

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE KÖPRÜ İLE BALASTSIZ ÜSTYAPI GEÇİŞ
BÖLGELERİNİN İRDELENMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fahrettin Ersin ERBAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE KÖPRÜ İLE BALASTSIZ ÜSTYAPI GEÇİŞ
BÖLGELERİNİN İRDELENMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fahrettin Ersin ERBAŞ
(501111410)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111410 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fahrettin Ersin ERBAŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE KÖPRÜ İLE BALASTSIZ ÜSTYAPI GEÇİŞ BÖLGELERİNİN İRDELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Güzin AKYILDIZ ALÇURA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 15 Aralık 2017





Eşime ve Aileme,



ÖNSÖZ

İnşaat mühendisliği eğitime başlamam ile beraber ulaştırma mühendisliği konularına olan ilgim eğitimim boyunca her geçen sene daha da artmıştır. Bu ilgi ve farkındalık çalışma hayatımda raylı sistemler konularına yönelmeme sebep olmuştur. Demiryolu projelerinde görev aldığım ilk günden bu yana, çalıştığım mühendislik dalının ne kadar gelişime açık ve insan hayatı ile kesişen bir dal olduğunu gözlemlemekteyim. 19. yüzyıldan bu güne demiryolları hem ülkemizde hem de dünyada sürekli yeniliklere tanıklık etmektedir. İlham verici olan; demiryollarının devamlı olarak teknolojik gelişimlerden faydalanarak insan yaşamını daha yaşanılır kılmayı amaçlamasıdır.

Son yıllarda hem ülkemizde hem de dünyada bir çok yeni demiryolu projesi yapılmaya ve planlanmaya devam etmektedir. Özellikle artan karayolu trafiği ve trafikte harcanan uzun süreler, buna bağlı olarak artan çevre kirliliği dünyanın her yerinde raylı sistemleri vazgeçilmez kılmaktadır. Raylı sistemlerin yaygınlaşması ile beraber bu sistem içinde karşılaşılan sorunlar da doğru orantılı olarak artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında demiryolu sistemlerinin yapısı, balastlı ve balastsız üstyapı tipleri, kent içi raylı sistemler ve bu sistemlerin köprü geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ve çözüm yöntemleri incelenmiştir.

Yaptığım bu çalışma boyunca değerli fikirlerini ve desteklerini benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren, çok değerli ve saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her koşulda yanımda olan ve beni destekleyen annem Nevin ERBAŞ, babam Ali ERBAŞ ve kardeşlerime minnetlerimi sunarım. Her türlü zorlukta bana verdiği manevi destekle bu tezi yazmamda büyük katkısı olan değerli eşim Olga ERBAŞ'a şükranlarımı sunarım.

Tez boyunca benden katkılarını ve anlayışını esirgemeyen değerli mesai arkadaşım Burhan ERDİL'e, yüksek lisansa başlamama vesile olan kıymetli hocam Öğr. Gör. Dr. A. Faik İYİNAM'a, mesleki gelişimimde bana önemli katkılarda bulunan değerli şeflerim Necati ELBAŞI ve Abdullah ŞAHİN'e ve bütün çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2017

Fahrettin Ersin Erbaş
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. DEMİRYOLUNUN YAPISI	3
2.1 Demiryolu Üstyapısı	4
2.1.1 Ray	5
2.1.2 Travers	6
2.1.3 Bağlantı elemanları	7
2.1.4 Balast.....	8
2.2 Demiryolu Altyapısı.....	8
2.3 Demiryolu Altyapısında Zemin ve Koruyucu Tabakalar	12
2.3.1 Demiryolunda taban zemini	13
2.3.2 Geoteknik analiz ve zemin sınıflandırmaları	13
2.3.2.1 Demiryolları için zemin sınıflandırmaları.....	14
2.3.2.2 Taban zemini taşıma kapasiteleri için zemin sınıflandırmaları.....	16
2.3.3 Altyapının mekanik karakteristikleri	17
2.3.4 Formasyon tabakaları.....	18
2.3.5 Dona karşı duyarlılık ve koruma.....	19
2.3.6 Demiryollarında geosentetiklerin kullanımı	22
2.4 Demiryoluna Etkiyen Yükler	23
2.4.1 Dingil yükleri	25
2.4.2 Trafik yükleri	26
3. HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE ÜSTYAPI TİPLERİ	29
3.1 Balastlı Üstyapı	29
3.2 Balastsız Üstyapı	31
4. KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLER	37
4.1 Tramvay Sistemleri	38
4.2 Hafif Raylı Sistemler (LRT)	39
4.3 Metro	40
5. HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE GEÇİŞ BÖLGELERİ	43
5.1 Geçiş Bölgeleri.....	43
5.1.1 Geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ve nedenleri.....	44
5.1.2 Geçiş bölgelerindeki iyileştirme çalışmaları.....	49
5.2 Örnek Bir Hafif Raylı Sistem Geçiş Bölgesi İçin İrdelemeler.....	60

5.2.1 HyperWorks yazılımı	61
5.2.2 Tasarım prensipleri.....	61
5.2.3 İrdelenecek durumlar.....	62
5.2.4 Malzeme özellikleri.....	63
5.2.5 Oturma limitleri.....	64
5.2.7 Analiz sonuçları.....	65
6. SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ	89



KISALTMALAR

AC	: Alternating Current
AASHO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
AREMA	: American Railway Engineering and Maintenance of way Association
ATD	: AsphaltTragschicht mit Direktauflagerung
CBGM	: Cement Bound Granular Mixtures
DC	: Direct Current
HMA	: Hot Mix Asphalt
LRT	: Light Rail Transit
SNCF	: Société Nationale des Chemins de fer Français
UBM	: Unbound Granular Material
UIC	: Union Internationale des Chemins de fer
USCS	: The United Soil Classification System



SEMBOLLER

E	: Elastisite Modülü (MPa)
μ	: Sürtünme katsayısı
p	: Porozite





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Zemin kalite sınıfları[6].....	15
Çizelge 2.2: Farklı Zemin kalite sınıfları için zemin özellikleri[6]	16
Çizelge 2.3: Taban zemini taşıma kapasitesi sınıfları[6]	17
Çizelge 2.4: Taban zemini taşıma kapasitesi sınıfları[1]	19
Çizelge 2.5: Tekrar aralıklarına göre don indeksleri[1].....	20
Çizelge 2.6: Don koruma tabaka kalınlıklar 0.5m ballast tabakası için[7].....	20
Çizelge 2.7: Don koruma tabaka kalınlıklar 0.4m balast tabakası ile kullanılan çakıl ve izolasyon malzemesi(50mm) için[7]	21
Çizelge 2.8: Farklı demiryolu araçları için boş ve dolu dingil yükleri[2]	25
Çizelge 2.9: UIC yük sınıflandırması[11].....	26
Çizelge 3.1 : Mesnet durumuna göre balastsız hat türleri [14].....	32
Çizelge 3.2 : Balastlı ve balastsız hatların avantaj ve dezavantajları [17].....	36
Çizelge 4.1 : Kapasitelerine göre kent içi ulaşım sistemleri [24]	42
Çizelge 4.2 : Maliyetlerine göre kent içi raylı sistemler [25]	42
Çizelge 5.1 : Farklı proje hızları için dolgu ölçüleri [6].....	59
Çizelge 5.2 : Geçiş bölgesi iyileştirme uygulamaları [33]	60
Çizelge 5.3 : Örnek çalışmada kullanılan malzeme özellikleri	64



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Demiryolunun yapısı [1]	3
Şekil 2.2 : Oluklu raylı hat detayı.....	5
Şekil 2.3 : Patenli (Vignole) ray	6
Şekil 2.4 : Demiryolu platformu[4]	9
Şekil 2.5 : Demiryolu altyapısı elemanları[5].....	10
Şekil 2.6 : Hat üzerinde yarma ve dolgu şevleri[4]	11
Şekil 2.7 : Demiryolu köprüsü	12
Şekil 2.8 : Zemin sınıflarına göre CBR endeksleri	18
Şekil 2.9 : Şıkıştırılmış polisitren izolasyon malzemesi ile balast altına don tabakası serilimi[9].....	21
Şekil 2.10 : Geotekstillerin altyapıda kullanımı[10].....	22
Şekil 2.11 : Tünelde geomembran uygulaması.....	23
Şekil 2.12 : Demiryoluna etkileyen yüklerin doğrultuları[11]	24
Şekil 2.13 : UIC trafik yükü kategorileri	27
Şekil 3.1 : Balastlı ve Balastsız Hat Kesitleri [9].	30
Şekil 3.2 : Balastlı hat görünümü.....	31
Şekil 3.3 : Rheda balastsız hat sistemi [15]	33
Şekil 3.4 : ÖBB-Porr balastsız hat serilimi [16]	33
Şekil 3.5 : Edilon gömülü ray sistemi [2]	34
Şekil 3.6 : Asfalt taşıyıcılı balastsız hat [14]	35
Şekil 3.7 : Beton taşıyıcılı hat [14]	35
Şekil 4.1 : Tramvay sistemi	39
Şekil 4.2 : Hafif raylı sistem [22].	40
Şekil 4.3 : Metro sistemi [23].	41
Şekil 5.1 : Köprü yaklaşımında bir demiryolu geçiş bölgesi [27].	44
Şekil 5.2 : Köprüde oluşan oturma bölgesi [28]	45
Şekil 5.3 : Düşük rijitlikten yüksek rijitliğe geçişte etkileşim bölgesi [29].....	46
Şekil 5.4 : Bir köprü yaklaşım bölgesindeki ray seviye değişimi [29].....	46
Şekil 5.5 : 50km/sa hız için farklı rijitlikteki oturma seviyeleri [30]	47
Şekil 5.6 : 70km/sa hız için farklı rijitlikteki oturma seviyeleri [30]	48
Şekil 5.7 : Bakım aralıklarında oluşan oturmaların farklı bölgeler için karşılaştırması [31]	49
Şekil 5.8 : Geçiş bölgesinde asfalt tabaka uygulaması [33]	51
Şekil 5.9 : Balast kenetlenmesinin şematik gösterimi	51
Şekil 5.10 : Ek ray uygulaması gösterimi [33]	52
Şekil 5.11 : Taş kolonların yaklaşım bölgesine yerleşimi [31]	52
Şekil 5.12 : Balastlı – Balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası [33]	54
Şekil 5.13 : Köprü geçiş bölgesinde yaklaşım plakası ve altyapı elemanları [33]	55
Şekil 5.14 : Geçiş bölgesinde dolgu ile iyileştirme şematik gösterimi [29]	57
Şekil 5.15 : Alman Demiryolları için köprü geçiş bölgesi zemin dolgusu tasarımı [6]	58
Şekil 5.16 : Model için temel alınan teknik blok uygulaması	63

Şekil A.1 : Serbest zemin durumu modeli perspektif görünüşü	80
Şekil A.2 : Köprü balastsız hat geçişinde serbest zemin durumu modeli perspektif görünüşü	81
Şekil A.3 : Köprü balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumu modeli perspektif görünüşü	82
Şekil A.4 : Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulanması durumu modeli perspektif görünüşü	83
Şekil A.5 : Serbest zemin durumu zemin oturma analizi	84
Şekil A.6 : Köprü yaklaşımlı serbest zemin durumu oturma analizi	85
Şekil A.7 : Köprü balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumu modeli oturma analizi	86
Şekil A.8 : Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulanması durumu modeli oturma analizi	87



HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE KÖPRÜ İLE BALASTSIZ ÜSTYAPI GEÇİŞ BÖLGELERİNİN İRDELENMESİ

ÖZET

Demiryolu ulaşımı, 19. yüzyıldan bu yana toplumların kullandığı, güvenilir bir ulaşım türüdür. Yıllar içerisinde ulaşım ihtiyacı ve insanların yolculuk sürelerindeki artışlar raylı sistemlere olan ihtiyacı arttırmıştır. Diğer kent içi ulaştırma türleri incelendiğinde demiryolu ulaşımının kazandırdığı bir çok önemli avantaj göze çarpmaktadır. Lastik tekerlekli sistemler özellikle büyümekte olan şehirler ve metropollerde arazi kullanımının sınırlanması ile trafik sorununa ve taleplere cevap verememektedir. Bununla beraber küreselleşen dünyanın en büyük sorunlarından biri olan hava ve gürültü kirliliğinin başlıca sebeplerinden biri karayolu ulaşımıdır.

Bugün dünyamızda gelişmiş devletler olarak nitelenen ABD, Almanya, Japonya, Fransa, İngiltere gibi ülkeler incelendiğinde demiryolu yatırımlarına çok uzun yıllar öncesinden verdikleri değer dikkati çekmektedir. Dünyanın ilk metro sistemlerinden olan Londra Metrosu 1863 yılında kullanıma açılmıştır. Benzer şekilde yüzyıl öncesinde Paris, New York, Berlin gibi şehirlerde hizmete açılan kent içi raylı sistemler, bulundukları ülkelerin ekonomik, şehir planlaması, toplumsal ve kültürel gelişimleri açısından çok büyük katkılarda bulunmuştur. Gelişmiş ülkelerin demiryolu yatırımına öncelik veren ülkeler olması bu açıdan bakıldığında bir tesadüf değildir.

Kent içi ulaşımında raylı sistemlerin kullanımı insan hayatını çarpıcı şekilde etkilemiştir. Artan nüfus ve büyüyen şehirler, raylı sistemlere olan ihtiyacı günümüzde yüzyıl öncesine göre daha da artırmıştır. Bunu takiben gelişmekte olan ülkeler de raylı sistemlere ağırlık vermeye başlamışlardır. Artan demiryolu ulaşımı beraberinde bir çok teknik soruyu da beraberinde getirmiştir. Demiryolu üstyapı ve altyapı tasarımının nasıl olması gerektiği, demiryolunda kullanılacak sanat yapıları ve tasarım standartları, kullanılması gereken malzemeler, enerji verimliliği gibi bir çok konu, gelişen teknolojik ve bilimsel birikim ile cevap aranan konulardır.

Demiryolu yapısı, üstyapı ve altyapı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yapının karakteristikleri; hattın kullanım amacına, hattan geçecek trafik yüklerine, güzergahdaki zemin özelliklerine, çevresel koşullara, tasarım ömrüne ve yatırım maliyetlerine göre değişiklik göstermektedir. Çok uzun süreli kullanım ömrüne ve yüksek yatırım maliyetine sahip balastsız hat tipleri olduğu gibi düşük ilk yatırım maliyetli ancak düzenli bakım gereksinimleri sahip balastlı hatlar da vardır. Önemli olan bir çok etkenin tasarım aşamasında göz önüne alınarak demiryolu ulaşımının kesintisiz, konforlu ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.

Bilimsel çalışmalar göstermektedir ki demiryolu ulaşımı yeniliklere ve gelişmelere fazlasıyla açık olan bir mühendislik konusudur. Örnek olarak bundan 30 yıl önce demiryolu camiasında kabul görmüş bir bilgi zaman içinde yerini yeni buluşlarla başka bir kabule kolaylıkla bırakabilmektedir. Bundaki en önemli neden; teknolojik

gelişmelerin demiryolunda kullanılan malzemeleri ve teknikleri önemli derecede etkilemesidir. Balastsız hat tasarımı ilk keşfedildiği yıllarda yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle tercih edilmemiştir. Ancak uzun süreli kullanım ömrü ve sorunsuzluğu sayesinde çok avantajlı bir üstyapı tipi olduğu tecrübeler ile gözlemlenmiştir. Ayrıca ilk kullanıldığı yıllardaki balastsız hat türleri ile şu andakiler arasında sayıca büyük farklar vardır. Bir çok farklı ihtiyaca cevap veren ve aynı balastlı hat gibi çok hızlı imal edilebilen türler, teknolojik gelişmeler ve bilgi birikimleri sayesinde artmıştır.

Karşılaşılan sorunlar, bulunabilecek çareler için en önemli motivasyon kaynağıdır. Demiryolları da kullanımları yaygınlaştıkça bir çok sorun ile karşılaşmaktadır. Zaman içinde bu sorunlara cevap bulmak için yapılan bir çok deneysel çalışma ve hatların üstyapı ve altyapısındaki kusurların gözlemlenmesi, günümüzdeki geniş bilimsel literatürü ve hat yapım yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Bu yenilikler ile beraber demiryolu yapısının tasarımındaki iyileştirmeler, uzun süreli kullanım ömrüne sahip, konforlu, düşük maliyetli yeni hatlar açılmasını sağlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında demiryolu yapısı ve özellikleri, kent içi raylı sistem ulaşım türleri ve raylı sistemlerde köprü/viyadük geçiş bölgeleri incelenmeye çalışılmıştır. Çalışma içinde geçiş bölgelerini daha iyi anlayabilmek için demiryolu altyapısı, zemini, üstyapı tipleri ve kullanılan raylı sistemler incelenmiştir.

Raylar, bağlantı elemanları, traversler ve balast veya beton taşıyıcı tabaka üstyapıda kullanılan ana elemandır. Bu üstyapı elemanları, demiryolu üstyapısının trene altlık oluşturan çerçevesini oluşturmaktadır. Tekerlek ile ilk temas bu yapı sayesinde sağlanır. Uzun süreli hat ömrü, sürüş konforu, gürültü üretimi gibi bir çok etmen bu ilk taşıyıcı tabakasından doğrudan etkilenir ve buna bağlı olarak doğru üstyapı tipinin seçimi bir demiryolu projesi için hayati önem taşımaktadır.

Demiryolu altyapısı demiryolunun güvenli bir şekilde görevini yerine getirmesini sağlayan en önemli etkenlerden biridir. Altyapıda ortaya çıkan her hangi bir sorun hattın işleyişini uzun süreler durdurabilir. Bu sorunların telafisi genellikle zor olmaktadır çünkü altyapı kendisi ile bağlantılı olan üstyapıyı doğrudan etkiler ve sorunlar yansıtılır. Bununla beraber proje maliyetleri incelendiğinde de görülecektir ki altyapı maliyetleri diğer maliyet kalemlerine göre en yüksek olanıdır. Özellikle güzergah boyunca gereksinim duyulan köprü, viyadük, tünel gibi sanat yapıları yapılacak bölgenin zemin ve çevresel özelliklerine göre çok yüksek maliyetlere sebep olabilmektedir.

Demiryolu altyapısı incelendiğinde öncelikle platform tabakası üstyapıya mesnetlik yapan yapı olarak öne çıkar. Bu tabakanın performansı demiryolu taban zemine bağlıdır. Demiryolunda taban zemini yeterli dolgu ve sıkıştırma ile doğal zeminin oturmalarını engellemeli ve zeminde yeterli stabilite sağlamalıdır. Bununla beraber altapı taban zemini demiryolu yükleri altında sağlamlığını korumalıdır. Ayrıca işletme süresince zemin formasyonu bozulmalara uğramamalıdır.

Yarma ve dolgular, tüneller, köprüler, viyadükler, menfezler, sağlamlaştırma yapıları da altyapı sınıfında incelenir. Bu yapılar çok yüksek maliyetlidir ve tasarımsal sorunları kaldırmazlar. Özellikle çevresel faktörler ve demiryolu etkilerini doğru analiz etmeden yapılan sanat yapıları, hem sistemin konforunu hem de ömrünü doğrudan etkiler.

