Elde edilen bulgular, gelişmiş kentlerde ulaşım planlamasının yalnızca yol yapımına odaklanmadığını; erişilebilirlik, çevre dostu sistemler, enerji verimliliği ve toplumsal refah gibi ölçütleri merkeze aldığını göstermektedir. Bu bağlamda, toplu taşımanın en gelişmiş biçimlerinden biri olan **raylı sistemler**, çevresel etkileri azaltan, güvenli ve uzun vadede ekonomik çözüm sunan sistemler olarak öne çıkmaktadır.

Van kenti özelinde yapılan analizlerde, kentin son yıllarda hızla büyüyen sosyoekonomik yapısının ulaşım üzerinde önemli baskılar oluşturduğu belirlenmiştir. Van, Doğu Anadolu Bölgesi'nin eğitim, kültür ve turizm açısından öne çıkan şehirlerinden biri olarak hem iç göç hem de öğrenci hareketliliği nedeniyle artan bir mobiliteye sahiptir. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (YYÜ) ise bu mobilitenin merkezinde yer almakta, her gün on binlerce öğrenciyi, hastayı ve akademik, idari personeli çalışanları kampüs alanına taşımaktadır. Mevcut ulaşım biçiminin büyük oranda karayolu tabanlı olması, zaman kayıplarına, gürültü ve hava kirliliğine, ayrıca güvenlik sorunlarına yol açmaktadır.

Araştırmada elde edilen en kritik bulgu, kampüs içi ve çevresindeki ulaşımın konvansiyonel yöntemlerle çözilemeyeceği; bunun yerine entegre, sürdürülebilir bir raylı sistem altyapısına ihtiyaç duyulduğudur. Hafif raylı sistemlerin kampüs ölçeğinde uygulanması hem öğrenciler hem de çalışanlar için konforlu ve güvenli ulaşım sunmakta, hem de çevresel etkileri minimize etmektedir.

Araştırmanın amacı, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi yerleşkesinde elektrikli hafif raylı sistemin uygulanabilirliğini teknik, ekonomik ve çevresel açılardan

değerlendirmektir. Bulgular, bu sistemin yalnızca bir ulaşım aracı değil, aynı zamanda sürdürülebilir kampüs yönetimi anlayışının bir parçası olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizlerde, mevcut ulaşım sisteminin taşıma kapasitesinin kampüs kullanıcı sayısına oranla yetersiz olduğu; araç trafiğinin sabah ve akşam saatlerinde yoğunlaştığı; buna bağlı olarak yakıt tüketimi, gürültü ve hava kirliliğinin arttığı tespit edilmiştir. Raylı sistemin devreye alınmasıyla birlikte, kampüsün farklı bölümlerinde seyahat sürelerinin %40'a kadar azalacağı; araç kullanımının azalmasıyla karbon salınımının da belirgin biçimde düşeceği öngörülmektedir.

Ekonomik açıdan yapılan değerlendirmelerde ise, ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen işletme ve bakım maliyetlerinin uzun vadede düşük olduğu; sistemin 10 yıl içerisinde kendi yatırımını amorti edebileceği hesaplanmıştır. Sosyal fayda analizleri, sistemin kullanıcı memnuniyeti, erişim kolaylığı ve güvenlik açısından olumlu karşılandığını göstermektedir.

Sistemin yapısına ilişkin teknik incelemeler, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüsünde uygulanacak hafif raylı sistemin hem mühendislik hem de operasyonel açıdan elverişli olduğunu göstermektedir. Planlanan sistem, düşük tabanlı araçlar, kısa peron mesafeleri ve sinyal öncelikli geçişler sayesinde kampüs içi hareketliliği düzenlemeyi hedeflemektedir.

Araştırma verileri, kampüsün topografyasının %3'ün altında eğim değerlerine sahip olduğunu; bu nedenle raylı sistem kurulumu için ek zemin güçlendirmesine gerek olmadığını ortaya koymuştur. Ortalama yürüme mesafesinin 1000–2000 m arasında olması, durak konumlarının stratejik biçimde yerleştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Sistem, karayolu trafiğini %40 oranında azaltarak kampüs çevresindeki yoğunluğu düşürecek; buna paralel olarak gürültü ve hava kirliliğinde ölçülebilir bir iyileşme sağlayacaktır. Ayrıca, sinyalizasyon sisteminin raylı araçlara öncelik tanıyacak biçimde düzenlenmesi, trafik akışını kesintisiz hale getirecektir.