Demiryolu zemininin geoteknik analizinin yapılması, kullanılacak malzemelerin, dolguların, sanat yapılarının ve hat üstyapısının belirlenmesinde önemli yer tutar. Bu

amaçla belirlenen Avrupa ve ABD'ye ait bir çok sınıflandırma yöntemi vardır. Bu yöntemler ışığında güzergahdaki doğal zemin incelenir ve eğer yetersiz ise gerekli güçlendirmeler uygulanır. Önemli olan stabil olan ve demiryolu rijitliğini olumsuz yönde etkilemeyen bir zemin tabakası oluşturmaktır.

Trafik yükleri, demiryolu taşıtının dingil yüklerini sefer sayılarını baz alarak hesaplanan ve altyapı ile üstyapı tasarımını doğrudan belirleyen çok önemli bir parametredir. Belli bir trafik yükü altında konforlu ve güvenli olan bir demiryolu yapısı, daha yüksek trafik yükleri altında sorunlara maruz kalabilir.

Kent içi raylı sistemler güvenliğin, konforun, hızlı ve pratik şehir içi ulaşımın sağlanması için çok önemlidir. Kent içi raylı sistemlerde verimli bir işletimin sağlanması için yukarıda belirtilen faktörler ışığında yolcu kapasitesi çok önemli bir belirleyicidir. Taşıma kapasitesine göre tramvay, hafif raylı sistem (hafif metro) ve metro olarak ayrılırlar. Bu sistemlerin hepsi elektrik enerjisi ile hareket etmektedir ve çevre kirliliğini karayolu ulaşımına göre oldukça düşürmektedir. Yapım maliyetleri incelendiğinde de taşıma kapasitesi ile doğru orantılı bir maliyet analizi görülmektedir. Taşıma kapasitesindeki artış trafik yüklerinde artışa neden olur ve raylı sistemlerin altyapı tasarımını doğrudan etkiler.

Bu tez çalışmasında detaylı olarak incelenen balastsız üstyapıdan köprü/viyadük yapısına geçiş bölgeleri demiryolu yapısının aniden değiştiği bölgelerdir. Bu değişim sebebiyle zemin oturmaları, üstyapı ve altyapı bozulmaları ve yüksek maliyetli bakım ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır. Demiryolu köprüleri genellikle derin temellere sahip, minimum düzeyde oturma yapan, stabil ve rijit yapılardır. Ancak yaklaşım bölgeleri dolgu zeminde bulunur ve tekrarlayan tekerlek yükleri ile daha yüksek miktarda düşey seviye kaybına uğrarlar. Geçiş bölgesinde karşılaşılan en önemli problem bu ani seviye değişiminin yarattığı dinamik yükleme etkisidir.

Demiryolu hatlarında rijitlik değişimlerinin mümkün olduğunca yavaş ve kademeli olması istenmektedir. Aksi durumda hem yolculuk konforu, hem de demiryolu alt ve üstyapısı olumsuz yönde etkilenecektir. Oluşan deformasyonlar zamanla ağır bakım maliyetlerine dönüşecektir. Geçiş bölgelerinde, özellikle doğal zeminin çok stabil olmadığı durumlarda, bu rijitlik değişimine sıklıkla rastlanmaktadır.

Demiryolu geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ile ilgili alınan önlemler iki ana kısımda incelenmektedir. Bunlardan birincisi altyapıda ve zemin elemanlarında alınan önlemlerdir. Bunlar genellikle geçiş bölgesindeki zemini güçlendirmeye ve rijitliğini arttırmaya yönelik önlemlerdir. Zemin altında beton yaklaşım plakası kullanımı, taş kolonların veya kazıkların zemin içine belli aralıklarla yerleştirilmesi, zemindeki dolgu elemanlarının iyileştirmesi, balastlı hat yerine daha rijit olan balastsız hattın kullanılması, balast altına asfalt tabakası yerleştirilmesi gibi yöntemler bu başlıktaki çeşitli iyileştirme yöntemleridir.

İkinci olarak ise üstyapı elemanlarında alınan önlemler gelmektedir. Bunları; farklı uzunlukta ve tipteki traverslerin kullanılması, üstyapı elemanları için kullanılan pedler ile rijitliğin düşürülmesi, ek ray uygulaması, balast stabilitesinin artırılması olarak sıralayabiliriz. Ayrıca farklı yöntemlerin bir arada kullanılması bir çok uygulamada olumlu sonuçlar vermektedir. Örnek olarak bir geçiş bölgesinde hem zemin altında yaklaşım plakası hemde ek ray uygulaması yapılabilir. Aynı zamanda köprü bölgesinde de yüksek sönümlemeye sahip ray altı pedleri kullanılarak rijitlik düşürülebilir. Bu kombine uygulamalar ile çok daha az seviyede rijitlik değişimine sahip bir geçiş bölgesi elde edilebilir. Böylece sistemin performansı, servis ömrü ve konforu artırılır.

İyileştirme yöntemleri arasında en yaygın kullanıma sahip olanlarından biri; zemin dolgusunda kullanılan malzemelerin kademeli olarak iyileştirilmesi ve bir kama şekli verilerek stabilitelerinin artırılmasıdır (teknik blok uygulaması). UIC 719-R “Demiryolları Hatları için Toprak İşleri ve Altyapı” standardına göre farklı demiryolları ağları için farklı geometride ve malzeme içeriğinde zemin dolgulu geçiş bölgesi tasarımları vardır. Bu yöntem, genel kabul görmüş, başarılı bir iyileştirme yöntemidir ve hala çeşitli deneyler ve tecrübeler ile gelişmektedir. Bununla beraber yaklaşım plakası uygulaması, balastın altındaki zemin tabakasına yayılan beton bir plaka kullanımı ile oturmaların azaltılması için kullanılan bir başka iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemin yüksek performans ile çalışması için genellikle üstyapıda kullanılan bazı iyileştirme yöntemleri ile beraber kullanılması önerilir.

Bu iki yöntem tezin son bölümünde örnek bir çalışma için zeminin stabilitesini artırmadaki faydaları açısından incelenmiştir. Örnek çalışma bir hafif raylı sistem uygulamasında, balastsız hattan köprüye geçiş bölgesindeki zemin oturmalarını irdelemektedir. Dingil yükü 130 kN olarak alınmıştır ve dinamik yükleme durumu gözönüne alınarak bu yük %75 artırılmıştır. Hiçbir iyileştirme yöntemi uygulanmayan durumlar ile farklı iyileştirme yöntemleri uygulanan durumların performansları, HyperWorks programı ile sonlu elemanları analizi yapılarak incelenmiştir.

Sonuç olarak kullanılan yaklaşım plakası ve teknik blok yöntemlerin zemin oturma eğilimini engellemeye yönelik ciddi bir katkı yaptığı ve hattaki seviye değişimlerini istenen düzeyde tutmaya yardımcı olduğu gözlemlenmiştir. Geçiş bölgelerinde önemli olan seviye değişimlerinin bir bölgede yoğunlaşmamasıdır. Seçilen iyileştirme yöntemleri bu amaca hizmet etmektedir. Normal zemin durumundaki geçişe göre yaklaşım plakası ve teknik blok kullanılan modellerde oturma değerleri, zemin için seçilen oturma limitlerinin içinde kalmaktadır. Oturmaların azaltılması konusunda teknik blok uygulaması, yaklaşım plakasına göre daha iyi bir performans göstermektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda hat altyapısında yapılacak stabilitesi yüksek zemin dolgusu uygulamasının (teknik blok uygulaması) raylı sistemde balastsız üstyapı ile köprü geçiş bölgesinde en iyi performansı gösteren iyileştirme yöntemi olarak olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF TRANSITION ZONES BETWEEN BRIDGE AND BALASTLESS TRACK FOR LIGHT RAIL TRANSIT SYSTEMS

SUMMARY

Railway transportation is a safe transportation mode for people since the 19th century. The demand of the transportation needs has dramatically increased in time. Once compared to other modes of transportation, the advantages of railway transportation stands out. Especially, increased traffic load and land use are becoming an unsolvable problem with highway transportation in growing and mega cities today. In addition, air pollution and noise are resourced substantially by highways with increasing populations.

Many developed countries such as USA, Japan, Germany, France and UK had already constructed their local transportation networks and have been using effectively for decades. Their rail networks also contribute to their development and civilization level in paralel since more than a century. Usage of rail transportation has affected publics outstandingly.

Today demand of rail transportaton is higher than before due to increasing population rates and longer distances in cities. Following this, growing cities also pay more attention to railway investments day by day. Accordingly, in company with new railway networks all around the world bring a lot of technical questions to engineers. How superstructure and infrastructure of railway should be designed and how it may be more sufficient and long-lasting are some of these questions. Engineering studies focus these subjects and try to find effective and innovative answers for challenges of railway with developing technology and return of experiences.

Railway structure is consist of two main parts; superstructure and infrastructure. These two are depends on environmental factors, transport capacity and demands, design life, carried loads on rail. Every project is shaped by unique circumstances and restrictions. Most important point is to built safe, rapid, effective, comfortable and long lasting railway network.

Scientific studies demonstrates that railway transportation is very open to innovations and developments. Some acceptions of railway design has changed completely with technological inventions. For insance; 30 years before, engineers could not foresee that one day ground-level power supply will be commonly used but today this kind of innovative solutions spread fastly.

Every problem is an opportunity for a creative solution and also biggest motive power to solve. In parallel with this, railway engineering experienced challenges and focuses solutions of special problems.

Main focus of this thesis study is transition zones between track and bridge for railways. In order to explain resources of transition zone problems so many studies have been done in railway engineering literature. Once these studies analyzed, it is

seen that main issue for transition zones between bridge decks and rail tracks is abrupt stiffness change of different zones. Rail track suffers early due to sudden changes and then different settlements are triggered. Different structural behaviour of conventional track and bridge causes accelerated degradation and shortened component life of rail track.

In order to understand methods of improvements for transition zones, this study firstly focuses railway structure and its components. Rails, fastenings, sleepers, ballast and concrete slab built main frame of track structure. On the other hand success of rail structure as a whole topic which requires; durable subgrade and foundation of the track to carry repeated traffic loads and to be resilient to environmental impacts.

Hence in first section of the study obtains railway structure as a complete subject. Infrastructure elements, geotechnical classification methods and analyses, formation layers, protection layers of railways and geosynthetics for railways are investigated.

The platform layer is bearing layer for wheel loads. Superstructure supports and distributes wheel loads and needs periodical maintenance of the renovation during time. To ensure safe operation of rails, fastenings and sleepers should work in harmony to carry loads and guide vehicles smoothly. The ballast including crushed stone and help damping of train vibrations. Also it ensures fast drainage and proper load distribution.

Track is separated two different types: ballasted and ballastless track. Conventional track design is consist of ballastless track. In the last 40 years an increase in train speed and axle load and other challenges in the conventional ballasted track system modified to ballastless railway track system. Two systems have different advantages and disadvantages, although ballastless track usage has become more common type regarding long life and low maintenance. However intercity rail networks still prefers ballasted track in so many countries all around the world due to low initial capital investment of ballasted track. All aspects should be evaluated during project design phase and selection of track types should be done accordingly.

In the second section, local railway system types are explained and in order to understand differences, useful figures of railway classification regarding load capacity and investment costs are used. The main criteria to classify local rail network is load carrying capacity of rail system. LRT and Metro systems have higher carrying capacity than tramway systems. On the other hand tramway lines are still popular for short distances of central areas. Investment cost of Metro is exactly higher than other systems as 40-90 Million US \$.

In the third section, thesis more focuses to main subject; “Transition zones between bridges and open tracks of railway”. In this section resources of problems and solution methods are detailed specifically. Main resource of settlements is sudden change of stiffness. Two main improvement methods are used for transition areas. These are “modifying substructure and subgrade elements” and “modifying superstructure elements”. Track having vertical settlements due to subgrades plastic behaviour. In this situation, higher quality soils can be used to ensure durable infrastructure. Also in order to increase rigidity of track; additional rails, increasing ballast stability, wider sleepers may be used superstructure methods. Moreover combine methods can have higher rate of success in transition zones of track because in the same time settlements decrease and rigidity can be higher on track structure. This means; rails can have smoother and comfortable drive and higher maintenance

costs can be reduced. During design phase, natural soil of transition areas should be studied and according to this the best improvement method should be chosen accordingly.

A case study has been carried out for LRT track in transition zone between bridge and ballasted track in the last section in order to understand track structure behaviour with and without modifying substructure. Therefore, four different models have been created and analysed with using HyperWorks, finite element analysis software. For models, natural soil is chosen as good quality limestone material in order to have precise analyse with linear elastic acceptance.

All settlement analyses are investigated in conclusion part. Open track without any improvement and transition track to bridge approach models demonstrates settlements. However, it is observed that both used improvement methods (technical block and approach slab) have good performances in order to prevent different settlement of ballastless track while the technical block application having best transition performance.



1. GİRİŞ

Son yıllarda raylı sistemlere olan talep, bu sistemlerin enerji konusunda verimli, çevreye duyarlı, kesintisiz, hızlı, uzun ömürlü, konforlu ve güvenilir olması sebebiyle gittikçe artmaktadır. Kent içi raylı sistem yatırımlarının artması, karayolu ulaşımının yarattığı; gürültü kirliliği, ses kirliliği, artan arazi kullanımı ve trafikte kaybedilen zaman gibi olumsuzlukları azaltmaktadır.

Demiryolu ulaşımı bir çok disiplinin iç içe geçtiği, modern ve güvenli bir ulaşım türüdür. Yapılacak yatırımın başarılı olması; demiryolunun güzergahı, zemin özellikleri ve taşıma kapasite gibi bir çok etmene bağlıdır. Demiryolunun yapısal tasarımı, hizmet süresi, bakım maliyetleri, konfor gibi birçok konuyu etkilemektedir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde demiryolunun yapısal özellikleri üstyapı ve altyapı özellikleri olarak incelenmiş, üstyapı elemanları ve bunların işlevleri açıklanmıştır. Doğru tasarlanmış bir demiryolu üstyapısı, hattaki trafik yüklerini yeterli şekilde karşılar ve taşıtlara güvenli bir şekilde kılavuzluk eder. Altyapı ise bir çok farklı katmandan oluşan ve yatırımlarda en yüksek maliyete sahip demiryolu bölümüdür. Güzergaha göre planlanacak altyapı tipleri, zemin özellikleri ve sınıflandırmaları, çevresel özelliklere göre alınacak koruyucu önlemler (geosentetikler, don koruma tabakaları) ilk bölümde incelenmiştir.

Bununla beraber balastlı ve balastsız üstyapılar, türleri ve kullanım amaçları ikinci bölümde açıklanmıştır. Özellikle son 30 yılda geleneksel balastlı demiryolu hattı üstyapısı kullanımından, balastsız üstyapıya doğru bir geçiş olmaktadır. Bu yönelimin nedenleri, iki farklı üstyapı tipinin birbirine göre üstünlükleri ve eksiklikleri detaylandırılmıştır.

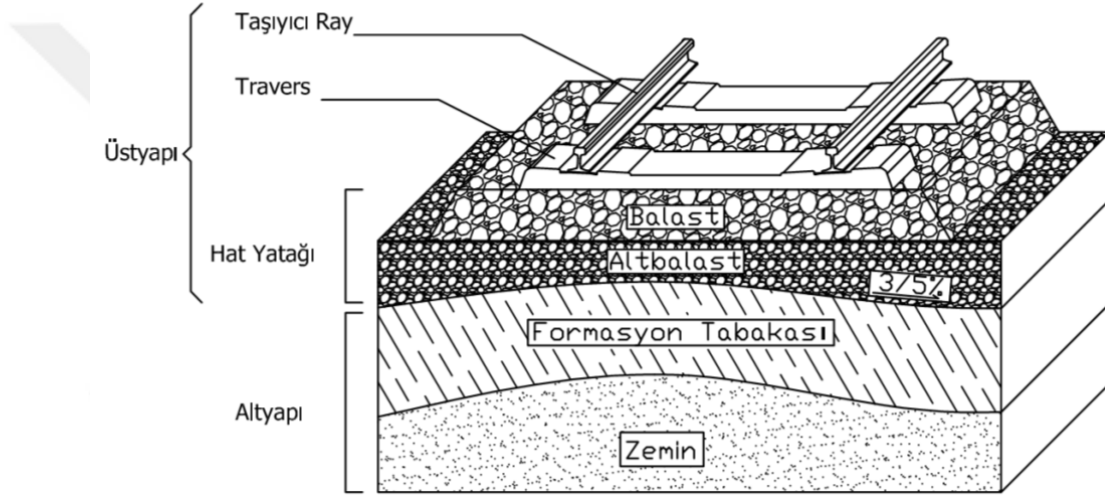
Üçüncü bölümde, bütün altyapısal ve üstyapısal özellikleri doğrudan etkileyen kent içi raylı sistem ulaşım türlerinin sınıflandırmaları incelenmiştir. Taşıma kapasitesinin ana belirleyici faktör olduğu kent içi raylı sistemlerde, km başında yatırım maliyetleri, kullanılan enerji tipleri, altyapısal özellikler ve taşıma kapasiteleri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, tez çalışmasının odaklandığı raylı sistemlerde köprü geçiş bölgeleri incelenmiştir. Bu bölümde geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ve alınabilecek önlemler anlatılmıştır. Ani rijitlik değişimlerinden ve altyapıdaki farklı zemin oturmalarından kaynaklı seviye değişimleri geçiş bölgelerinde karşılaşılan bir çok sorunun ana sebebi olmaktadır. Üstyapı elemanlarındaki deformasyonlar ve altyapısal bozulmalar, kullanılacak hattın uzun yıllar boyunca konforlu ve güvenli bir şekilde hizmet vermesinin önüne geçmektedir. Ayrıca yüksek maliyetli ve sık aralıklı bakım gereksinimine neden olmaktadır. Mümkün olduğunca bu sorunların yaşanmaması için raylı sistem geçiş bölgelerinde gerekli önlemler alınmalıdır. Bu önlemlerin birincil amacı zemindeki oturmaların ve ani rijitlik değişimlerinin önlenmesidir. Bu bölümde geçiş bölgesinde alınacak önlemler altyapı ve zemindeki iyileştirmeler ve üstyapı iyileştirmeleri olarak iki ana başlıkta incelenmiştir.

Hafif raylı sistemlerde balastsız hattan köprü yapısına geçiş bölgelerinde yapılabilecek uygulamalar örnek bir çalışma içinde incelenmiştir. Çalışma sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir bilgisayar programı (HyperWorks) yardımı ile alınabilecek iyileştirme yöntemlerinin zemin oturmalarının önüne geçmek için yaptığı katkıları irdelemektedir. Bu çalışma için hafif raylı bir sistemde balastsız üstyapı ve dolgu zemin bölgesinden rijit bir köprü yapısına geçiş bölgesi temel alınmıştır. Örnek çalışma sonunda, yaklaşım plakası ve teknik blok kullanımı gibi altyapısal önlemlerin zemin oturmalarını istenen limitler içinde tutmaya büyük ölçüde yardımcı oldukları görülmüştür.

2. DEMİRYOLUNUN YAPISI

Demiryolu hattı, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, raylar, bağlantı elemanları, traversler, balast, alt balast ve taban zemini gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Demiryolu yapısı, altyapı ve üstyapı olarak ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 2.1 : Demiryolunun yapısı [1]

Proje aşamasında, hattın trafik yükleri ve kullanım amacına göre hat üstyapısı tasarımı yapılmalıdır. Bununla beraber proje güzergahındaki zemin özellikleri, hidrojeolojik durumlar detaylı olarak incelenerek hat altyapısı çalışmaları planlanmalıdır.

Demiryolları tasarlanırken hattın trafik yükü, aracın özellikleri, iklim koşulları, zemin özellikleri, güzergahın durumu, sanat yapıları, işletim hızı gibi birçok kriter göz önüne alınmaktadır. Etüd aşaması hattın üstyapı ve altyapı özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi için çok önemlidir. Bu çalışmalar diğer bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.

Optimum bir demiryolu yapısının, bütün bileşenlerinin (üstyapı ve altyapı) katkılarıyla, aşağıdaki görevleri yerine getirmesi beklenmektedir;

- Trafiğin yarattığı olumsuz etkilere karşı koyabilmek,
- İklim koşullarından en az düzeyde etkilenmek,
- Yolculuk esnasında, seyahat edenlere kabul edilebilir düzeyde konfor sağlamak,
- Güvenli bir seyahat sağlamak,
- İşletme ve bakım maliyetlerini en düşük seviyede tutmaktır.

2.1 Demiryolu Üstyapısı

Raylar, traversler, bağlantı elemanları, balast, alt balast gibi katmanlardan oluşan ve demiryolu araçlarından kaynaklanan yükleri dağıtarak altyapıya ileten kısım demiryolu üstyapısıdır.

Demiryolu üstyapısının görevleri [1];

- Yol boyunca demiryolu vasıtalarına düzgün ve pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Demiryolu taşıtlarından gelen statik ve dinamik yükleri güvenle ve kalıcı şekil değiştirmelere uğramadan karşılamak ve bu kuvvetleri yayarak altyapıya iletmek,
- Yeterli elastikliğe sahip olmak,
- Şekil bozukluğuna uğradığında, kolayca eski durumuna getirilebilir özellikte olmak,
- Yüzey sularını bünyesinden kolaylıkla uzaklaştırabilir özellikte olmak,
- Uzun ömürlü ve ekonomik olmak olarak sıralanabilir.

Demiryolu üstyapısı hattın kullanım amacına göre farklı elemanlardan oluşabilir. Örnek olarak şehirler arası hatlar genellikle balastlı hat tipinde tasarlanırken, kent içi raylı sistemler balastsız hat tasarımına sahiptir. Demiryolu üstyapı tipinin ve elemanlarının doğru olarak seçilmesi, işletme sırasında üstyapı nedeniyle oluşacak

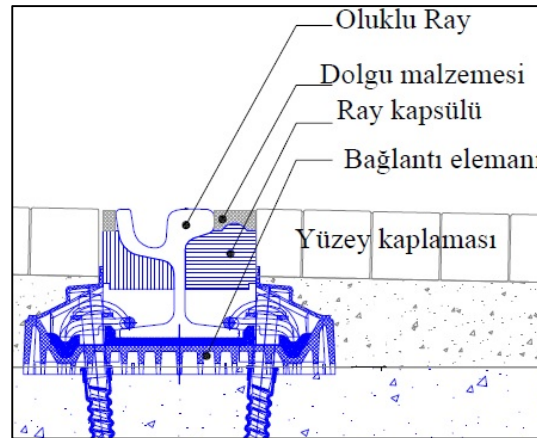
problemleri azaltacak ve sefer aksamalarının ve ekstra bakım maliyetlerinin önüne geçecektir. Başlıca demiryolu üstyapı elemanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Raylar
- Traversler
- Bağlantı elemanları
- Balast veya asfalt ve beton taşıma tabakaları.

2.1.1 Ray

Raylar, demiryollarında tren tekerleklerini yönlendiren, tekerleklerle temas yüzeyi sağlayan ve demiryolu araçlarından kaynaklanan yükleri traverse ileten dökme çelik demiryolu elemanlarıdır. Ray kesitleri tarih boyunca devamlı bir gelişim göstermiştir. Bu süreçte 3 farklı ray tipi dışında kalıcı olan olmamıştır. Kalıcı olan ray tipleri; oluklu ray, çift mantarlı ray ve patenli(Vignole tipi) raylardır.

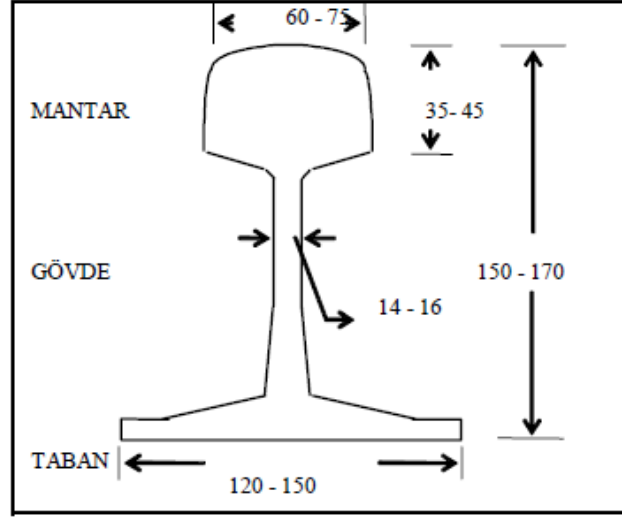
Oluklu raylar günümüzde kaplama yüzeyi ve ray üst noktasının aynı seviyede olduğu hatlarda kullanılmaktadırlar (Şekil 2.2). Gömülü hatlar, depo hatları, liman işletme hatları bu hatlara örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.2 : Oluklu raylı hat detayı

Çift mantarlı ray simetrik bir şekle sahiptir. 19. yüzyılda yaygın olarak bir ray tipidir . Kullanım amacı aşınan üst tarafın yerine alt tarafın konularak kullanılabileceği düşüncesidir. Fakat bu düşünce uygulamada çok başarılı olamamıştır çünkü alt mantarda zamanla aşınma göstermiştir ve bu fikrin imkansızlığı anlaşılmıştır [1].

Patenli ray üç farklı bölgeden oluşmaktadır; mantar, gövde ve taban (Şekil 2.3). Tekerler direkt mantar yüzeyi ile temastadır ve demiryolu aracı ile uyumluluk göstermelidir. Tabanın altındaki paten bölümü rayın travers ile olan bağlantısını geniş bir tabla ile sağlar. Patenli raylar en geniş kullanım alanı olan raylardır ve farklı ray ebatlarına göre birçok farklı tipi vardır. Raylar ayrıca bazı hatlarda cer gücünde oluşan kaçak akımın tekrar kullanılması için iletkenlik görevi üstlenirler.



Şekil 2.3 : Patenli (Vignole) ray

2.1.2 Travers

Traversler aralıklarla yol eksenine dik olarak yerleştirilen ve raylara mesnetlik görevi yapan üstyapı elemanlarıdır. Malzemesine göre başlıca travers türleri; beton, ahşap ve çelik traverslerdir. Raylar ile beraber üstyapının taşıyıcı tabakasını oluştururlar ve başlıca görevleri şunlardır [2];

- Hattaki iki ray sırası arasındaki hat genişliğini (ekartman) muhafaza etmek,
- Ray tabanları veya ray-travers mesnetlerinde kaynaklanan yükleri, güvenli şekilde karşılamak, sönümlemek ve alt bölümü ile balast tabakasına iletimini sağlamak,
- Rayların bir arada yer değiştirmesini sağlamak,
- İki ray sırası boyunca raylardan yayılan elektriği yalıtımak,

- Balast ile bir sürtünme oluşturarak yolun boyuna ve yanal yönde kayma yapmasını engellemek.

Traversler yapıldıkları malzemeye göre üç farklı tipte olabilir. Bunlar; ahşap traversler, çelik traversler ve beton traverslerdir. Tasarım aşamasında hattın işletim koşulları, çevresel etkiler ve kullanım tipine göre uygun olan travers tipi seçilmelidir. Traversler bağlantı elemanlarına uyumlu, yeterli ebatlarda, yalıtımı yüksek malzemeden ve dayanıklı olmalıdırlar. Ayrıca zamanla tekrarlayan hat yüklerine karşı mukavemetli ve yeterli elastiklik de olmalıdırlar.

2.1.3 Bağlantı elemanları

Rayları, raylara ve traverslere bağlayarak stabilitesi yüksek bir çerçeve oluşturan, raylar ve ray ile travers arasında kuvvet aktarımını sağlayan, rayların şekil ve yer değiştirmelerini önleyen, üstyapıya gelen etkileri elastik şekil değiştirmelerle azaltan, cebire, krapo, ergo, bulon, tirfon ve selet gibi malzemelerdir.

Ray-travers bağlantı elemanlarının ana görevleri aşağıdaki gibidir:

- Ray ve traversler arasında etkilerin üstyapıya iletimini sağlamalıdır. Bu kuvvet ilişkisi stabil ve kontrol altında tutulabilir, veya değiştirilebilir olmalıdır,
- Demiryolu aracı tekerlekleri tarafından iletilen yükleri güvenle karşılamalıdır, kısmen azaltmalı ve geniş bir yüzey boyunca traverse veya taşıyıcı yapıya eş bir dağılımla iletilmelidir,
- Ekartmanı korumalı ve enine eğimin verilmesini (gereken koşullarda) sağlamalıdır,
- Konforun arttırılmasına yardımcı olmalı, elemanların deformasyonun ve gürültünün azaltılması için rayların taşıyıcı elemana oturtulmasını yardımcı olmalıdır,
- İyi bir yük dağılımı sağlamalı ve kenarlarında yüksek basınçlar oluşturmamalıdır,
- Olağanüstü durumlarda hattın güvenliğini ve sağlamlığını korumalıdır,

- Rayların ve yol çerçevesinin boyuna ve yanal yönde şekil değiştirmelerine karşı yüksek bir direnim göstermelidir,
- Raylar ve taşıyıcı sistem arasında elektrik yalıtımını sağlamalıdır,
- Çevre ve iklim şartları ile uyumlu olmalıdır.

2.1.4 Balast

Raylar ve traverslerin bağlantılı elamanları ile birleşiminden oluşan stabilitesi yüksek çerçevenin (hat çerçevesi) alt bölümüne yerleştirilip, elastik bir yatak oluşturan ve çapları genellikle 20-70 mm aralığında olan sağlam, köşeli kırılmış taşlardır.

Balastın işlevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir[1];

- Hat titreşimlerinin büyük çoğunluğunu azaltma,
- Hattın boyuna ve yatay doğrultuda kaymasının önüne geçme,
- Traverslerden gelen yükü yayarak altyapıya iletme,
- Drenajı kolaylaştırmak,
- Hat geometrisindeki hataların giderilmesini sağlamak (Hat bakım ekipmanları vasıtasıyla)

Hem iyi bir hat stabilitesi sağlamak hem de üstyapıdan gelen yüklerin doğru bir şekilde altyapıya iletilebilmesi için balastın doğru granülometride ve sıkıştırmada olması gerekmedir. Eğer balast tabakası fazla sıkıştırılırsa bu sefer yağmur suyu drenajının yeterli olarak sağlanması zorlaşır. Hat inşaa edilirken bu gereksinimlerin karşılanması gerekmektedir. Bu sayede hem uzun ömürlü bir yatırım sağlanır hem de bakım maliyetleri düşürülür. İleriki bölümlerde hem balastlı hat hem de balastsız hattın özellikleri detaylı olarak incelenecektir.

2.2 Demiryolu Altyapısı

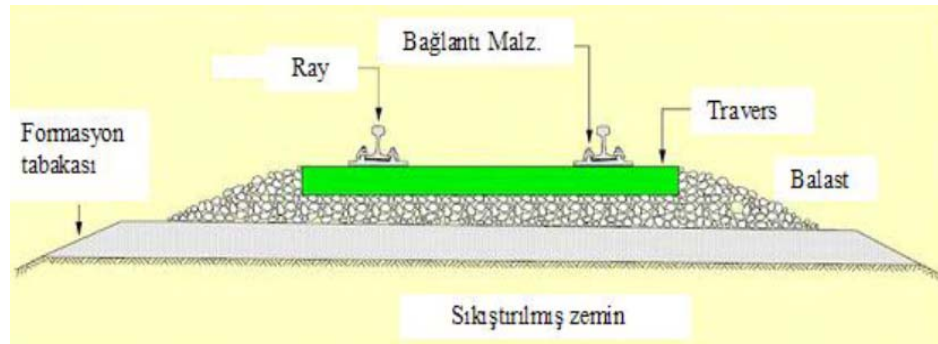
Demiryolu güzergahının geçtiği doğal arazi üzerinde; yol kotunu ifade eden kırmızı çizgi ile arazi kotunu ifade eden siyah kot arasındaki seviye farklarını ortadan kaldırarak düzgün ve doğrusal bir demir yolu profilini elverişli kılan imalatlarla bu imalatlar ve üstyapıyı dış etkenlere karşı koruyan ve üstyapının sağlıklı çalışmasına olanak sağlayan tesislerin tümüne birden demiryolu altyapısı denilmektedir [3].

Altyapı yolun esas taşıyıcı bölümüdür ve üstyapıdan gelen yükleri şekil değiştirmeye uğramadan doğal zemine iletir. Altyapının görevlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [3]:

- Ağır dingil yüklerini taşıyarak üstyapının sağlıklı çalışmasını sağlamak,
- Üstyapıyı dış etkenlere karşı korumak,
- Düzgün ve doğrusal bir demir yolu profili elde edilmesini sağlamak,
- Siyah çizgiyi (kotu) kırmızı çizgiye (kota) getirmek,
- Yolu sürekli olarak kırmızı çizgide (kotta) tutmaktır.

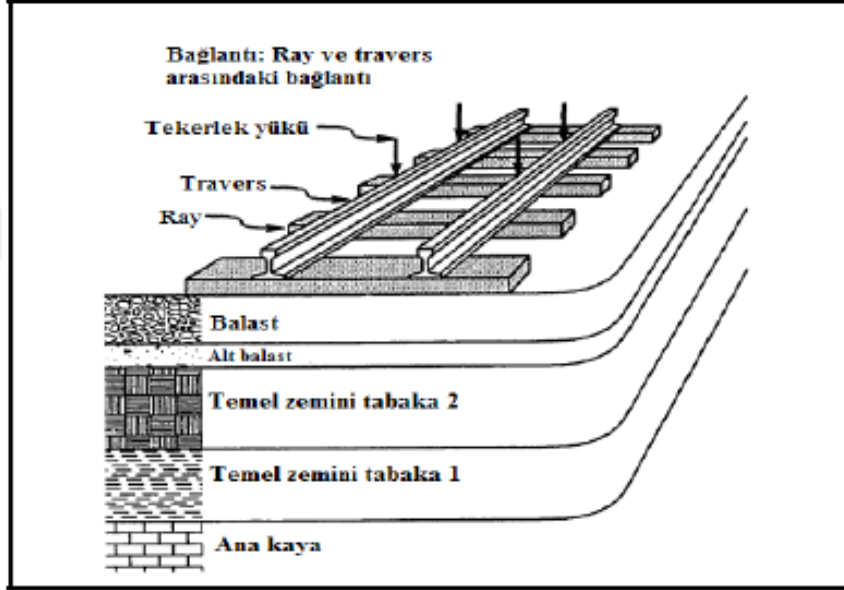
Altyapı katmanları ; taban zemini, yarma ve dolgular ve bütün demiryolu sanat yapılarıdır (tünel, köprüler, istinat yapıları, geçitler vb.). Altyapıyı incelerken iki ana başlıkta incelemek daha sağlıklı olacaktır. Birinci tür sanat yapılarından oluşan altyapı türleridir.

- **Platform:** Demiryolu hattının taban zemini şekil bozukluğuna uğramayan ve çeşitli yönlerden gelen etkilere karşı dayanıklı bir platform görevi görmektedir. Demiryolu aracı kaynaklı sürekli gerilme ve yüklerine karşı koymakta ve mukavement sağlamaktadır. Uzun ömürlü bir demiryolu yapısı için deformasyon minimum seviyede kalmalıdır. Bu sebeple demiryolu güzergahının geçtiği bölgedeki doğal zemin eğer yeterli taşıyıcılığa sahip değil ise üstyapı inşaatından önce altyapının çeşitli yöntemlerle güçlendirilmesi ve üstyapı ile arasında oturmanın minimum olduğu bir formasyon tabakası tasarlanmalıdır. Bu tabakada platform kesitinin bir parçasıdır. Şekil 2.4'te genel hatları ile demiryolu hattı platformu gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Demiryolu platformu[3]

Altyapı tabakalarının kalınlıkları trafik yüklerine ve işletim amacına göre değişmektedir. Burada amaç mümkün olduğunca daha rijit bir sistem oluşmasını sağlamaktır. Şehir içi hatlar ve yüksek hızlar hatlarda formasyon tabakası ile farklı rijitlik değerlerine ulaşabilmektedir. Ayrıca Şekil 2.5'te balast tabakasının altındaki demiryolu altyapı elemanları sırayla gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Demiryolu altyapısı elemanları[4]

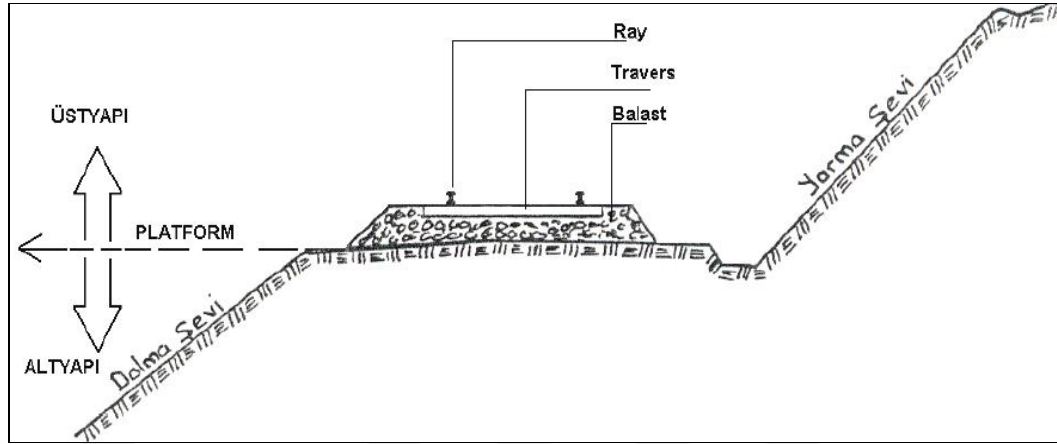
- **Yarmalar ve dolgular:**

Yarmalar ve dolgular demiryolu güzergah çalışmasında doğal arazi durumu ile hat güzergahının yükselti farklarından dolayı oluşan demiryolu bölümleridir.

Eğer arazi kotu (siyah kot), yol kotundan (kırmızı kot) yüksek ise yüksek olan bölümler kazılarak harf edilir ve kademeli veya kademersiz olarak şevler düzenlenir, bu bölümlere yarma adı verilir. Yarma şevlerinin eğimleri zeminin stabilitesine göre değişiklik gösterir.