SONUÇ

Giriş bölümünden çıkan sonuçlara göre, ulaşım yalnızca fiziksel bir ağ değil, aynı zamanda kentsel yaşam kalitesini belirleyen stratejik bir araçtır. Van kentinde yaşanan hızlı nüfus artışı ve ulaşım altyapısının mevcut yetersizlikleri, kent içi hareketliliğin sürdürülebilir biçimde yönetilmesini zorlaştırmaktadır. Bu noktada, raylı sistemlerin devreye alınması kentin gelecekteki büyüme senaryosuna uyum sağlayacak bir çözüm sunmaktadır.

Raylı sistemlerin uygulanmasıyla birlikte, bireysel araç kullanımında azalma, hava kalitesinde iyileşme, enerji tüketiminde düşüş ve gürültü kirliliğinde azalma beklenmektedir. Ayrıca toplu taşımaya olan güvenin artması, kentsel ulaşım kültüründe de dönüşüm yaratacaktır. Özellikle üniversite yerleşkesinde, hafif raylı sistemin uygulanmasıyla ulaşım verimliliği, güvenlik ve erişilebilirlik arasında bütünlük bir denge kurulacaktır.

Bu sonuçlar, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi örneğinin yalnızca yerel değil, ulusal ölçekte de örnek teşkil edebileceğini; Türkiye’deki diğer üniversite kampüsleri için model olabileceğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın temel sonucu, hafif raylı sistemin Van YYÜ kampüsünde uygulanabilirliğinin **yüksek** olduğu yönündedir. Proje; maliyet, güzergâh, enerji kullanımı ve çevresel etki kriterleri açısından sürdürülebilir ulaşım ilkeleriyle uyum göstermektedir.

Raylı sistem projesi, kısa vadede kampüs içi ulaşım sorunlarına çözüm getirirken, uzun vadede Van kentinin ulaşım omurgasına entegre olabilecek bir potansiyel taşımaktadır. Ayrıca projenin üniversite bünyesinde çevre bilinci, enerji verimliliği ve planlı ulaşım anlayışını teşvik edeceği beklenmektedir.

Sistem, akademik ve idari birimler arası erişimi kolaylaştırarak iş verimliliğini artıracak, kampüsün kentsel imajını güçlendirecektir.

Bu veriler ışığında, Van YYÜ kampüsünde önerilen sistemin modern, çevreci ve teknik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bakım ve işletme kolaylığı, sistemin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, tek merkezden yönetilen kamera ve sinyalizasyon altyapısı, güvenliği artırmakta ve sefer düzenliliğini garanti etmektedir.

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde hafif raylı sistemin hayata geçirilmesi, yalnızca ulaşım verimliliğini artırmakla kalmayacak; aynı zamanda üniversiteye ekonomik, sosyal ve çevresel anlamda önemli katkılar sağlayacaktır. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, sistemin enerji ihtiyacının büyük oranda kampüs içerisindeki GES (Güneş Enerjisi Sistemi) ile karşılanması, uzun vadede işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Ayrıca, üniversitenin döner sermaye bütçesine raylı sistem gelirlerinin eklenmesi, kendi kendine yeten bir ulaşım altyapısı modeli oluşturacaktır.

Raylı sistem işletmeciliği; enerji verimliliği, düşük emisyon değeri, yüksek kapasite, uzun ömürlü altyapı ve ekonomik istikrar özellikleriyle sürdürülebilir kentsel ulaşım politikalarının temelini oluşturmaktadır. Özellikle Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (YYÜ) kampüsünde uygulanabilir bir hafif raylı sistem projesi, sadece ulaşım sorunlarını çözmekle kalmayacak, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve çevresel anlamda önemli katkılar sağlayacaktır.

YYÜ hafif raylı sistem projesi, yüksek başlangıç yatırım maliyetine karşın düşük işletme giderleri ve enerji tasarrufu sayesinde uzun vadede kendi kendini finanse edebilecek sürdürülebilir bir yapıya sahiptir. Proje kapsamında kampüs içi servis araçlarına yönelik yakıt, bakım ve personel harcamalarının azalması, üniversite bütçesinin akademik ve teknik alanlardaki gelişmelere yönlendirilmesini mümkün kılacaktır. Bunun yanı sıra, sistemin inşaat, işletme ve bakım aşamalarında mühendis, tekniker, teknisyen ve ulaşım planlama uzmanı istihdam edilmesi, bölgesel ekonomiye doğrudan katkı sağlayacaktır. Üniversite-sanayi iş birliklerinin güçlenmesiyle yerel üretim ve tedarik zincirleri canlanacak, döner sermaye gelirlerinde artış gözlenecektir. Ayrıca bu süreç, YYÜ öğrencileri için uygulamalı eğitim ve staj imkânlarını genişleterek akademik bilgi ile pratik deneyim arasındaki bağı pekiştirecek, üniversitenin bölgesel kalkınmadaki rolünü güçlendirecektir.

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Yerleşkesi'nin geniş mekânsal yapısı, kampüs içi ulaşım açısından önemli bir gereksinim doğurmaktadır. Yaklaşık 85 km²'lik bir alana sahip olan kampüsün bir ucundan diğer ucuna yaklaşık 12 km'lik mesafe bulunması, öğrencilerin, akademik ve idari personelin günlük erişim süreçlerinde zaman kaybı ve ulaşım zorlukları yaşamasına neden olmaktadır. Bu bağlamda önerilen hafif raylı sistem projesi, kampüs içerisindeki laboratuvar, kütüphane, fakülteler, rektörlük

birimleri, Dursun Odabaş Tıp Merkezi, Diş Hekimliği Fakültesi ve Hayvan Hastanesi gibi önemli odak noktalarına erişimi daha konforlu, hızlı ve emniyetli hale getirecektir. Sistem, kampüsün dağınık yerleşim düzeninde bütünlük sağlayarak akademik işleyişin verimliliğini artıracak, öğrencilerin ve personelin ulaşım konforunu yükseltecektir. Ayrıca bu ulaşım çözümü, YYÜ'nün çağdaş, erişilebilir ve çevreci bir üniversite kimliği kazanmasına katkı sunacaktır.



ÖNERİLER

Kampüs içi ulaşım sisteminin veri temelli planlanması önerilmektedir. Günlük yolcu hareketleri, güzergâh yoğunlukları ve zaman dilimleri düzenli olarak analiz edilmelidir.

Raylı sistemin şehirle entegrasyonu uzun vadede planlanmalı; kampüs hattı, şehir merkezine ve kentin Edremit ilçesine uzatılacak şekilde modüler biçimde geliştirilmeli, böylece bütüncül bir kent içi ağ oluşturulmalıdır.

Enerji verimliliği öncelikli olmalıdır. GES (Güneş Enerjisi Sistemi) entegrasyonu ile raylı sistemin enerji ihtiyacı kampüs içinde sürdürülebilir biçimde sağlanmalıdır.

Kampüs içi yaya ve bisiklet ağları, raylı sistemle daha konforlu ve teknolojik şekilde güçlendirilmelidir.

Kullanıcı memnuniyet analizleri, sistem devreye alındıktan sonra periyodik olarak yapılmalı; öğrenci ve personel geri bildirimleri değerlendirilmelidir.

Teknik etüt ve fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Hat uzunluğu, eğitim, durak konumları, altyapı dayanımı ve yolcu talebi parametreleri alanında uzman mühendisler tarafından hesaplanmalıdır.

Finansman modelleri çeşitlendirilmeli, kamu-özel sektör iş birliği (PPP) veya Büyükşehir Belediye Başkanlığı, Valilik, VANTSO(Van Sanayi ve Ticaret Odası) ve üniversite-sanayi ortaklıkları üzerinden kaynak ve sübvansiyonlar sağlanmalıdır.

Sistem tasarımı enerjisi yenilenebilir enerji olmalıdır. Kampüs alanında mevcut olan GES hattından trafo merkezine depolama yapılarak enerji gereksinimi bu kaynakla karşılanmalıdır. Van YYÜ'nün döner sermaye hesabına katkı sağlanması da hedeflenmelidir.

Sosyal etki analizleri, uygulama öncesinde yapılmalı; öğrencilerin, akademik, idari personellerin ve çevre sakinlerinin görüşleri alınmalıdır.

Uzun vadede şehir merkezine uzanan hat planı hazırlanmalı, kampüs içi sistem bu omurgaya entegre edilebilecek biçimde tasarlanmalıdır.

Araç filosu seçimi kampüsün kapasitesine uygun olmalıdır. 2,5 m genişliğinde, düşük tabanlı, enerji verimliliği yüksek araçlar tercih edilmelidir.

Depo ve bakım alanı, güzergâha en yakın ve teknik olarak uygun bölgede konumlandırılmalıdır.

Sinyalizasyon sistemi, araç öncelikli şekilde kurgulanmalı; aynı zamanda yaya geçitlerinde görsel ve sesli uyarı sistemleri kurulmalıdır.

Kampüs trafiğiyle entegrasyon, minibüs ve otobüs seferlerinin azaltılması yoluyla sağlanmalı; böylece raylı sistem kullanım oranı artırılmalıdır.

Trafik izleme merkezi kurulmalı; güzergâh üzerindeki trafik, enerji tüketimi ve araç performansları sürekli olarak izlenmelidir.