Eğer arazi kotu (siyah kot), yol kotunun (kırmızı kot) aşağısındaysa ise alçak olan bölümler doldurularak arazi kotu ile yol kotu seviyeleri birbirine yaklaştırılır, bu bölümlere dolgu(dolma) adı verilir. Dolgu şevinin eğimi genellikle 2/3'tür. Ancak kullanılan stabilize malzemesinin özelliklerinin düşük olduğu yerlerde şev eğimi azaltılabilir. Dolgular, dolgu yapmaya uygun yerlerden alınan malzeme ile doldurulur[4].

Şekil 2.6’da yarma ve dolguların bir demiryolu hattı üzerinde görünümü verilmiştir.



Şekil 2.6 : Hat üzerinde yarma ve dolgu şevleri[3]

- **Tüneller:**

Demir yolu güzergâhının geçtiği doğal arazide, arazi kotunun (siyah çizgi) yol kotundan (kırmızı çizgi) fazlaca yüksekte kaldığı ve yarma oluşturma maliyetlerinin yüksek boyutlara ulaştığı bölümlerde, arazinin delinmesi suretiyle oluşturulan iki ucu açık geçitlere tünel denir [4].

- **Köprüler ve menfezler:**

Demiryolları güzergahı üzerinde bulunan akarsu, uçurum, karayolu ve bunun gibi engelleri geçmeye yarayan ve açıklığı 8 m ve daha büyük olana sanat yapılarına köprü denir. Eğer açıklık 8m den küçük ise bu yapıya menfez adı verilir.

Demiryolu köprülerinin rolü; köprüden geçiş tasarım hızı için ve bütün yolculuk tipleri, yol platformunun devamlılığını koruyarak, normal hatlardaki gibi aynı konfor, güvenlik ve şartlarda bir yolculuk sağlamaktır [5]. Köprüler büyük ölçüde rijit olan yapılardır ve rijit olmayan doğal zeminden köprülere geçişte konforun, güvenliğin ve sağlamlığın korunabilmesi için bu özel geçiş noktalarında bazı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar tezin ileriki bölümlerinde incelenecektir.



Şekil 2.7 : Demiryolu köprüsü

- **Sağlamlaştırma yapıları:**

Dolgu ve yarma bölgelerinde uygulana şevin stabilitesini muhafaza etmeye yarayan istinat yapıları ve benzerleridir.

2.3 Demiryolu Altyapısında Zemin ve Koruyucu Tabakalar

Demiryollarında gerekli durumlarda yukarıdaki bölümlerde açıklandığı gibi sanat yapılarından oluşmuş altyapılar kullanılmaktadır. Bununla beraber doğal zeminli ve formasyon tabakalı altyapılar demiryolu hatlarının büyük bölümünde kullanılmaktadır.

Doğal zeminli ve formasyon tabakalı yapılar maliyet olarak sanat yapılarından daha uygun olmakla beraber zemin analizleri sonucunda gerekirse güçlendirme gerektirmektedir ve bu da ek bir maliyet getirmektedir. Zemin kalitesi ve özellikleri altyapının görevlerini doğru şekilde yerine getirebilmesi için hayati önem taşımaktadır.

Demiryolu altyapı zemin tabakası özellikle hat kalitesinin yeterli standarda ulaşması güvenli ve konforlu bir sürüş için çok önemlidir. Raylı sistem işletmeleri yolcu konforunu arttırmaya azami önem vermektedir. Genellikle bu sebeple üstyapı elemanlarına odaklanılsa da hatta oluşan birçok problem altyapı ve zemin kaynaklı olmaktadır. Hatta oluşması muhtemel sorunlardan kurtulmak için altyapı tasarımı kritik önem teşkil etmektedir. Uzun süreli kullanımlar için zeminde oluşacak

bozulmalara müdahalede bulunmak, üstyapıdaki sorunları çözmek kadar kolay olmadığı için zemin tabakasının dikkatle analiz edilmesi ve gereken iyileştirmelerin zamanında yapılması gerekmektedir. Ayrıca altyapısal bakım çalışmaları , üstyapıya göre hattın işletmesini daha çok etkilemektedir. Bu yüzden hattın trafik yüklerine dayanıklı, uzun ömürlü, konforlu, ekonomik olması ve minimum bakıma ihtiyaç duyması için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır [1];

- Yeterli dolgu ve sıkıştırma ile doğal zeminin oturmalarını engellemeli ve zeminde yeterli stabilite sağlanmalıdır,
- Demiryolu yükleri altında sağlamlığını korumalıdır,
- İşletme süresince zemin formasyonun bozulmalara uğramaması gerekmektedir.

Bu bölümde taban zemininin bileşenleri ve görevleri, zemin sınıflandırması, altyapıyı etkileyici faktörler, hidrojeolejik şartlar, don koruma tabakaları ve altyapı kaynaklı sorunlar incelenecektir.

2.3.1 Demiryolunda taban zemini

Taban zemini demiryolunun geçtiği bölgede balast tabakasını taşıyan doğal zemin tabakasıdır. Taban zemini ile balast tabakaları arasında çakıl ve topraktan oluşan, düzleştirilmiş, hat stabilitesinin sağlanması sağlayan tabakaya da formasyon tabakası denir (Şekil 2.3). Taban zemini üstüne gelen tekrarlayan yüklere karşı sağlam olmalı ve bozulmamalıdır. Ayrıca sağlam bir platform oluşturulabilmesi için çevreden gelen etkilere karşı dayanıklı olmalıdır.

2.3.2 Geoteknik analiz ve zemin sınıflandırmaları

Geoteknik analiz demiryolu zemininin bileşenlerinin ve taşıyıcılık kapasitesinin ortaya çıkarılması için çok önemlidir. Hattın geçeceği güzergahta yapılan bu analizler sayesinde zemin tabanının demiryolu için elverişli olup olmadığı anlaşılır. Buna göre zeminde yapılması gerekli iyileştirmeler ve tabaka kalınlıkları belirlenir.

Zeminlerin geoteknik olarak sınıflandırılması birçok ülkede birbirinden farklılık göstermektedir. Bu sınıflandırmalarda yararlanılan iki temel karakteristik vardır. Bunlar: granülometrik derecelendirme ve Atterberg limitleridir (sıvılaşma, esneklik ve büzüşme limitleri). Birleşik Krallık, Almanya, Fransa, İsviçre gibi ülkeler USCS

(Birleşik Zemin Sınıflandırma sistemi) sınıflandırma sistemini kullanmaktadır. Bu sisteme ayrıca Casagrande sınıflandırması da denilmektedir.

İskandinav ülkeleri genellikle granülometrik derecelendirmeye göre zemini sınıflandırır. İtalya, Yunanistan ve diğer ülkeler ise AASHO(Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Kurumları Birliği) sınıflandırma sistemini kullanmaktadır [1].

Bu sınıflandırma sistemleri arasında bazı küçük farklılıklar olmakla beraber aşağıdaki nitelendirmeler geneldir;

- Kaya: Parçalanmaya ve zayıflamasına bağlı olarak düşük, orta ve yüksek sınıflı kayalar,
- Çakıl ($2\text{mm} < d < 20\text{mm}$): İyi veya zayıf sınıftaki çakıl, balçıklı çakıl, killi çakıl,
- Kum ($0.1\text{mm} < d < 2\text{mm}$): Balçıklı kum, killi kum
- İnce taneli toprak ($0.001\text{mm} < d < 0.1\text{mm}$): Hafifçe plastik balçık, hafifçe plastik kil, çok plastik balçık, ve çok plastik kil
- Organik toprak

2.3.2.1 Demiryolları için zemin sınıflandırmaları

UIC Code 719R (2008)'e göre zemin kalite sınıfları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Zeminin geoteknik özellikleri; mineral zeminler, organik zeminler, karışık zeminler.
- Yerel hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar.

Hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar aşağıdaki ölçütlere uyarsa taşıma kapasitesi açısından elverişli olarak nitelendirilebilir.

- o En üstteki zemin tabakası, en yüksek yeraltı suyu seviyesinden olumsuz etkileneceği düzeyin üzerinde ise (bu düzey en kötü hava koşullarında ve drenajın bulunmadığı durumlar için değerlendirilmelidir.),
- o Altyapı içinde, düşey, boyuna ve enine doğrultularda hiçbir doğal su akıntısı bulunmuyorsa,
- o Yağış suları taban zemininden doğru biçimde uzaklaştırılıyor, boyuna ve enine drenaj sistemi doğru olarak çalışıyorsa.

Eğer bu üç ölçütten herhangi biri bile sağlanmıyorsa, hidrolojik ve hidrojeolojik koşullar zayıf olarak değerlendirilir.

Bu bilgiler ışığında zemin kalite sınıfları Çizelge 2.1’deki gibi “QSi” sınıflandırma sistemi ile sıralanabilir.

Çizelge 2.1: Zemin kalite sınıfları[6]

Kalite Sınıfı	Tanımlama
QS0	<i>Uygun olmayan zeminler:</i> Bu zeminlerle iyi bir altyapı oluşturulamaz, bu nedenle iyileştirilmeleri gerekir (belirli bir derinliğe kadar daha kaliteli bir zeminle değiştirmek, bağlayıcı malzemelerle stabilizasyon, geotekstil kullanmak, kazıklarla kuvvetlendirmek vb.). Bu nedenlerle, yol yatağı tabakalarının boyutlandırılmasında bu zemin türleri kullanılmamıştır.
QS1	<i>Zayıf zeminler:</i> Bunlar “iyi bir drenajın sağlanması” ve “iyi düzeyde bir bakım uygulanması” koşullarıyla, doğal halleriyle kullanılabilirler. Bunlar için uygun yöntemlerle (örn. Bağlayıcı katkısı ile stabilizasyon) kalite artırımı da düşünülebilir.
QS2	<i>Orta düzeydeki zeminler</i>
QS3	<i>İyi zeminler</i>

Farklı kalite sınıfları için malzeme özellikleri UIC Code 719R (2008)’e göre Çizelge 2.2’deki gibi listelenebilir:

Çizelge 2.2: Farklı Zemin kalite sınıfları için zemin özellikleri[6]

Zemin Kalite Sınıfı	Zemin Tipi (Geoteknik Sınıflandırma)	
QS0	0.1	Organik zeminler
	0.2	% 15'den fazla (1) ince dane içeren ve yüksek su kapsamı olan yumuşak zeminler: bu nedenle sıkılamaya uygun değildirler
	0.3	Tiksotropik zeminler (2) (örn: akıcı kil)
	0.4	Çözünebilir malzeme içeren zeminler (örn: kaya tuzu ve jips)
	0.5	Kirli zemin (örn: endüstriyel atıklar)
	0.6	Karışık malzemeli / organik zeminler (2)
QS1	1.1	% 40'dan fazla (1) ince dane içeren zeminler (0.2 de tanımlanan zemin türlerinin dışındakiler)
	1.2	Hava etkisine çok duyarlı kayalar Örn.: – Kuru birim hacim ağırlığı (ρ_d) < 1,7 ton/m ³ ve yüksek gevrekliğe sahip tebeşir – Marn (kireçli kil) – Hava koşullarından etkilenmiş Şeyl (killi şist)
QS1(3)	1.3	% 15 – 40 (1) ince dane içeren, 0.2 de tanımlanan zemin türlerinin dışındaki zeminler
	1.4	Hava etkisine orta düzeyde duyarlı kayalar Örn.: – Kuru birim hacim ağırlığı (ρ_d) < 1,7 ton/m ³ ve gevrekliği az olan tebeşir – Hava koşullarından etkilenmemiş Şeyl (killi şist)
	1.5	Yumuşak kaya Örn.: Microdeval wet (MDE) > 40 ve Los Angeles (LA) >40
QS2 (4)	2.1	% 5 – 15 (1) ince dane içeren zeminler
	2.2	% 5 'den az oranda (1) ince dane içeren üniform zeminler ($C_u \leq 6$)
	2.3	Orta sert kaya Örn.: 25 < MDE ≤ 40 ve 25 < LA ≤ 40
QS3	3.1	% 5 'den az oranda (1) ince dane içeren iyi derecelenmiş zeminler
	3.2	Sert kaya Örn.: Eğer MDE ≤ 25 ve LA ≤ 30 ise
(1) Bu yüzdelere, 60 mm gözlü elekten geçen zeminler için yapılan dane dağılımı (granülometri) analizine göre belirlenmiştir, (2) Bazı demiryollarında bu zeminleri QS1 sınıfı içinde kabul ederler, (3) Bu zemin türleri, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar iyi ise QS2 sınıfına sokulabilir, (4) Bu zemin türleri, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar iyi ise QS3 sınıfına sokulabilir.		

2.3.2.2 Taban zemini taşıma kapasiteleri için zemin sınıflandırmaları

UIC Code 719R'e (2008) göre, taban zemininin taşıma kapasitesi şu faktörlere bağlıdır:

- Dolgu ya da yarma taban zemininin kalite sınıfına,
- Eğer varsa, iyileştirilmiş taban zemini kalitesi ve tabaka kalınlığıdır.

Bu sayılan faktörlere göre, üç taşıma kapasitesi sınıfı söz konusu olmaktadır:

P1: Zayıf taban zemini

P2: Orta taban zemini

P3: İyi taban zemini

Sınıflandırma yöntemleri değişik demiryollarında farklı olup, Çizelge 2.3'te bunlardan birisi gösterilmektedir.

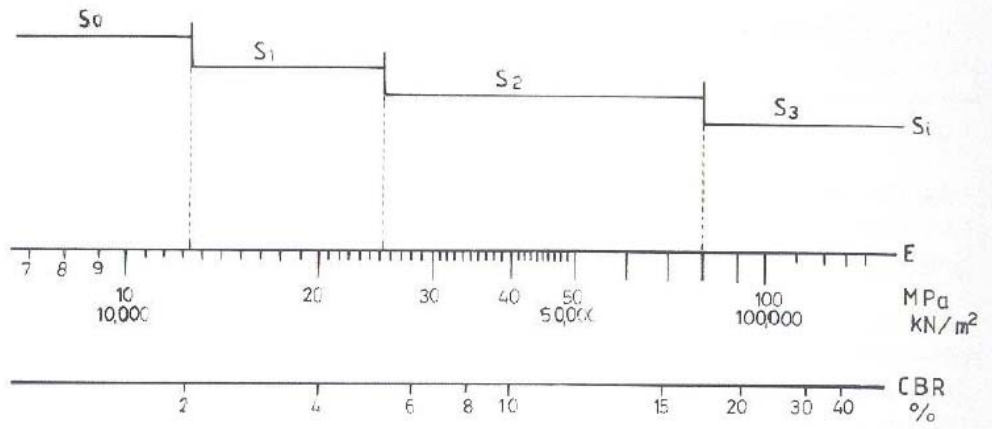
Çizelge 2.3: Taban zemini taşıma kapasitesi sınıfları[6]

Zeminin Kalite Sınıfı	Altyapı İçin Gerekli Taşıma Kapasitesi Düzeyi	Hazırlanmış Altyapı Tabakası Özellikleri	
		Kalite Sınıfı	Minimum kalınlık "e _f " (m)
QS1	P1	QS1	---
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	---
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	---

2.3.3 Altyapının mekanik karakteristikleri

Demiryolu zemininin ilk vazifesi ara katmanlar (balast ve alt balast tabakaları) tarafından yeteri kadar sönmölenen tekerlek yüklerini taşımaktır. Zeminin tren kaynaklı yükleri düzgün olarak taşıyabilmesi için bazı mekanik özellikleri bünyesinde bulundurması gerekir. UIC tarafından yapılan çeşitli testler sonucunda zemin sınıflarının her biri için elastisite modülü aralıkları belirlenmiştir (Şekil 2.8). Kayalık zeminler için elastisite modülü kaya malzemesinin yapısına göre değişkenlik gösterir. R altyapı için elastisite modülü 3×10^4 kg/cm² dolayındadır.

Altyapının sınıflandırmasında elastisite modülünün yanında taşıma kapasitelerinin de belirlenmesi gerekir. Şekil 2.8'de farklı altyapı zemin sınıflarına karşılık gelen CBR değerleri gösterilmiştir [1].



Şekil 2.8 : Zemin sınıflarına göre CBR endeksleri

2.3.4 Formasyon tabakaları

Eğer altyapı zemin tabakaları demiryolu hattının geçtiği güzergahda S_1 ve S_2 zemin sınıflarında ise bu bölgelerde daha iyi kalitede zemin malzemeleri ile bir üst tabaka uygulamak tavsiye edilmektedir ve bu tabakaya formasyon tabakası denilmektedir.

Formasyon tabakası tabandan daha fazla sıkıştırılmalıdır. Bir çok demiryolu ağı işletmesinde Dolgu durumlarında, zemin tabakalarında sağlanması gereken CBR değeri %95 iken formasyon tabakasında %100 olması beklenmektedir [1].

Formasyon tabakası homojen ve yüksek yoğunlukta olmalıdır. Bu tabakanın görevleri;

- Yük dağılımını sağlayarak düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde yüksek gerilmeleri azaltmak,
- Suyun zemin yüzeyini etkilemesinin önüne geçmek,
- Balastın, altyapı ve zemin ile karışmasını engellemek
- Dona karşı hassas zeminlerde ısı yalıtıcılık olarak sıralanabilir.

Formasyon tabakası balasttan zemine kadar elastisite modülünün kademeli değişimini sağlamaktadır. Ayrıca balast tabakası kalınlığını da azaltmaya yarar. Formasyon tabakasının faydalı olması için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır;

- Zemin malzemesinin su içeriği az olmalıdır, aksi halde zeminin içindeki toprak muhtevası demiryolu hattında oluşacak titreşim ve dinamik yüklemeler ile beraber formasyon tabakasının ile karışır ve yanal eğimi bozar.

- Yapılacak formasyon tabakası eş dağılımlı olmalıdır ve ince taneli malzemenin bölgesel yoğunlaşması özelliğini içermemelidir.

Hat güzergahındaki altyapı kalitesine bağlı olarak formasyon tabakasının kalınlığı değişmektedir. Yarı amprik olarak bulunan formasyon tabakası kalınlığı değerleri Çizelge 2.4'te verilmektedir[1].

Çizelge 2.4: Taban zemini taşıma kapasitesi sınıfları[1]

Altyapı kalitesi	Formasyon tabaka kalitesi	Formasyon tabaka kalınlığı(cm)
S ₁	S ₂	30-55
S ₁	S ₃	20-40
S ₂	S ₃	20-30

2.3.5 Dona karşı duyarlılık ve koruma

Dona duyarlı zeminler, gerekli kılcal boşluklara sahip ve ince daneli zeminlerdir. Bu kılcallar arasında rahat bir şekilde hareket eden su, düşük sıcaklıklarda bu bölgelerde donarak, zeminin şişmesine neden olur. Silt, siltli kum ve düşük plastisiteli killer dona karşı duyarlı zeminlerdir.

Zeminin dona karşı duyarlılığı Çizelge 2.5'te verilmiştir. Bu indekslere bağlı olarak koruyucu tabaka kalınlıkları da Çizelge 2.6 ve 2.7'de gösterilmiştir.

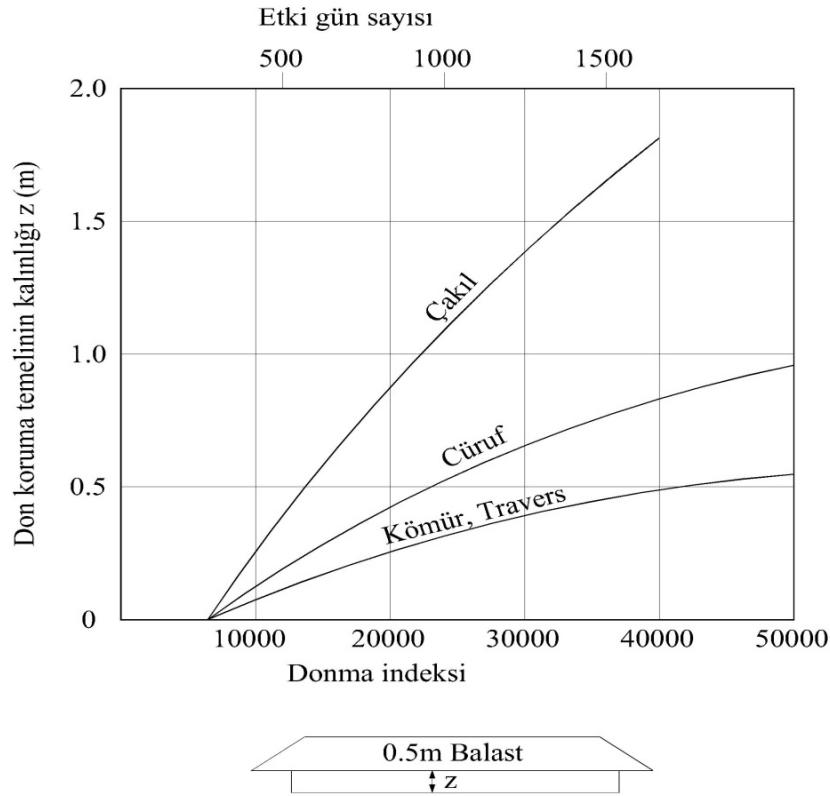
Eğer zemin dona karşı duyarlı ise bu bölgede don koruma tabakası önlemi alınmalıdır. Aşağıdaki gibi birçok farklı yöntem don koruma için kullanılmaktadır;

- Çakıl, cüruf gibi malzemeler ile koruyucu tabaka oluşturmak,
- Geotekstil ve geogrid malzemeler ile hattın drenaj sistemi ve stabilitesi desteklemek,
- Bir ısı yalıtım tabakası(sıkıştırılmış polisitren izolasyon malzemesi ile) sağlayarak,
- Zemin yükseltici sanat yapıları (viyadük vb.) kullanarak da zeminde oluşacak don etkisi engellenebilir (eğer diğer yöntemler etkisiz ise).

Çizelge 2.5: Tekrar aralıklarına göre don indeksleri[1]

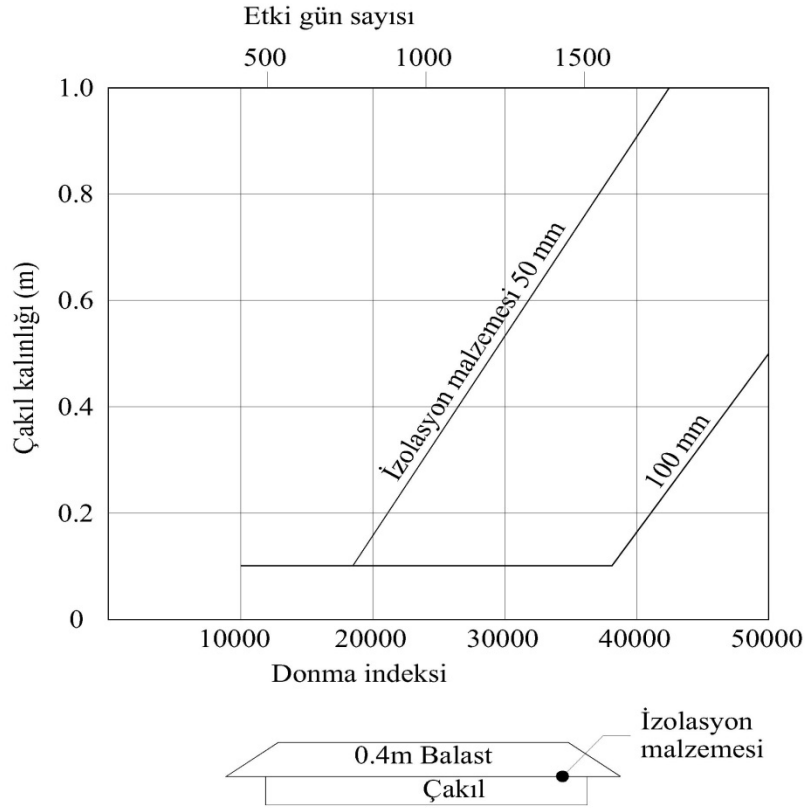
Don indeksi	Donma ihtimali	Belli bir sürede beklenen tekrarlama sıklığı
F_2	%50	2 yılda bir
F_5	%20	5 yılda bir
F_{10}	%10	10 yılda bir
F_{100}	%1	100 yılda bir

Çizelge 2.6: Don koruma tabaka kalınlıkları 0.5m ballast tabakası için[7]



Koruyucu tabaka kalınlığının artması, Çizelge 2.6’da görüldüğü gibi donma riskini büyük oranda düşürmektedir. Koruma tabakaları; çakıl, cüruf, kömür gibi farklı malzemelerden oluşabilmektedir. Grafikteki bütün değerler 0.5m balast serildikten sonra eklenen koruyucu madde kalınlığına (z) göre belirlenmiştir. Çizelge 2.7’de ise 0.4m balast altına serili çakıl malzemesi için değerler verilmiştir.

Çizelge 2.7: Don koruma tabaka kalınlıkları 0.4m balast tabakası ile kullanılan çakıl ve izolasyon malzemesi(50mm) için[7]



Şekil 2.9 : Şıkıştırılmış polistiren izolasyon malzemesi ile balast altına don tabakası serilimi[9]

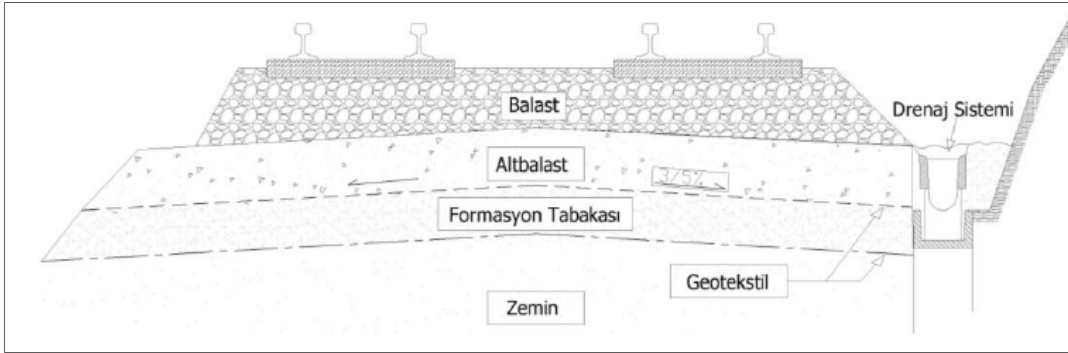
2.3.6 Demiryollarında geosentetiklerin kullanımı

Geosentetikler farklı alanlarında da olduğu gibi demiryollarında da birçok farklı amaçla kullanılmaktadır. Demiryollarında geosentetiklerin ana kullanım sebebi farklı seviyedeli oturmaları engellemek ve drenaj yapılarına katkı sağlayarak demiryolu altyapı ve üstyapısını geliştirmek, daha az malzeme kullanılmasını sağlamak, şevlerin stabilitesini arttırmak ve tünel bölgelerinde su yalıtımını sağlama olarak belirtebiliriz [9].

Geosentetik ürünler, geotekstiller, geomebranlar ve geogridler olarak üç bölümde incelenmektedir ve her bir ürün farklı amaçlar ile kullanılır.

Geotekstillerin raylı sistemlerde kullanımlarını aşağıdaki gibi listeleyebiliriz;

- Balast altı tabakası olarak, altyapı üstüne hattın uygun yerleşimini sağlamak,
- Tekrarlı yükler altında hat taşıyıcıların mekanik direncini yükseltmek,
- Drenaj ve filtreleme görevlerini yerine getirmek,
- Zemini don etkisinden korumak.



Şekil 2.10 :Geotekstillerin altyapıda kullanımı

Geomembran malzemeler demiryollarında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kullanılarak açılan tünellerde su yalıtımında ve kazısı tamamlanan tünellerde su geçirmez yapı oluşturulmasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.11 :Tünelde geomembran uygulaması

Geogrid malzemeler ise istinat yapıları, şev yapıları, zemin güçlendirmelerinde ve balast altı tabakası olarak altyapıda kullanılmaktadır. Yapıları çok dayanıklıdır, çevresel faktörlerden çok etkilenmezler ve yüksek mekanik dayanım özelliği sayesinde balast kalınlıklarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

2.4 Demiryoluna Etkiyen Yükler

Demiryolu altyapı ve üstyapı tasarımında, yapıya etkiyen yükler çok önemli bir belirleyicidir. Yükler ve kullanım amacı hatta kullanılacak malzeme tipini ve boyutlarını, altyapı elemanlarını, maliyeti direkt olarak etkiler. Bu sebeple yük çeşitleri ve analizi dikkatlice yapılmalıdır. Demiryoluna farklı etkenlerden gelen birçok farklı yük vardır. Bu yükler kaynaklarına göre aşağıdaki başlıklarda incelenebilir;

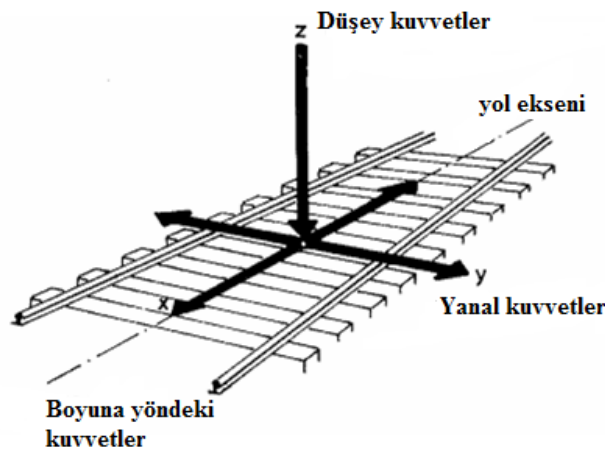
- Taşıt kaynaklı yükler
- Yol kaynaklı yükler
- Çevresel yükler

Taşıt kaynaklı yükler, hattın kullanım amacına göre farklılık gösteren dingil ve trafik yükleri olarak sıralanabilir. Bu yükleri tasarıma direkt etki eden dikey yükler olarak niteleyebiliriz.

Yol kaynaklı yükler, yolun geometrik özellikleri sebebiyle yolun yatay kurb bölümünde oluşan merkez kaç kuvveti, cebireli ray eklerindeki şok kuvvetler, yolda zamanla oluşan bozukluklar sebebiyle oluşan ekstra zorlanmalar bu kategoride incelenebilir. Yolun geometrik özelliklerinin oluşturduğu (merkez kaç kuvveti) genellikle yanal etkiler oluştururlar. Eğer yol geometrik tasarımı hat işletme özelliklerine göre tasarlanmazsa raydan çıkma (derayman) vakaları oluşabilir.

Çevresel yükler, yüksek sıcaklık farkları sebebiyle oluşan sürekli kaynaklı uzun raylarda bazı gerilmeler, hava kirliliği, nem, kum fırtınası gibi etkenlerin oluşturduğu ray teker ilişkisini etkileyen yüklerdir. Paslanma ve donma sebebiyle oluşan elastisite bozuklukları da farklı çevresel etkilerdir. Çevresel etkiler genelde boyuna kuvvetler yaratırlar. Hattaki boyuna kuvvetler özellikle köprü, viyadük gibi sanat yapılarında önemlidir. Özellikle sıcaklık farklarının çok yüksek olduğu bölgelerdeki sanat yapılarında, bu etkilerden koruyucu önlem olarak ray genişleme contası kullanılabilir.

Şekil 2.12’de demiryoluna farklı yöndeki etkiler gösterilmiştir. Demiryolu yapısına etkiyen dikey yükler tasarımın belirlenmesinde çok önemlidir. Trafik ve dingil yükleri başlıklarında detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 2.12 :Demiryoluna etkiyen yüklerin doğrultuları[11]

2.4.1 Dingil yükleri

Dingil yükleri her bir demiryolu katar yükünün belirlenmesi için önemlidir. Bu yükler, demiryolu aracında her bir dingil için statik yük olarak tanımlanabilir. Hattın taşıma kapasitesinin belirlenmesi için çok önemli bir parametredir. Dingil yükü arttıkça hattaki bakım gereksinimi ve çeşitli bozulmaları (ray, altyapı, balast vb.) artar. Demiryolu işletim türlerine göre çeşitli araçların boş ve dolu yükleri Çizelge 2.8’de gösterilmiştir. UIC (Uluslararası Demiryollar Birliği) 714R standardına göre, farklı dingil yüklerine göre hat sınıflandırması Çizelge 2.9’da gösterilmiştir. Bu sınıflandırma tasarım aşamasında malzeme seçiminden altyapı taşıma kapasitelerine göre birçok tasarım kriterinin belirlenmesinde kolaylık sağlamaktadır. Kategori E, D ve C ağır yük ve yük taşıyan hatları belirten sınıftır. B ve A kategori genellikle yolcu taşımacılığında, şehir içi ve şehirler arası hatlarda kullanılan dingil yükleridir.

Çizelge 2.8: Farklı demiryolu araçları için boş ve dolu dingil yükleri[2]

	Dingil Sayısı	Boş	Yüklü
Tramvay	4	50 kN	70 kN
Hafif raylı sistem	4	80 kN	100 kN
Yolcu vagonu	4	100 kN	120 kN
Motorlu yolcu vagonu	4	150 kN	170 kN
Lokomotif	4 veya 6	215 kN	-
Yük vagonu	2	120 kN	225 kN
Ağır yük vagonu(ABD, Avusturalya)	2	120 kN	250-350 kN

Çizelge 2.9: UIC yük sınıflandırması[11]

Hat Kategorisi	Maksimum Dingil Yüğü	Birim Uzunluęa göre Maksimum Yüğü
A	16 t	5.0 t/m
B1	18 t	5.0 t/m
B2	18 t	6.4 t/m
C2	20 t	6.4 t/m
C3	20 t	7.2 t/m
C4	20 t	8.0 t/m
D2	22.5 t	6.4 t/m
D3	22.5 t	7.2 t/m
D4	22.5 t	8.0 t/m
E4	25 t	8.0 t/m
E5	25 t	8.8 t/m

Çizelge 2.9'daki kategoriler, üstyapının belirlenmesinde ve hat standartlarının oluşturulmasında kolaylık sağlayan geniş kullanım alanına sahip değlerdir.

2.4.2 Trafik yükleri

Demiryolunda dingil yükleri katar yüklerini, katar yükleri ise trafik yüklerini oluşturur. Bir demiryolu hattında çok farklı araçlar çalışmaktadır: yolcu araçları, yük araçları, ana hat lokomotifleri, manevra motorları gibi. Araç yüklerinin cebrik toplamı gerçek trafik yükünü vermez çünkü hatta uyguladığı yükler ve hızlar farklıdır. Bundan dolayı, gerçek trafik yükünü hesaplamak için bazı kriterler gereklidir. Demiryolu mühendisliği trafik mühendisliğinin Yolcu Araç Birimi (YAB)'nin benzer bir yaklaşımdan faydalanır. Trafik yükünü (tonajı) hesaplamak için farklı trenlerin yükleri eşdeğer yolcu tren yüküne dönüştürölür.

Öncelikli olarak hattın teorik yüğü Tteo denklem 2.1'de verilen formülle hesaplanır[1];

$$T_{teo} = T_y + k_{yük} T_{yük} + k_{loko} T_{loko} \quad (2.1)$$

T_y = günlük yolcu trafik yüğü

$T_{yük}$ = günlük yük trafik yüğü

Tloko= günlük lokomotif trafik yükü

kyük=1.15

kloko=1.40

Daha sonra tren hızına göre trafik yükü hesaplanır.

$$T=S \cdot T_{teo} \quad (2.2)$$

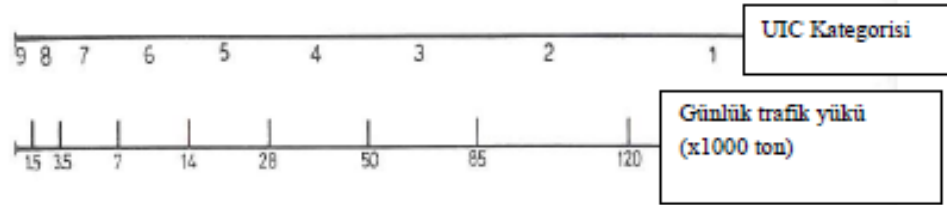
S=1.0; yolcu trafiksiz hatlar

S=1.1; karışık trafik hatları ve $V_{maks.} < 120$ km/sa

S=1.2; karışık trafik hatları ve $120 < V_{maks.} < 140$ km/sa

S=1.25; karışık trafik hatları ve $V_{maks.} > 140$ km/sa

Bu hesaplamalar ışığında UIC standartlarına göre günlük trafik yüklerine göre sınıflandırma yapılmaktadır. 2.2’de verilen formülde de görüldüğü gibi artan hızlar hat trafik yükünü artıran bir katsayı olarak davranmaktadır.



Şekil 2.13 :UIC trafik yükü kategorileri



3. HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE ÜSTYAPI TİPLERİ

Geleneksel demiryolu tasarımında, rayları taşıyan traverslerin oluşturduğu hat çerçevesi balastın oluşturduğu altlığa yerleştirilir. Uygun maliyet olması, kolay yapılması ve bakım-onarım yapılabilmesi balastlı hattın en önemli özellikleridir.

Bununla beraber özellikle son otuz yılda balastsız (rijit) hat sistemlerin kullanımı günden güne artmaktadır. Uzun süreli kullanım ömrü, yüksek trafik yoğunluklarına karşı dayanıklılığı, bakım için kısa sürelere ihtiyaç duyması, teknolojik gelişimlere kolay uyum sağlaması gibi birçok faktör balastsız hattı maliyet yüksekliğine rağmen tercih edilebilir kılmaktadır.

İşletme tipine ve kullanılan bölgelere göre balastlı ve balastsız hat tipleri değişkenlik göstermektedir. Örnek olarak bir tünel yapısında balastsız hat kullanımı, tünel kesitlerinin küçültülmesine katkı sağladığından tercih edilebilirken, şehirler arası uzun hatlarda yapım maliyetini düşürmesi ve yüksek hızlarda yeterli yanıl direnci sağlaması sebebiyle balastlı hatlar tercih edilebilir. Şekil 3.1’de Balastlı ve Balastsız hat kesimlerinin katmanları verilmiştir.