İlk etapta YYÜ kampüsünde 3–5 km’lik kısa bir hatta elektrikli hafif raylı sistemin pilot olarak uygulanması önerilmektedir.

Güneş enerjisi santrali (GES) ile raylı sistemin enerji ihtiyacı bütünleştirilmeli; böylece işletme maliyetleri düşürülmelidir.

Kamu–özel sektör ortaklığı (PPP) modeliyle yatırım maliyeti paylaşılabilir; üniversite gelirleri döner sermaye kapsamında işletmeye aktarılabilir.

Kampüs içi bisiklet yolları, yaya aksları ve elektrikli servis araçlarıyla raylı sistem entegre edilmelidir.

Dijital teknolojilerle bakım ve işletme süreçleri dijitalleştirilmeli, verimlilik izlenebilir hale getirilmelidir.

Uzun vadede Van şehir merkezine uzanan bir hat planlanarak, üniversitenin kentle bütünleşmesi sağlanmalıdır.

Bu çalışmada ulaşılan bulgular doğrultusunda, Yüzüncü Yıl Üniversitesi hafif raylı sistem projesinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmesi için farklı yöntem ve analiz yaklaşımlarının bir arada kullanılması önerilmektedir. Öncelikle, kampüsün geniş yüzölçümü ve karmaşık mekânsal yapısı dikkate alınarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı mekânsal analizlerin yapılması önerilir. Bu yöntem,

güzergâh seçimi, istasyon yerleşimi ve erişilebilirlik düzeylerinin nesnel verilerle belirlenmesine olanak sağlayacaktır.

Ayrıca, öğrenciler, akademik ve idari personel gibi kullanıcı gruplarının ulaşım alışkanlıklarını ve beklentilerini belirlemek amacıyla anket ve kullanıcı memnuniyeti analizlerinin uygulanması önemlidir. Elde edilen veriler faktör veya regresyon analizleriyle desteklenerek, kullanıcıların öncelik verdiği konfor, güvenlik ve zaman tasarrufu gibi unsurlar sayısal olarak ortaya konulabilir.

Ekonomik açıdan, sistemin yatırım ve işletme maliyetleri ile sağladığı faydaların karşılaştırılması için fayda–maliyet analizi (Cost–Benefit Analysis) yapılması önerilmektedir.

Raylı sistem türleri arasında metro, hafif raylı sistem, monoray ve finiküler sistemler bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında tercih edilen sistem türü hafif raylı sistemdir. Üstyapı açısından değerlendirildiğinde, raylı sistemlerde balastlı ve balastsız olmak üzere iki temel üstyapı tipi bulunmaktadır. Balastsız sistemlerde beton veya asfalt zemin tercih edilmektedir. Bu bağlamda, proje kapsamında “beton traversli balastsız üstyapı sistemi” uygun görülmüştür.

Ayrıca, elektrik enerjisi temini açısından sistemlerde katener (havai hat), pantograf ve seyir teli gibi unsurlar kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda geliştirilen bataryalı elektrikli araç sistemleri, bu unsurlara olan gereksinimi ortadan kaldırmakta ve enerji beslemesinin araç üzerindeki bataryalardan sağlanmasına olanak tanımaktadır.

KAYNAKÇA

- Abbasgil, E. (1994). *İstanbul'daki Toplu Taşımacılık Kapsamında Raylı Sistemlerin Değerlendirmesi (Esenler-Aksaray Hızlı Tramvay Örneği)*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, S.B.E, İstanbul.
- Akagündüz, Ü. (2016). *Demiryollarının Dünyadaki Gelişimi ve Bu Gelişimin Türkiye'ye İlk Yansımaları*. Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi.
- Akkaya, D., & Kızıлтаş, M. (2022). *Ulaştırmanın Kentleşme Üzerine Etkisinin Kent İçi Ulaştırmada Türel Dağılıma Göre Analiz Edilmesi*. Araştırma Makalesi.
- Alkaşı, S, Açıkbaş, S. (2006). *Şehir içi Raylı Ulaşımında Gerilim Sistemleri ve Enerji İletim Sistemleri*, Uluslararası Demiryolu Sempozyumu, Ankara, İstanbul.
- Altenberger, J., & Schütz, M. (2018). *Innovative elastic track systems for high-speed and urban railways*. Springer.
- Altınok, S. (2001). *Türkiye'de Ulaştırma Politikaları, Karayolları ve Demiryollarının Mukayesesi*. Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi.
- Arlı, V. (2019). *Demiryolu mühendisliği*. Ankara: Birsan Yayınevi.
- Arslan, O. (2019). *Kaliteli Bir Toplu Taşıma Sistemi Nasıl Olmalıdır*, Münih Örneği.
- Aydın, Ö. L., Kuşkapan, E., & Çodur, M. Y. (2021). *Erzurum ili hafif raylı sistem güzergâhının zemin emniyeti açısından yeterliliğinin araştırılması*. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 45(1), 41–66.
- Bautista, J., Montesinos, P., & Pintado, R. (2016). *Dinamik etkileşim: Pantograf ve rijit üst hatlar arasındaki bağlantı*.
- Bektaş, M. (2022). *Türkiye'de yapılan ara toplu taşıma (minibüs) sistemlerinden toplu taşıma (otobüs) sistemlerine dönüşüm ve ülkemiz için yönetmelik önerisi hazırlanması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, L.E.E, İstanbul.
- Berke, O. (1972). *Demir Yolu Üstyapı Tekniği*, TCDD Basımevi.
- Berger, A. (2010). *Kent ulaşımı ve toplu taşıma sistemleri*. Springer.
- Berger, P. (2010). *The evolution of urban tramways*. Transportation Journal,