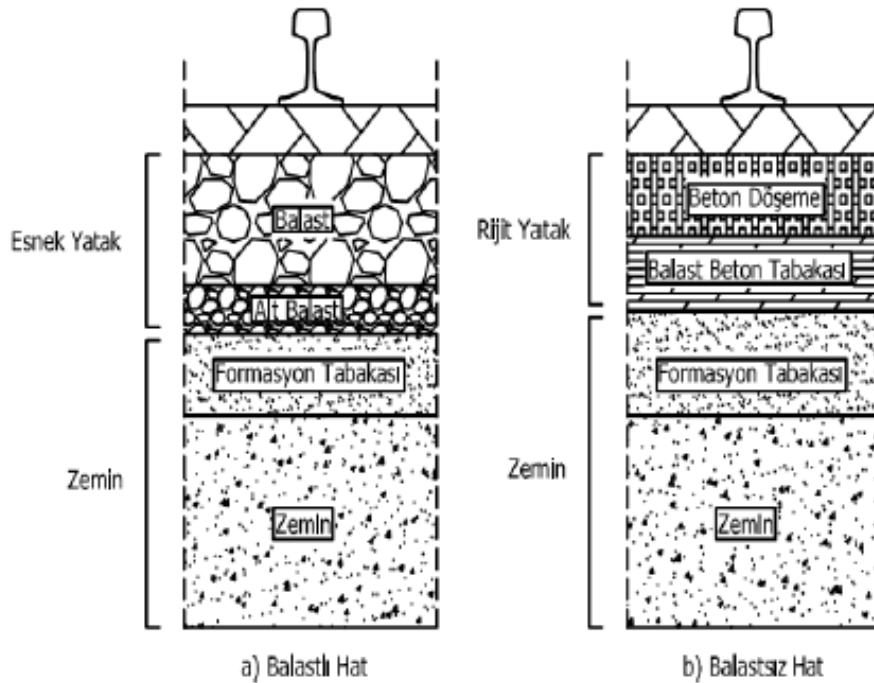
3.1 Balastlı Üstyapı

Balastlı hat uygulamaları dünya genelinde hala en çok kullanılan hat tipidir. Özellikle düşük yapım maliyetleri, hızlı uygulanabilirlik, yapımda ve geometride değişikliğe elverişlilik ve balastın elastikliği, balastlı hat uygulamalarının günümüzde hala sıklıkla kullanılmasını sağlamaktadır. Balastlı hat taşıt kaynaklı titreşimlerin önemli kısmını sönümlemeli, yeteri kadar yükü doğru şekilde altyapıya yaymalı ve yağmur sularının drenajına yardım etmelidir. Yukarıdaki gibi birçok tercih sebebinin yanı sıra balastlı üstyapıda karşılaşılan bazı sorunlar aşağıdaki gibidir [12];

- Zamanla balast taneleri taşıt yükleri altında aşınması ve hattın taşıma kapasitesi zayıflaması,
- Balastın doğrusal olmayan plastik davranışı sebebiyle hattın geometirisinde, bazı bozulmalar meydana gelmesi,

- Drenaj kalitesi zamanla düşürmesi ve yenileme gerektirmesi,
- Bakım maliyetlerinin giderek artması,
- Yüksek hızlarda balastın sıçrama riski,
- Balast yatağının eğimli ve geniş olmasından dolayı tünel kesitlerinin artması
- Köprü ve viyadük gibi sanat yapılarında balastın oluşturduğu ağır yükten dolayı, daha büyük kesitli taşıyıcı mesnet gereksinimidir.

Balastlı hattın tüm özellikleri incelendiğinde ilk yatırım maliyetinin düşük olması, yeterli elastikliği sağlamanın kolay olması, hızlı yapıma elverişli ve inşa hatalarını tolere etmenin kolay olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilen bir üstyapı tipidir diyebiliriz. Ancak balast malzemesinin yüksek trafik yüklerinde aşınmaya uğraması, uzun ömürlü olmaması, sıklıkla bakım gerektirmesi ve maliyetin zamanla artması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. İşletim amacı, yıllık trafik yükleri, geçilecek güzergah, sanat yapılarının tipi ve sayısı, hat geometrisi, altyapı özellikleri gibi birçok kriter incelenerek balast kullanımına karar verilmelidir.



Şekil 3.1 : Balastlı ve Balastsız Hat Kesitleri [9].



Şekil 3.2 : Balastlı hat görünümü

3.2 Balastsız Üstyapı

Balastsız üstyapı (rijit üstyapı), balast tabakası yerine daha az şekil değiştiren beton, betonarme, ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapısıdır. Taşıma tabakası asfalt ya da beton olabilir. Elastikliğin sağlanması için ray veya travers altındaki elastik malzemeler kullanılır.

Günümüzde uzun ömürlü hat yapımı, düşük ilk yatırım maliyetli hat yapımına göre daha önemli bir kriter olmaktadır. Balastlı hat, balastsız hatta göre düşük bir maliyet ile tamamlanabilir ancak demiryolu işletim ömrü, bakım maliyetleri, tüneller ve sanat yapılarındaki kullanım gibi faktörler incelendiğinde, balastsız hat kullanımı üstünlüklere sahiptir. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [13];

- Tünel yapısı yüksekliğinin, ve genişliğinin düşürülmesi,
- Daha az bakıma ihtiyaç duyması,
- Uzun ömürlü ve sağlam olması,
- Yüksek yanal kayma direnci sağlayarak yüksek hızlara elverişli olması,
- Yüksek hızlarda balast sıçraması sorununun önüne geçmesi,
- Viyadük ve köprülerde, balasttan gelen yükün azalmasıyla, daha ekonomik, daha ince, daha zarif bir görünüme sahip yapılar elde edilmesidir.

Bununla beraber balastsız hattın balastsız hatta göre zayıf yönleri; yüksek yatırım maliyetleri, hat üzerindeki değişiklikleri sınırlaması, elastikliği sağlamak için ray altından ve travers altında tabakalara olana gereksinim, kalifiye işçilik ve uzun yapım süreleridir.

Geçmişten günümüze birçok farklı balastsız hat tipi olmak ile beraber bunlar iki ana sınıfta toplanabilir. Bunlar; mesnetli döşemeler ve sürekli döşemelerdir. Çizelge 3.1’de farklı kullanım amaçlarına göre ayırık mesnetli ve sürekli mesnetli döşemeli mevcut balastsız hat sistemleri listelenmiştir

Çizelge 3.1 : Mesnet durumuna göre balastsız hat türleri [14]

Ayrık Mesnetlenmiş Ray				Sürekli Mesnetlenmiş Ray	
Traversler veya Bloklar Betona Gömülü	Traversler Asfalt/Beton Tabakasının Üzerinde	Prefabrik Beton Üstyapılar	Monolitik (Tek Döküm) Üstyapılar	Gömülü Raylı Üstyapılar	Kenetlenerek Sürekli Mesnetlenmiş Üstyapılar
Rheda	ATD	Shinkansen	Rasengleis	Deck-Track	Cocon Track
Züblin	BTD	Bögl	FFC	Infundo-Edilon	ERL
Stedef	SATO	ÖBB-Porr	Hochtief	BBERS	Vanguard
Sonneville-LVT	FFYS	IPA	BES		KES
Heitkamp	GETRAC		BTE-BWG/HILTI		SFF
SBV	WALTER		PACT		Saargummi
Walo					

Ayrık mesnetli döşeme 0.50 m ile 0.80 m arasında değişkenlik gösteren sabit aralıklı mesnetlere 2 parçalı olan ve yaylı elemanlar ile ayarlanabilen bağlantılar ile alttaki taşıma tabakası üstüne yerleştirildiği sistemlerdir. En bilinen örnekleri; Rheda, Züblin, ÖBB-Porr, Shinkansen (prefabrik) sistemleridir. Rheda (Almanya) ve Porr (Avusturya) balastsız sistemleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Rheda balastsız hat sistemi [15]



Şekil 3.4 : ÖBB-Porr balastsız hat serilimi [16]

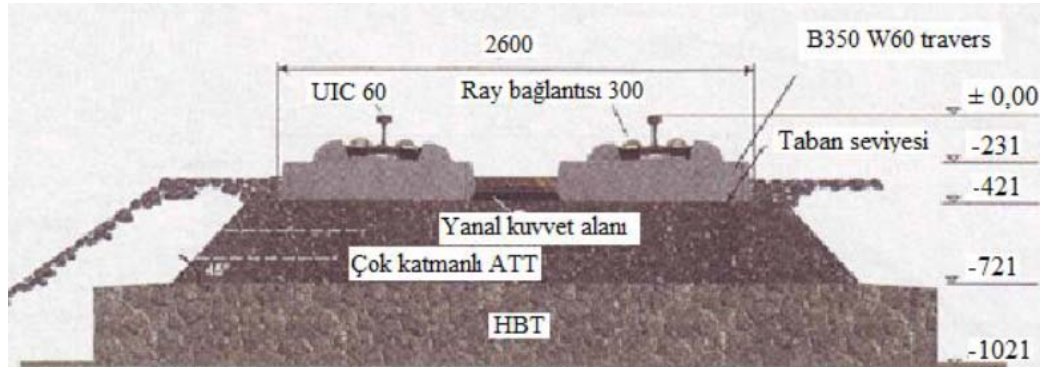
Sürekli mesnetli döşemelerde ise balastsız hat sistemi bir asfalt veya beton taşıyıcı sistem üzerine monte edilerek veya beton tabaka içine rayların gömülmesi ile oluşturulur. Gömülü ray sistemi için en çok kullanılan Edilon sistemi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



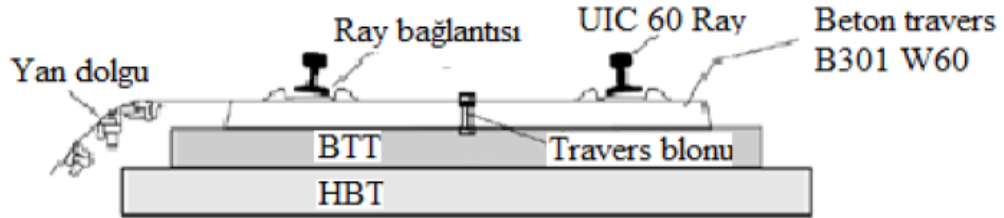
Şekil 3.5 : Edilon gömülü ray sistemi [2]

Gömülü raylı sistemler, oluklu ray ile birlikte genellikle kent içi demiryolu uygulamalarında kullanılmaktadır. Yüzey kaplamaya imkan vermesi, hemzemin olması ve estetik görüntü sağlama gibi olumlu yönleri sahiptir. Rayların yanına monte edilen elastik malzemeler yardımı (corkelast, ray kapsülü) ile raylar beton içine gömülerek hat oluşturulur.

Bir taşıma tabakası üzerine serilen sürekli mesnetli balastsız hatlarda geleneksel balastlı tabaka yerine asfalt veya beton taşıyıcı tabakalar kullanılmaktadır. Asfalt taşıyıcı tabaka diğer sistemlere göre daha elastik bir yapıya sahip olması sebebiyle değişen koşullara karşı kolaylıkla uyum sağlayabilmektedir. Yapının zarar görmesi durumunda ise traversler kolayca değiştirilebilmekte ve rutin bakım da yine kolaylıkla yapılabilmektedir [14]. Bu sistemler taşıyıcı tabaka türlerine ve beton travers tiplerine göre farklılık gösterebilir. Şekil 3.6’da asfalt taşıyıcı tabakalı sistem (ATD) için, Şekil 3.7’de ise beton taşıyıcı tabakalı sistem için örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Asfalt taşıyıcılı balastsız hat [14]



Şekil 3.7 : Beton taşıyıcılı hat [14]

Geçmişten günümüze bakıldığında balastsız üstyapı kullanımının yıllar için de büyük oranda arttığı görülmektedir. Çevre ile uyumlu olması, uzun servis ömrü, sağlam malzemesi, düşük bakım gereksinimi gibi faktörler balastsız hat tercihini artıran faktörlerdir.

3.3 Balastlı ve Balastsız Üstyapıların Karşılaştırması

Balastlı ve balastsız üstyapıların birbirlerine üstün geldiği ve eksik kaldığı bazı durumlar vardır. En uygun hat tipi seçilirken trafik yükleri, mevcut zemin durumu, maliyet analizleri, hat gabarileri ve planlanan sanat yapıları, raylı sistem tipi gibi birçok parametre değerlendirilmelidir. Çizelge 3.2’de balastlı ve balastsız üstyapıların avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.2 : Balastlı ve balastsız hatların avantaj ve dezavantajları [17]

Balastlı Üstyapı Avantajları	Balastsız Üstyapı Avantajları
Düşük yatırım maliyeti	Uzun hat ömrüne ve az bakım ihtiyacına sahip olması
Yapım ve bakım açısından en üst seviyede bilgi birikimi ve tecrübeye sahip olunulması	Düşük bakım maliyeti
Hat geometrisinde değişikliklere elverişli olması	Yüksek stabilite ve hat geometrisi/ güzergah özelliklerini koruması
	Sanat yapılarında uygulanabilirliğinin uygun maliyetli olması ve altyapısal uyum
	Güvenlik araçları ve acil durumlar için taşıt trafiğine elverişli olmak
Balastlı Üstyapı Dezavantajları	Balastsız Üstyapı Dezavantajları
Hat stabilitesinin düşük olması ve zamanla bozulmalara uğraması	Yüksek yatırım maliyeti
Güzergah tasarımının daha düşük toleranslara sahip olmasında dolayı güzergahı sınırlıyıcı yönü olması	Hatta uygulanacak beton mesnet plaklarına yapım aşamasında azami önem gerektirmesi
Yüksek hızlı hatlarda balast sıçraması sorunları	Hatta çeşitli düzenlemeler yapılmasının balastlı hatta göre daha uzun süre alması
	Demiryolu güzergahında daha yüksek gürültü oluşturması

4. KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLER

Kent içi ulaşımda kullanılacak sistemin belirlenmesi; taşınacak yolcu sayısı, saatlik taşıma kapasitesi, yolculuk frekansları gibi farklı faktörler vardır. Genellikle bu faktörler farklı bölgelerde oluşacak değişken yolculuk talepleri sebebiyle farklılık gösterirler ancak önemli olan operasyona açılacak sistemin güvenli, hızlı, ekonomik, dakik ve düzgün işleyen bir sistem olmasıdır.

Kent içi raylı sistemlerde verimli bir işletimin sağlanması için yukarıda belirtilen faktörler ışığında yolcu kapasitesi çok önemli bir belirleyicidir. Kapasite, taşıma türlerini en belirgin biçimde birbirinden ayıran özelliklerinden biridir. Bir sistemin yolcu kapasitesi, o sistemdeki her bir taşıtın yolcu kapasitesinin, taşıtların doruk saatteki doluluk oranının; işletmenin iki taşıtı arası süresinin, sistemin iş başına taşıt kapasitesinin işlevidir. Yolcu kapasitesine göre raylı sistemler aşağıdaki gibi farklı başlıklar altında sınıflandırılır;

- Tramvay sistemleri
- Hafif raylı sistemler (LRT)
- Metro sistemleri

Tarihi gelişim sürecinde ilk olarak tramvay ve banliyö ile başlıyana ve onları takiben metro ve hafif raylı sistemler ile zenginleşen toplu taşıma sistemleri, maliyet, kapasite ve performans açısından farklılıklar sergilemektedir. Genel trafik içinde, yüzeyde işletilen ve hızı, maliyeti ve kapasitesi düşük olan tramvay en düşük kapasiteli, tamamı trafikten ayrılmış hatlarda (tünelde, viyadükte, korunmuş olarak yüzeyde) işletilen yüksek kapasiteli ve yüksek maliyetli olan metro sistemi ise en yüksek kapasiteli sistemdir.

Bu iki sistemi buluşturan hafif raylı sistemler ise giderek daha çok tercih edilmektedir [18]. Bu bölümde farklı türdeki kent içi raylı sistemler incelenecektir.

4.1 Tramvay Sistemleri

Karayolu ulaşım araçları ile aynı alanı kullanan, yol ve trafik durumuna göre bir sürücü tarafından kumanda edilen, elektrik enerjisini katenerden veya zemindeki güç ünitesinden alan, günümüzde daha çok bir adım atılarak binilebilen alçak zeminli araçların kullanıldığı en düşük yolcu kapasiteli raylı toplu taşıma sistemleridir. Karayolu ile aynı seviyede bir işletim olduğu için mevcut karayolu trafiğine uygun olarak tasarlanmalıdır. Tramvay araçları geçit ve kavşaklarda geçiş üstünlüğüne sahiptir. Ancak mevcut karayolu trafiği sebebiyle genellikle 25-30km/saat gibi düşük ortalama ticari hızlarda seyreder ve maksimum hızı 50km/saat'tir.

Tramvay sistemleri genellikle merkezi güzergahlardan tekerli taşıma trafiğine paralel olarak işler. Tramvaylar uzunluk olarak en fazla 60 metre civarındadır ve bu sebeple taşıma kapasiteleri diğer demiryolu araçlarına göre sınırlıdır. Yolcu kapasitesi saatlik azami 16.000 kişi civarındadır. Yaygın olarak 750 V DC elektrik akımını kullanırlar ve 1435 mm ekartman açıklığına sahiptirler. Durak aralıkları 600 m – 1 km gibi kısa aralıklardadır ve duraklar otobüs duraklarına benzer yapıda hemzemin olarak inşa edilen basit tesislerdir [19].

Altyapı maliyetleri için bakıldığında tramvay sistemi genellikle mevcut karayolu altyapısını kullandığı için hafif metro ve metro sistemlerine göre çok daha düşüktür (bkz. Çizelge 4.1).

Tramvay sistemleri nüfusu fazla olmayan yerleşim birimlerinde ana ulaşım sistemi olarak düşünülebilir ancak nüfusu fazla olan ve yolculuk talepleri tramvay sistemlerinin kapasitelerini aşan yerleşim merkezlerinde daha çok ana ulaşım sistemlerini besleyen ve yolcu transferlerini sağlayan tali ulaşım sistemleri olarak tercih edilmektedirler [20].



Şekil 4.1 : Tramvay sistemi

4.2 Hafif Raylı Sistemler (LRT)

Hafif raylı sistemler; yolculuk kapasitesinin yüksek olduğu bölgelerde, ana ulaşım sistemi veya ana ulaşım sistemine bağlantı sağlayan yan sistemler olarak inşa edilen sistemlerdir. Hafif raylı sistemler “Hafif Metro” olarak da adlandırılmaktadır. Genellikle yapılaşmış ve nüfus artışlarının sınırlı kaldığı bölgelerde kullanılır. Maksimum saatlik yolcu kapasitesi 24.000 kişi civarındadır.

Hat açıklığı tramvayda olduğu gibi genellikle 1435 mm’dir . Enerji temini katenerden veya 3. ray diye tabir edilen alttan beslemeli sistem ve 750 V DC veya 1500 V AC akım ile sağlanabilmektedir. Kendine ait hatları genellikle zemin seviyesinde olmaktadır ancak gerekli durumlarda tünel, viyadük, yarmalar gibi sanat yapılarını da kullanırlar. İstasyon aralıkları değişken olmakla beraber genellikle 600-1000 m’dir. Hafif raylı sistemler 40-60 km/saat ortalama işletim hızına ve 80 km/sa maksimum seyir hızına sahiptir [22].

Yatırım maliyetleri açısından incelenirse; hat güzergahı ve kullanılacak sanat yapılar büyük önem teşkil eder. Eğer kent trafiğinden bağımsız bir özel hat planlanırsa buna bağlı olarak hem konfor ve işletim hızları hem de maliyet artacaktır.



Şekil 4.2 : Hafif raylı sistem [23].

4.3 Metro

Karayolları ile kesişmeyen, kendine ait koridoru olan, genellikle yerin altında giden, yolcu taşıma kapasitesi en yüksek olan kent içi toplu taşıma sistemlerin olan metro sistemleri, ayrıca yatırım maliyetleri de en yüksek olan kent içi raylı ulaşım sistemidir. Tamamen kendine ayrı bir koridora sahip olan metro sistemleri, yüzeydeki trafikden tamamen ayrılmak için yer altına derin tüneller ile veya viyadükler ile yükseltilerek inşa edilebilmektedirler. Yapılaşmanın ve nüfusun çok yüksek olduğu bölgelerde, trafikte kaybolan zamanı düşürmek amacı ile çok yüksek kapasiteye sahip bir toplu taşıma sistemidir.

Maksimum yolcu kapasitesi, araç tipine ve uzunluğuna göre saatlik 60.000 yolcu ve üstüne çıkabilmektedir. Çok yüksek düzeyde otomasyon gerektiren kompleks sistemlerdir. Enerji temini katener sistemlerinden veya üçüncü raydan sağlanır ve doğru işletim için sinyalizasyon çok önemlidir. Yaygın olarak 750 V DC, 1500V DC kullanılsa da 3000 V D’de kullanılabilir. Ortalama hız 40-60 km/saat aralığındadır ve maksimum hız 90 km/saat’tir. İstasyonların çoğunluğu yer altındadır bu sebeple

güvenlik, altyapı gibi birçok maliyet bu sistemleri açık ara en yüksek maliyetli sistemler yapmaktadır (bkz. Çizelge 4.2).

Gelişen teknoloji ile beraber bazı metro hatları sürücüsüz otomatik tren kontrol sistemlerini kullanmaktadır. Günümüzde başarılı olan; Lyon metro D hattı, Paris metro 14 hattı, Singapur Northeast hattı gibi uygulamalar sebebiyle sürücüsüz sistemlere talep giderek artmaktadır [19].



Şekil 4.3 : Metro sistemi [24].

Çizelge 4.1 : Kapasitelerine göre kent içi ulaşım sistemleri [24]

Taşıt Türü	Taşıt Kapasitesi (yolcu)	Taşıtlar Arası Süre (saniye)	İz Başına Taşıt Kapasitesi (taşıt/saat)	İz Başına Yolcu Kapasitesi (yolcu/saat)	En Üst Yolcu Taşıma Sınırı (yolcu/saat)
Otomobil	4	3	1 200	1 600	4 800
Dolmuş	7	10	360	2 140	2 520
Minibüs	11	12	300	2 800	3 300
Otobüs	80	30	120	6 400	9 600
Tramvay/HRS	300	45	80	16 000	24 000
Metro	1 000	90	40	27 000	40 000
Tren	2 000	120	30	40 000	60 000

Çizelge 4.2 : Maliyetlerine göre kent içi raylı sistemler [25]

	Otobüs	Metrobüs	Tramvay	Hafif Raylı	Metro
Km Başına Yatırım Maliyeti (Milyon \$)	<0,5	2,0-10,0	5,0-10,0	10,0-30,0	40,0-90,0

Çizelge 4.2 incelendiğinde Km başına metro yatırım maliyetlerinin diğer raylı sistemlere göre ciddi anlamda yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi genellikle metro altyapısı (tünel, viyadük vb.) maliyetlerinin çok daha fazla olmasıdır. Metrodan sonra en yüksek yatırım maliyeti kendine ayrı bir koridora sahip olan hafif raylı sistemlerdir.

5. HAFİF RAYLI SİSTEMLERDE GEÇİŞ BÖLGELERİ

5.1 Geçiş Bölgeleri

Tezin önceki bölümlerinde bahsedildiği gibi demiryolu üst ve altyapısının amacı taşıta elastik bir destek görevi görmektedir. Raylı sistemlerde geçiş bölgeleri hattın üstyapısında veya altyapısında ani değişimlerin meydana geldiği bölgelerdir. Bu değişimler hatta dinamik yükleme durumunu artırır ve zamanla bakım zorunluluğu oluşturur. Köprü/viyadük yaklaşımları, hemzemin geçitler, özel makas bölgeleri, balastlı hattan balastsız hatta geçilen bölgeler hattın elastik performansının değişim gösterdiği belli başlı demiryolu geçiş bölgeleridir.

Hat alt ve üstyapısının yol boyunca benzer elastisiteye sahip olması hareket halindeki trenlerin hem konforu için hem de uzun vadede oluşacak bakım gereksinimlerini azaltabilmek için çok önemlidir. Bu sebeple uzun ömürlü bir demiryolu yapısı inşa edebilmek için hatta oluşacak bu ani yapısal değişimlerin olma ihtimali olan bölgeler tasarım aşamasında tespit edilmelidir. Gerekli iyileştirme uygulamalarının yapılmadığı durumlarda çok ağır bakım maliyetleri, hat performansında düşüşler, üstyapı ve altyapı hasarlarının tekrarlayan tren yükleri ile beraber meydana gelmesi kaçınılmaz olacaktır. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırma sadece bu geçiş bölgelerinde yapılan bakım çalışmaları sebebiyle yıllık 200 Milyon \$ harcadığını belirlemiştir [26]. Bu yüksek bakım maliyetlerinin ve hattaki deformasyonların önüne geçmek için farklı iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir.

Tezin amacı; hafif raylı sistemelerin köprü/viyadük yaklaşım bölgelerinde, uzun vadede karşılaşılan sorunlara alınabilecek önlemlerin incelenmesidir. Buna bağlı olarak tezin bu bölümünde köprü yaklaşım bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ve nedenleri, literatürde bulunan bazı yöntemler ve çalışmalar incelenecektir. Örnek çalışmada ise hafif raylı bir sistem için köprü yaklaşım bölgesinde uygulanan iyileştirme yöntemleri ve bu yöntemlerin normal duruma göre sağladığı katkılar detaylı olarak irdelenecektir.



Şekil 5.1 : Köprü yaklaşımında bir demiryolu geçiş bölgesi [27].

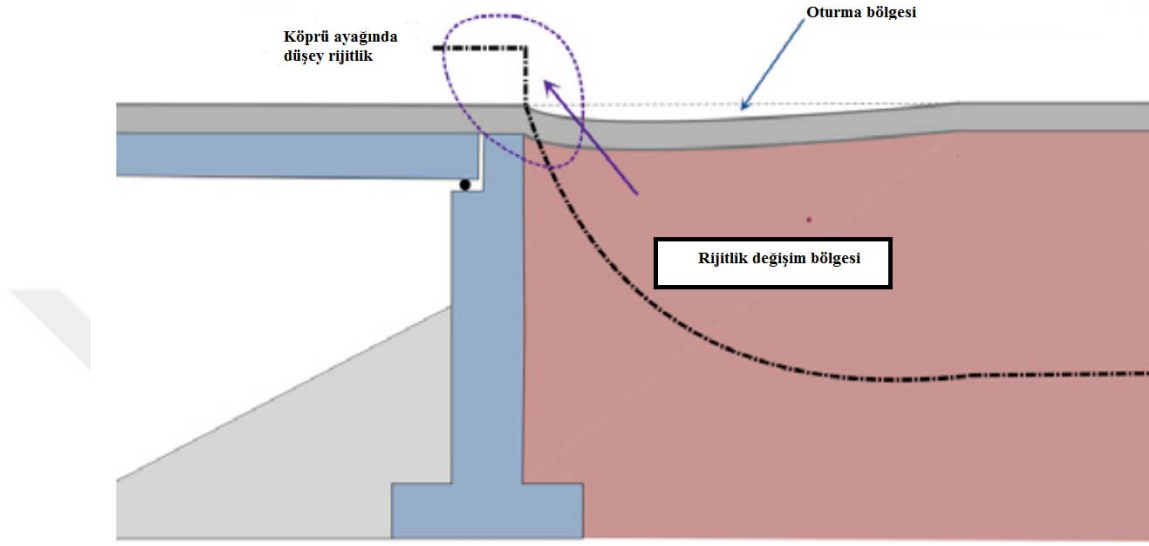
5.1.1 Geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ve nedenleri

Geçiş bölgelerinde hattın servis ömrü boyunca farklı altyapıların farklı elastik davranışlarından kaynaklı bazı sorunlar oluşmaktadır. Geçiş bölgesinde gözlemlenen bazı sorunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz ;

- Travers ve balast arasında boşluklar oluşması,
- İki farklı bölgede farklı oturmalar oluşması,
- Rayda aşınmalar ve şekil bozuklukları ortaya çıkması,
- Üstyapı elemanlarında yıpranmalar,
- Beton traverslerde ve balastsız hattaki mesnetlerde çatlaklar oluşması,
- Geçiş bölgesindeki altyapıda zamanla bozulmalar oluşması,
- Ray açıklığı ve hat gabarisinde bozulmalar,
- Rayın geçiş sırasında tekerlek yükleri etkisi ile aşağı yukarı hareket izlemesi,
- Hat geometrisinin zamanla değişmesi,
- Geçiş bölgesindeki oturmaların kabul edilebilir değerlerin üzerine çıkması,

Bu sorunların kaynağını incelersek; köprüler ve viyadükler gibi sanat yapıları, derin temeller üzerine inşa edilen, zemin oturmalarına dayanıklı yapılardır.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi köprü yaklaşım bölgeleri ise dolgulardan meydana gelmekte ve genellikle yükleme ile beraber köprülere kıyasla büyük miktarda oturmaların olduğu bölgelerdir.



Şekil 5.2 : Köprüde oluşan oturma bölgesi [28]

Zemin ve köprü arasındaki trenin hareket yüzeyindeki seviye değişimleri, statik tekerlek yüküne göre 3 kat daha fazla bir dinamik yükleme durumuna neden olur. Bununla beraber geçiş bölgelerinde rijitlik değişimleri de olmaktadır. Ani rijitlik değişimleri tek başına dinamik yüklemeyi etkilemese de ray seviyesindeki değişimler ile birleşince önemli bir etki yaratır ve ek bir stres yaratarak hat bileşenlerindeki bozulmaları arttırır. Bu durum demiryolu hattında rijitlik uyumsuzluğu kaynaklı temel bir problem yaratmaktadır.

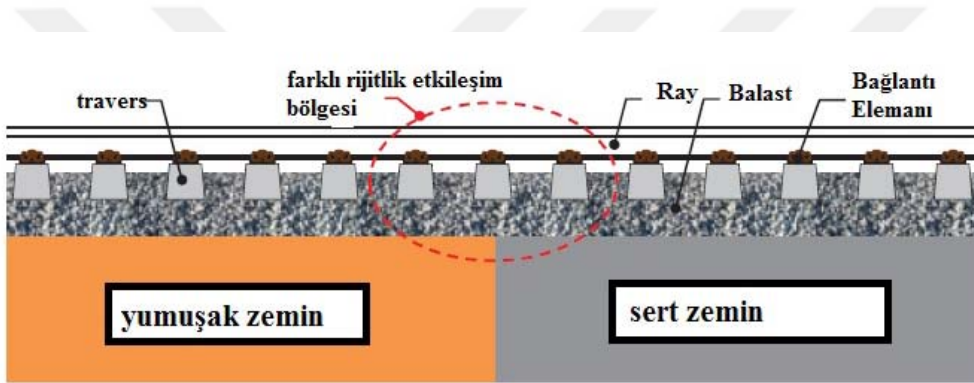
Bazı durumlarda köprüdeki rijitlik değeri açık hattaki değerin iki katına kadar çıkabilmektedir. Bundan dolayı hattaki sürüş konforu düşer, köprüye yaklaşım bölgesinde, demiryolu yapısındaki elemanlarda ek bir gerilim oluşur ve köprü üzerindeki dinamik yükleme artar [29].

Dinamik etkiler minimal düzeyde olsa bile geçiş bölgesinde zemin üzerine oturan balastlı hat, köprü üzerindeki balastlı hattan daha fazla oturma eğilimi gösterir. Bu durum özellikle derin temeller üzerine inşa edilmiş köprünün yüksek rijitliği sahip olması nedeniyle oturma durumunun ihmal edilecek kadar küçük olduğu durumlarda

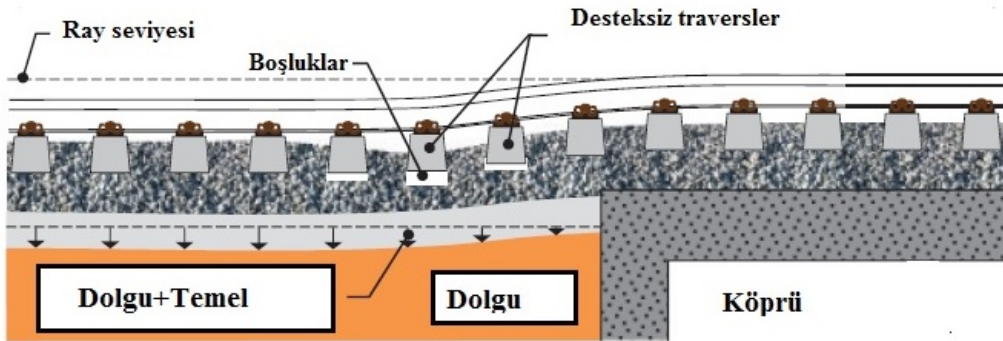
gözlenir ve geçiş bölgesinin olduğu bölgedeki balast tabakası altında zamanla bir çukur oluşur.

Oturmaların kaynağı sadece geçiş bölgelerindeki farklı rijitlikler yüzünden oluşan ray seviye değişimleri ile oluşan ani dinamik yük etkileri değildir. Bununla beraber iyi sıkıştırılmamış zeminler, yetersiz drenaj, erozyon, çevresel faktörler, donma-çözülme durumları ve doğru zeminler ile dolgu yapılmamasıdır.

Şekil 5.3 ve 5.4'te ise sert zemin-yumuşak zemin geçişlerinde rijitlik etkileşim bölgesi ve köprü yaklaşımında oluşan travers altı boşluklar ve seviye değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : Düşük rijitlikten yüksek rijitliğe geçişte etkileşim bölgesi [29]

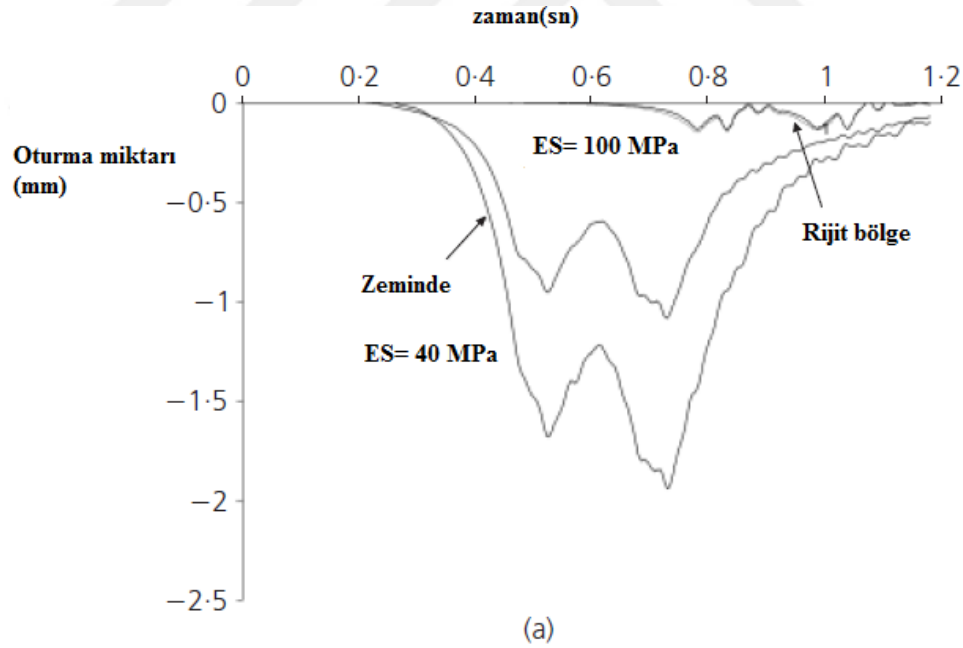


Şekil 5.4 : Bir köprü yaklaşım bölgesindeki ray seviye değişimi [29]

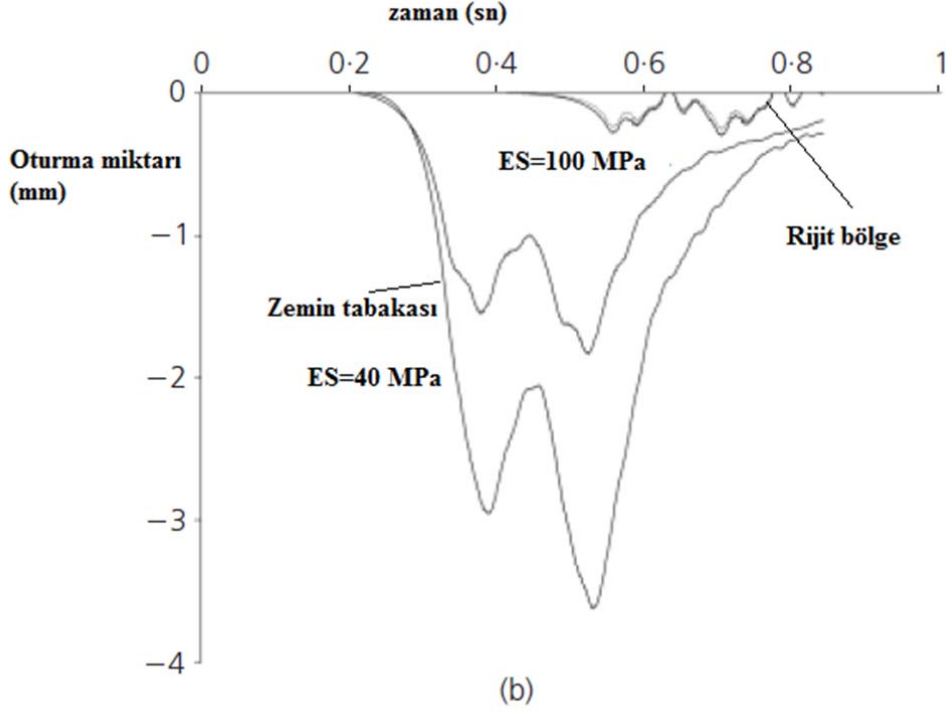
Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi zemindeki düşük rijitlik seviyesinden köprüdeki yüksek rijitlik seviyesine geçişte traverslerin bazılarının altında boşluklar oluşmakta ve ray seviyesi değişmektedir. Bu seviye değişimi geçiş bölgesindeki ani rijitlik değişimi kaynaklı farklı oturmalarından meydana gelmektedir. Seviye

değişiminin yarattığı ana problem, düşey tekerlek ivmelenmesini artırarak dinamik bir yükleme durumu oluşmasına neden olmaktır. Bu etki tekrarlayan tekerler yükleri ile hat alt ve üst yapısında büyük aşınmalara ve şekil bozukluklarına yol açar. Bu yüzden uzun süreli hat kullanımında bir çok sorun ve ağır bakım maliyetleri oluşmaktadır.