- Beirão, G., Sarsfield Cabral, J. A. (2007). *Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study*. Transport Policy.
- Bozkurt, M. (1989). *Demiryolu I*, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Cağman, H., Yıldırım, M., & Ersoy, T. (2022). *Kent içi raylı sistemlerin enerji verimliliği ve çevresel etkileri*. Journal of Sustainable Transport, 12(4), 221–238.
- Chattopadhyay, D., & Ashok, B. (2013). *Railway engineering and electrification*. New Delhi: PHI Learning.
- Deniz, S. (2021). *Raylı sistem fizibilite çalışmaları ve topografyanın etkisi*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayını.
- Deutsche Bahn. (2019). *High-speed rail infrastructure: Innovations in ballastless track systems*. Berlin: Deutsche Bahn AG.
- Düzgaya, F. (2016). *Türkiye’de hafif raylı sistemler ve uygulama örnekleri*. İstanbul: Ulaştırma Araştırma Merkezi.
- Ekin, N. (2007). *Demiryolu altyapı sistemleri ve zemin mühendisliği*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Erel, A. (2002). *Yıldız Teknik Üniversitesi, Ankara metrosu 3. aşama işleri için rijit üstyapı seçeneklerinin araştırılması raporu*.
- Erel, H. (2008). *Ulaşım altyapı işlerinin sınıflandırılması ve mühendislik uygulamaları*. İstanbul: Teknik Yayıncılık.
- Esvel, C. (2001). *Modern railway track (5th ed.)*. Utrecht: MRT-Productions.
- Evren, G. & Dünder, S. (1996). *Kentsel Ulaşımında Raylı sistemler. Türkiye Mühendislik Haberleri Raylı Ulaşım*, TMMOB İnşaat Müh. Odası.
- Gökdağ, M., & Yüksel, F. (1999). *Enerji Verimliliği Açısından Demiryollarının Önemi ve Geliştirilmesi*. Ulusal Enerji Verimliliği, Ankara.

- Görçün, Ö. F. (2018). *Kent İçi Ulaşım Sistemlerine İlişkin Tercihlerin ve Tercihlere Etki Eden Faktörlerin Analitik Hiyerarşi Prosesi Yöntemi İle Değerlendirilmesi*. Kent Akademisi.
- Goodland, R. (2002). Sustainability: *Human, Social, Economic and Environmental, in Encyclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons, Ltd, U.S.A.
- Gourvish, T. (1995). *Railways and the Industrial Revolution*. London: Macmillan Press.
- Gourvish, T. R. (1980). *Britanya ekonomisi ve demiryolları, 1830–1914*. Macmillan.
- Gültekin, F., Kırmızı, Y., & Yağmur, M. (2003). *Monoray sistemlerinin kent içi ulaşımında uygulanabilirliği*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
- Gündoğdu, F., & Söylemez, H. (2005). *Demiryolu sinyalizasyon sistemlerinde tasarım kriterleri ve...* Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi.
- Hayırhoğlu, M. (2017). *Toplu Ulaşım Sistemlerinin Faydaları*. Demiryolu Mühendisliği.
- Ishida, Y. (2008). *Shinkansen track construction: Prefabricated slab systems and applications*. Tokyo: Japan Railway Technical Research Institute.
- Ishida, Y. (2012). *Shinkansen track maintenance and vibration control measures*. Tokyo: Japan Railway Technical Research Institute.
- İETT. (2023). *Toplu ulaşım istatistikleri 2022*. İstanbul: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü.
- İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ). (2020). *Rail Systems Report 2020*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- İstanbul Ulaşım A.Ş. (2023). *Metro İstanbul raylı sistem işletme raporu*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Dairesi Başkanlığı Yayınları.

- Kasımoğlu, E. (2015). *Tramvay İstasyonlarında Tasarım ve Güvenlik Esaslarının Araştırılması İstanbul T1 Tramvay Hattı İncelemesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, F. B. E.
- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2009). *Elektrikli demiryolları için temas hatları: Planlama, tasarım, uygulama, bakım*. Publicis Corporate Publishing.
- Kırmızı, Y., vd. (2012). *Banliyö sistemlerinin ulaşım planlamasındaki önemi*. Ankara: Gazi Üniversitesi Yayınları.
- Kızılay, R. (2022). *Orta ölçekli kentlerde raylı sistem projeleri ve toplumsal etkileri*. Ankara: Ulaştırma Politikaları Araştırma Merkezi.
- Köseoğlu, T. (2021a). *Kentsel raylı sistemlerde operasyon kontrol merkezlerinin rolü*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği ABD.
- Köseoğlu, T. (2021b). *Raylı sistemlerin kentsel gelişim üzerindeki etkileri*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği ABD.
- Köseoğlu, T. (2021c). *Raylı sistemlerin kentsel ekonomiye etkileri: Ankara Metrosu örneği*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği ABD.
- Laman, M., Yıldız, A., Örnek, M., & Demir, A. (2008). *Zeminlerin mekanik davranışının modellenmesi*. İstanbul: Teorik ve Uygulamalı Mekanik Türk Milli Komitesi Yayınları.
- Litman, T. (2021). *Sustainable transportation policies and rail transit*. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org>
- Litman, T. (2021). *Ulaşım maliyet ve faydalarının analizi: Teknikler, tahminler ve sonuçlar*. Victoria Ulaşım Politikası Enstitüsü.
- Max Bögl. (2018). *FF Bögl prefabricated track system: Technical specifications and field applications*. Neumarkt: Max Bögl GmbH & Co. KG.
- MEB. (n.d.). *Demiryolu makaslar*. https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Makaslar.pdf

- Miser, S. (2019). *Osmanlı'dan Cumhuriyet'e Demiryolu Politikaları*, Süleyman Demirel Üniversitesi. SBE.
- Müller, K. (1990). *Experimental ballastless track constructions in Germany*. Berlin: Deutsches Eisenbahn-Institut.
- ÖBB. (1992). *Ballastless track systems in Austria: ÖBB experience*. Vienna: Österreichische Bundesbahnen.
- Özden, A. (2012). *Türkiye’de hafif raylı sistemler: Yatırım ve planlama analizi*. Journal of Urban Transport, 10(3), 101–118.
- Özalp, O. (2008). *Kentiçi Raylı Sistemlerin Üstyapısı ve Dinamik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özmen, İ. (2014). *750 V DC cer gücü tedarik sisteminin bilgisayar simülasyonu*. İstanbul: İTÜ (Yüksek Lisans Tezi).
- Öztürk, Z., & Arlı, V. (2009). *Demiryolu mühendisliği*. İstanbul: Sembol Basım Baskı Sistemleri Matbaa ve Yayıncılık.
- Park, K. S. (2017). *High-speed railway electrification: Design and operational challenges*. London: ICE Publishing.
- Patterson, M. G. (1996). *What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues*. Energy Policy.
- Pektaş,İ.(2017). *Türkiye’de Raylı Ulaşım Sistemlerinin Gelişimi*, Demiryolu Mühendisliği.
- Porr. (1992). *Modurail test track: Technical report on prefabricated track solutions*. Vienna: Porr AG.
- Profillidis, V. A. (1995). *Railway engineering: Planning, design and operation*. London: Ashgate Publishing.
- Pucher, J., & Buehler, R. (2012). *City cycling and transit integration in Europe*. Transport Reviews, 32(3), 443–464.
- Railway-Fasteners. (n.d.). *Types of railroad switch*. <https://www.rail-fastener.com/>

- Reis, C., & Birinci, F. (2020). *University campus transit systems*: Global examples. International Journal of Transportation Science and Technology, 9(2), 75–88.
- Schmidt, H. (2015). *Demiryolu balastsız üstyapı sistemleri ve asfalt uygulamaları*. Berlin: Eisenbahn Fachverlag.
- Sevil, E. (2018). *Raylı sistemlerde kullanılan üstyapı elemanları*. Karabük: Karabük Üniversitesi Yayınları.
- Siemens Mobility. (2019). *Overhead contact line technology*: Systems and components for urban and mainline railways. Siemens AG.
- Smith, J. (1993). *High-speed rail systems in Europe and Asia*. London: Railway Technical Press.
- Smith, M. R. (2002). *Devrimi mühendislik: Buhar gücü ve modern ulaşım*. Routledge.
- Smith, R. (2002). *The development of steam locomotives and railroads*. London: Routledge.
- Srivastava, J., Singh, V. K., & Singhal, A. (2013, Kasım). *Demiryolu çekiş gücü tedarik sistemi incelemesi*. Çevre Bilimi Bilgisayar Bilimi ve Mühendisliği ve Teknolojisi Dergisi, BNCulge of Engineering & Technology, Lucknow; SR Kurumlar Grubu; Sagar Bilim ve Teknoloji Enstitüleri.
- Söylemez, M. T., & Açıkbaş, S. (2005). *Comparison of stray currents and rail voltage profiles between 750VDC and 1500VDC power supply systems using simulation*. IEE Int. Conf. on Railway Engineering (ICRE 2005), Hong Kong, Bildiri No: B5-2.
- Tan, X.-M., Xie, P.-P., Yang, Z.-G., & Gao, J.-Y. (2019). *Pantograf aerodinamik gürültüsünün simülasyonu için türbülans modellerinin uyarlanabilirliği*. Shock and Vibration, 2019, Makale No. 6405809, 1–20.
- Tekeli, İ., & İlhan, A. (2015). *Türkiye’de kentleşme ve ulaşım politikaları: 2000 sonrası dönem*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları.

- Toprak, R., & Aktürk, N. (2001). *Raylı Ulaşım Sistemlerinin Neden Olduğu Çevresel Gürültü*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası İstanbul'da Kent İçi Ulaşım Sempozyumu, İstanbul.
- Toprak, R., & Aktürk, N. (2002). *Raylı Ulaşım Sistemlerinin Neden Olduğu Gürültü ve Çevresel Etkileri*. T. Mühendislik Haberleri.
- Toprak, S., & Aktürk, T. (2001). *Hafif raylı sistemler: Teknik özellikler ve uygulama alanları*. İstanbul: Ulaşım Mühendisliği Yayınları.
- Tokuda, H. (2015). *Development and implementation of ballastless track systems in Shinkansen high-speed rail*. Tokyo: Japan Railway Technical Research Institute.
- TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları). (2020a). *Raylı sistemler işletme standartları kılavuzu*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları.
- TCDD. (2020b). *Raylı sistemlerde enerji yönetimi ve karbon ayak izi raporu*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları.
- TCDD. (2020c). *Raylı sistemlerde enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik raporu*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları.
- TCDD. (2020d). *Raylı sistemlerde yolcu konforu ve işletme standartları kılavuzu*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları.
- TCDD. (2020). *Demiryolu taşımacılığı ve raylı sistemler: Teknoloji ve performans raporu*. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Yayınları.
- TCDD. (2021). *Demiryolu emniyet yönetim sistemi uygulama rehberi*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları.
- TCDD. (2021). *Raylı sistem taşıtlarının sınıflandırılması ve teknik özellikleri*. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Yayınları.
- Tüfekçi, S. (2019). *Kent içi ulaşımın çevresel etkileri ve raylı sistemlerin rolü*. Journal of Environmental Transport

- UAB (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı). (2011). *Ulaşım Ana Plan Stratejisi*. Ankara: Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayını.
- UAB (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı). (2019). *Kentsel raylı sistemlerin planlama ve işletme rehberi*. Ankara: Resmî Yayınlar.
- UAB. (2021a). *Kentsel ulaşımnda çevresel sürdürülebilirlik strateji belgesi*. Ankara: Resmî Yayınlar.
- UAB. (2021b). *Kentsel raylı sistemler ekonomik değerlendirme rehberi*. Ankara: Resmî Yayınlar.
- UAB. (2021c). *Kent içi ulaşımnda kullanıcı memnuniyeti ve konfor göstergeleri raporu*. Ankara: Resmî Yayınlar.
- UAB. (2021d). *Kent içi ulaşımnda enerji verimliliği strateji belgesi*. Ankara: Resmî Yayınlar.
- Uçar, G. (2020). *Raylı sistem yatırımlarının mekânsal ve sosyoekonomik yapıya etkisi üzerine bir inceleme: İzmir İZBAN örneği*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uçar, M. (2020). *Elektrikli raylı sistemlerin kampüslerde uygulanabilirliği*. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Uluskan, S. (2023). *Demiryolu mühendisliği* (Dergipark).
- Uluskan, S., & Atam, A. R. (2023). *Raylı sistem elektrifikasyonu katener sistemlerinde pandül verilerinin yapay sinir ağları ile tasarlanması*. Demiryolu Mühendisliği (Railway Engineering), 17, 161–173.
- UITP. (2019). *Urban rail and carbon emissions reduction. Brussels: International Association of Public Transport*. <https://www.uitp.org>
- UIC. (2019). *Urban rail transit systems and technologies*. International Union of Railways.
- UIC. (2020). *Railway electrification and overhead line systems*. International Union of Railways.

- Van Büyükşehir Belediyesi. (t.y.). **Otobüs hatları 540, 541, 542 numaralı güzergâhlar**. <https://van.bel.tr/OtobusSaatDetay>
- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. (t.y.-a). **Yerleşkemiz hakkında genel bilgiler**. <https://www.yyu.edu.tr/Birimler/874/sayfalar/7711>
- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. (t.y.-b). **Ulaşım bilgileri**. <https://www.yyu.edu.tr/Birimler/946/sayfalar/9698>
- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. (t.y.-c). **Kampüs servisleri duyurusu**. <https://www.yyu.edu.tr/>
- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. (t.y.-d). **Kampüs içi ulaşım ve çevre düzeni**. <https://www.yyu.edu.tr/>
- Van YYÜ Rektörlüğü Basın Bülteni. (2023). **Kış hazırlıkları ve ulaşım düzenlemeleri**. Van YYÜ Basın Yayın Müdürlüğü.
- Vuchic, V. (2007). **Urban transit: Operations, planning, and economics (2nd ed.)**. Hoboken, NJ: Wiley.
- Vuchic, V. R. (2007). **Urban transit systems and technology**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- White, P. (2002). **Public transport: Its planning, management and operation (4th ed.)**. London: Routledge.
- Wikipedia. (n.d.). **Makas (demiryolu)**. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Makas_\(demiryolu\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Makas_(demiryolu))
- Yıldız, L. (2020). **Toplu taşıma sistemlerinde kullanıcı deneyimi ve konfor algısının incelenmesi**. Şehir ve Ulaşım Dergisi.
- Yıldız, L., & Aydın, M. (2019). **Raylı sistemler ve lastik tekerlekli ulaşım sistemlerinin çevresel etkilerinin karşılaştırılması**. Mimarlık ve Planlama Dergisi.
- Yıldız, L., & Aydın, M. (2020). **Raylı ve lastik tekerlekli ulaşım sistemlerinin enerji performans karşılaştırması**. Mimarlık ve Planlama Dergisi.

YYRail. (2021). *Types and structure of railroad turnouts*. <https://www.yyrail.com/>

Zdziebko, P., Martowicz, A., & Uhl, T. (2018, Haziran). *Eş-simülasyonlar kullanılarak yüksek hızlı bir pantograf için aktif kontrol stratejisi üzerine bir araştırma*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ARVAS, Mehmet
Uyruğu : TC
ORCID : 0009-0001-7763-3127

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora		
Yüksek Lisans	Van YYÜ/Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Yönetimi (YI) (Tezsiz)	08.07.2024
Lisans	İşletme Fakültesi	09.06.2014

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	TEDAŞ	Harita Teknikeri
2013-2014	DSİ	Harita Teknikeri
2014-2023	TCDD	Şube Müdürü
2023-	VAN YYÜ	Genel Sekreter Yrd.

Yabancı Dil

Yayınlar

Hobiler



T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
Sosyal Bilimler Enstitüsü



Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu

Öğrenci Bilgileri	
Adı-Soyadı	Mehmet ARVAS
Öğrenci No	24920025058
Anabilim Dalı	İşletme Yönetimi Anabilim Dalı
Programı	İşletme Yönetimi
Statüsü	☐ Yüksek Lisans ☐ Doktora

Tez Bilgileri	
Başlığı/Konusu	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Hafif Raylı Sistem Projesinin Yapılabilirlik Çalışması

Tez Orijinallik Raporu Bilgileri*	
Sayfa Sayısı (Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümleri)	160
İntihal Tespit Programı	Turnitin
Benzerlik Oranı (%)	8
Tarih	07.11.2025

*** Orijinallik raporu, aşağıdaki filtreler kullanılarak oluşturulmuştur:**

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit match size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi İnceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içemediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimizi ve yukarıda vermiş olduğumuz bilgilerin doğru olduğunu beyan ederiz.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

Danışman		Öğrenci
Adı Soyadı	Dr.Öğr.Üyesi Ayhan CESUR	Mehmet ARVAS
İmza		
		Tarih 07.11.2025