Bu faktörler ile beraber geçiş bölgelerinde hat hızı da oturmaları etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek hızlarda düşey ivmelenme hareketi ve dinamik yükleme artacağından oluşacak oturmalar da artacaktır. Özellikler köprü bölgesinin yüksek rijitliği sebebiyle hızdan çok etkilenmeyeceği göz önüne alınırsa, ray seviye farkları zemin elastisitesi ve artan hıza göre doğru orantılı olarak artacaktır. Aşağıdaki Şekil 5.5'de (a) 50km/sa ve 5.6'da (b) 70km/sa hızlarda ve farklı elastisitedeki zeminler için bir hattaki oturma miktarları gösterilmiştir [30]. Şekil 5.7'de ise geçiş durumunda farklı bölgelerdeki oturmaların mm seviyesinde karşılaştırmaları verilmiştir [30].



Şekil 5.5 : 50km/sa hız için farklı rijitlikteki oturma seviyeleri [30]

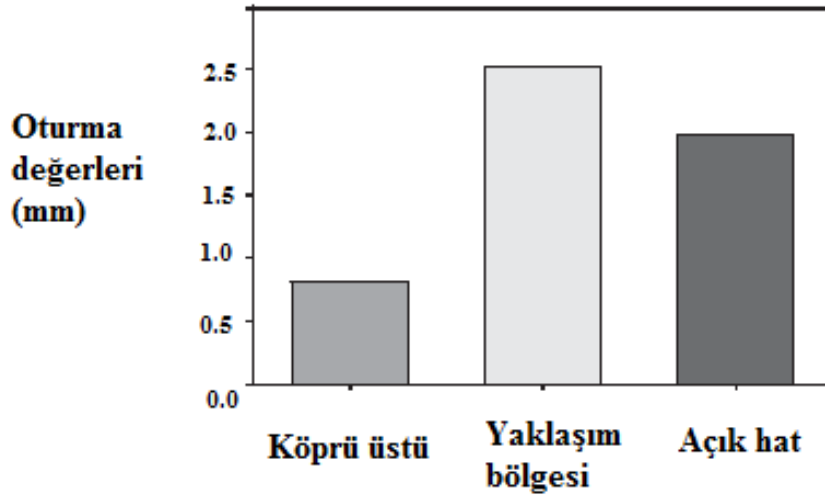


Şekil 5.6 : 70km/sa hız için farklı rijitlikteki oturma seviyeleri [30]

Şekil 5.5 ve 5.6'da görüldüğü üzere farklı hızlar için aynı zeminler üzerinde oturma analizi yapıldığında yüksek hızlarda daha fazla oturma olduğu gözlemlenmektedir.

Bununla beraber her iki hız durumunda, elastisite farkları olan zeminlerde; düşük elastikliğe sahip olan zeminde oturma miktarının(mm) yüksek elastisiteli zemine göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Bölüm 3'te incelenen farklı türlerdeki kent içi raylı sistemlerde yüksek hızlara çıkan metro ve hafif raylı sistemlerde eğer köprü yaklaşımı geçiş bölgeleri var ise alınacak önlemler daha hassas olmalıdır.



Şekil 5.7 : Bakım aralıklarında oluşan oturmaların farklı bölgeler için karşılaştırması [31]

Geçiş bölgelerinde kritik öneme sahip rijitliğe; ray bağlantı elemanları, ray altı pedi, travers, travers altı pedi, balast, balast altı pedi ve alt zemin tabaksının elastisitesi gibi bir çok farklı faktör etki etmektedir. Yapılan çalışmalarda en önemli parametrenin demiryolu hattının zemin özellikleri olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber balastlı hat için granüllü tabaka (balast ve alt balast) kalınlıkları ve malzeme özellikleri, bağlantı elemanı ped özellikleri ve travers tipi (ahşap veya beton) ikincil öneme sahip hat üstyapı elemanlarıdır. Travers aralıkları ve ölçüleri ise rijitliğe diğer etmenlere göre asgari düzeyde etki etmektedir [32].

Bu gözlemler ışığında; sadece travers ve diğer üstyapı elemanlarının değişimine yönelik bakım çalışmalarının geçiş bölgelerindeki rijitlik farklarına ilişkin farklı oturmaları çözemeyeceğini söylemek mümkündür. Özellikle çevresel faktörlerden (ıslanma-kuruma, donma-çözülme döngüleri, erozyon vb.) etkilenen demiryolu zemininin rijitliğini zamanla kaybetmesi nedeniyle geçiş bölgelerinde zemine odaklanan bakım çalışmaları gerekmektedir. Bu çalışmalar hem hattın uzun süre durmasına sebep olmaktadır hem de çok yüksek maliyetli olmaktadır. Bu sebeple alınabilecek önlemler hat inşasından önce olmalıdır.

5.1.2 Geçiş bölgelerindeki iyileştirme çalışmaları

Geçiş bölgesinin başarıyla tasarlanması ve inşa edilmesi bu bölgeyi etkileyen bir çok faktör yüzünden zorlaşmaktadır. Bir çok mevcut demiryolunda yapılan yetersiz geçiş bölgesi çalışmaları ve inşa hataları, hattın servis ömrü boyunca tekrarlayan

bakım yükleri, servisin yarım kalması, üstyapıda ortaya çıkan bozulmalar gibi sonuçlar doğurmaktadır. Yapım aşamasında alınmayan önlemlerin yerine telafisi zor durumlar oluşmaktadır.

İdeal bir geçiş bölgesi, sorunların ana kaynağı olan rijitlik farkına sahip iki bölge arasındaki farklı oturmaları asgari düzeye indirmelidir. Bunun için alınabilecek önlemler değişik uygulamalar ile araştırılmıştır. Başarılı sonuç veren iyileştirme yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

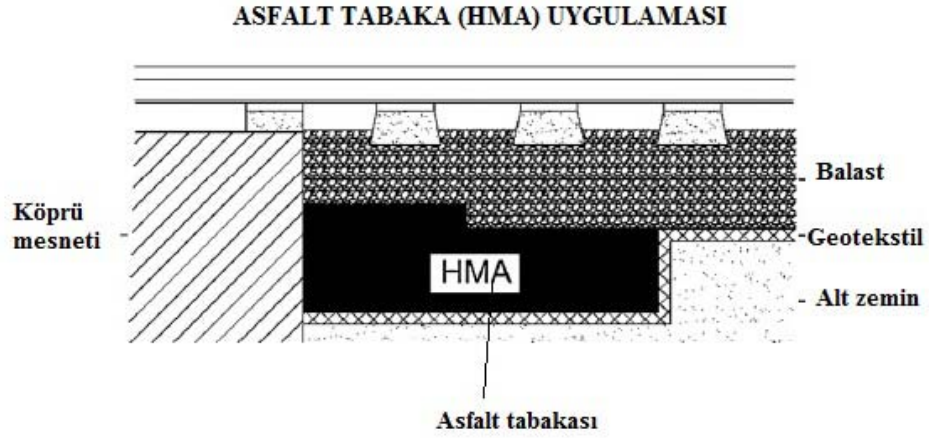
Geçiş bölgesinde daha uzun travers kullanımı:

Bu yöntem geçiş bölgelerinde uygulanan en eski ve basit yöntemlerden biridir ve ABD’de kullanımı yaygındır. Hattan köprüye doğru, daha uzun traversler kullanılması esasına dayanır. Bu yöntemde daha geniş bir mesnet tabakasının demiryolu hattını daha yüksek bir rijitlik seviyesine ulaştırdığı varsayılır. Bununla birlikte, Kerr ve Moroney’e göre [32] bu yöntemin verimli olabilmesi için travers altında geçiş boyunca eşdeğer bir balast dağılımı sağlanmalıdır. Ayrıca daha uzun travers genişliği geçiş bölgesindeki dolgunun da daha geniş olması anlamına gelmektedir. Daha yüksek rijitlik seviyesi için daha uzun ve daha az mesafede tekrar eden travers kullanımı kullanılan yöntemlerden biridir.

Balast altına asfalt tabakası (HMA-Hot Mix Asphalt) serilmesi:

Asfaltın balast ve alt zemin tabakası arasında kullanımının sağladığı faydalı performans, zayıf zeminler için katkı sağlamaktadır. Doğru tasarım ile kullanılan asfalt tabakası, alt zemine gelen gerilmeleri azaltır ve farklı oturmaları engellemeye ve bakım süresini uzatmaya yardımcı olur. Çünkü asfalt tabakası taşıyıcı bir tabaka görevi üstlenmektedir ve zayıf zeminlerin maruz kalacağı büyük gerilme değerlerini azaltır.

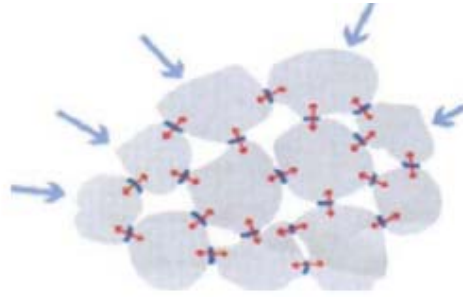
Bu yöntem özellikle zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde çimento enjeksiyonu gibi olumlu bir etki yapmaktadır ve rijitlik seviyesini yukarı çekmektedir. Ancak sağlam zeminlerde bunu uygulamak yerine köprünün rijitliğini düşürmek geçiş bölgesinin sağlıklı çalışması için daha önemlidir [31].



Şekil 5.8 : Geçiş bölgesinde asfalt tabaka uygulaması [33]

Balast stabilitesinin artırılması:

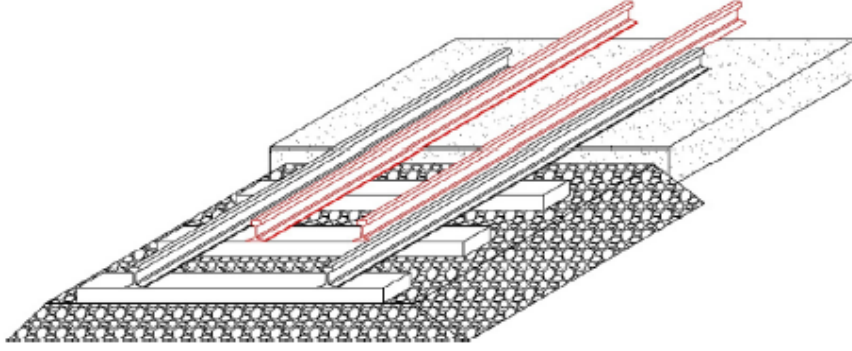
Bu yöntem balast taşlarının birbirine bağlanmasını sağlayarak tabakanın stabilitesini artıran bir yöntemdir. Bir yöntemde balast taşlarının sadece birbirine değen noktaları bir reçine sayesinde bağlanır ve bu sayede drenaj konusunda bir sorun oluşmaz . Bu yapışkan sıvının balasta uygulanmasından sonra 3 saat içinde hızlıca kenetlenme sağlanır. Bu sayede üstyapının stabilitesi artırılmış olur.



Şekil 5.9 : Balast kenetlenmesinin şematik gösterimi

Ek ray uygulaması:

Bu uygulama dolgu bölgesinde mevcut raylar iç bölgesine birer adet daha ray ekleyerek geçiş bölgesinin rijitliğini artırmaya yönelik bir uygulamadır. Ancak bu uygulamanın köprülerde güvenlik için koruyucu ray uygulaması olan durumlarda kullanılması zordur çünkü köprüdeki koruyucu rayların bir kısmı geçiş bölgesine taşmaktadır. Almanya Demiryolları'nda şehirler arası hatlarda daha rijit bir balastlı hat oluşumuna katkı sağlamak için bazı durumlarda kullanılmaktadır.



Şekil 5.10 : Ek ray uygulaması gösterimi [33]

Taş kolonlar veya kazık kullanılması:

Kaya blokları (geo-pier) ve kazıkların kullanılmasında benzer düşünce vardır. Rayın oturduğu bölgenin altına, alt zemin tabakasında açılan deliklerin içine bu bloklar yerleştirilir. Ebatları değişkenlik göstermektedir. Taş kolonların kullanım amacı zayıf zemini güçlendirmek ve drenajı kolaylaştırmaktır. Bu uygulama ABD’de yapılan çalışmalarda uzun dönem performansı için olumlu sonuçlar vermiştir ve ilk yıl için bakım gerektirmemiştir [31].

Aynı şekilde alt zemin içine kazık çakılması da benzer bir uygulamadır ve zeminin stabilitesini artırarak oturmasını engellemeyi amaçlar. Bu yöntemin düzgün çalışması için sabit bir zemin tabakası gerekmektedir. Bu yüzden kazıkların verimliliğinde uzunlukları önemli bir yer tutar. Eğer sağlam zemin tabakası derinse kazık da benzer derinlikte olmalı ve ikisi birbirlerine kenetlenmelidirler.



Şekil 5.11 : Taş kolonların yaklaşım bölgesine yerleşimi [31]

Üstyapıda rijitliğin düşürülmesi:

Sanat yapısında, üstyapı elemanlarının altına konulacak farklı rijitliği sahip pedlerle tekerlek yükleri kaynaklı yüksek titreşim düşürülebilir. Bu yöntem köprüdeki rijitliği düşürmek için en uygun yöntemlerden biridir. Travers altında, balast tabakası altında, ray altında ve balastsız hatlarda beton mesnet altında kullanılabilirler. Bu sayede geçiş bölgesindeki rijitlik farkı dengelenmeye çalışır. Önemli olan doğru rijitliğe sahip malzemelerin seçilmesi ve optimum geçişin sağlanmasıdır.

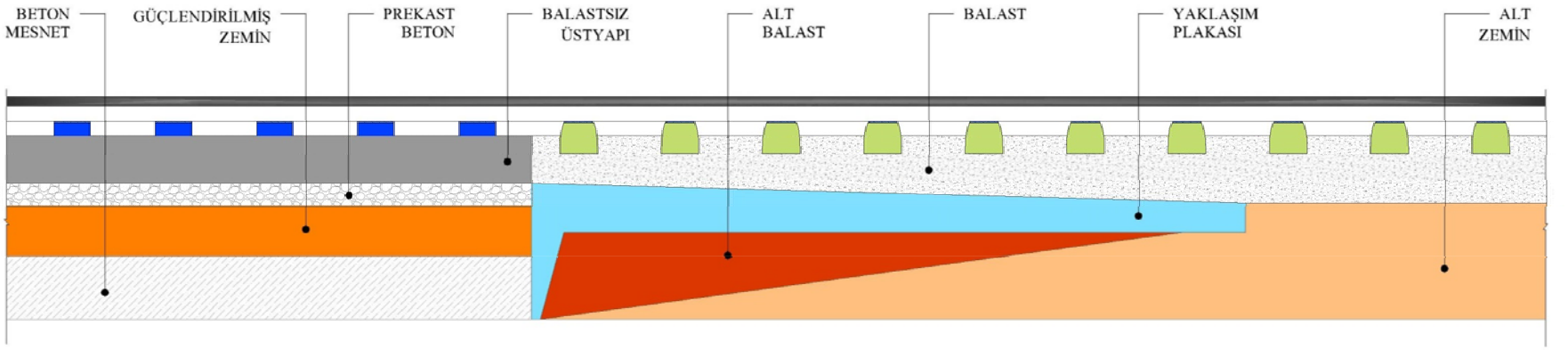
Yaklaşım plakası uygulaması:

Yukarıda da bahsedildiği gibi dinamik yükleme etkisini düşürmek için iki ana prensip vardır. Bunlar; hattaki oturmaları azaltmak ve zemin üzerindeki hatta rijitliği yükseltmektir. Betonarme yaklaşım plakaları bir ucu köprü kenarına oturan ve zemine doğru eğimle yukarıdan aşağıya doğru veya zemine paralel olarak alt zemin tabakasını destekleyen ve rijitliği arttırmaya yarayan mesnet yapılarıdır. Bununla beraber yaklaşım plakaları zemindeki serbest suyun alt zemin ve dolgu tabakalarına geçişini önlemede görev alır ki bu plastik oturma durumunun önüne geçmek için çok önemlidir. Zeminde biriken sıvı dolgudaki mukavemeti düşürecek ve zamanla oturmalara yol açacaktır. Ayrıca yaklaşım plakaları toprak hareketlerinin ve erozyonun önlenmesinde de kontrole yardımcı olmaktadır.

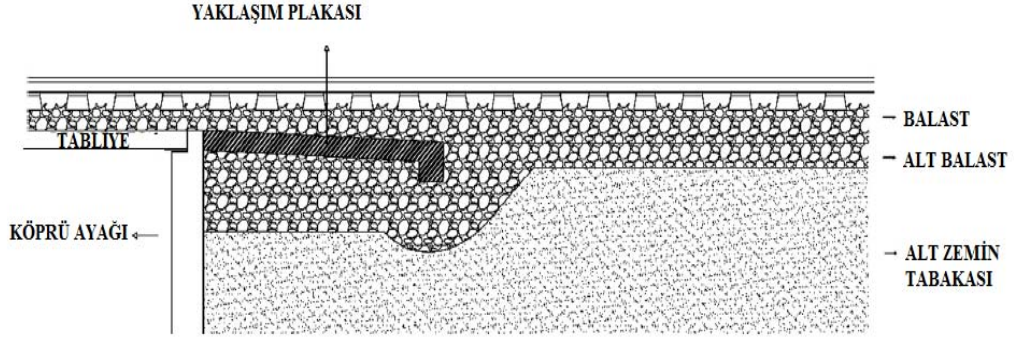
Yapılan çalışmalar göstermiştir ki yaklaşım plakası kullanılan geçiş bölgesinde, açık hatta göre %40'a yakın daha az oturma gözlemlenmiştir. Yaklaşım plakası tek başına kullanılabileceği gibi ek ray uygulaması, köprü üstyapısında ped kullanılması gibi birleşik yöntemler ile kullanılması da verimli sonuçlar ortaya çıkarabilir. Burada belirleyici olan parametre ise zeminin taşıma kapasitesidir [34].

Tasarıma ve inşa edilecek yerdeki koşullara bağlı olarak değişmek ile beraber AREMA standardında 6m uzunluk, minimum tavsiye edilen uzunluktur. Ancak yaklaşım mesafesine ve kullanılan diğer önlemler ile beraber bu uzunluk kısalabilir. Önemli olan yaklaşım plakasının uygulamasının doğru yapılmasıdır. Şekil 5.12'de İspanya'da yapılan bir demiryolu uygulamasında balastlı hattan balastsız hatta geçiş bölgesinde yaklaşım plakası kullanımı gösterilmiştir. Şekil 5.13'te ise bir köprü yaklaşımında yaklaşım plakası uygulaması gösterilmiştir [33].

Bu yöntem ileriki bölümde örnek çalışmada incelenecek yöntemlerden biridir ve yöntemin uygulanması ile oluşacak oturma miktarları irdelenecektir.



Şekil 5.12 : Balastlı – Balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası [33]



Şekil 5.13 : Köprü geçiş bölgesinde yaklaşım plakası ve altyapı elemanları [33]

Geçiş bölgesindeki dolgu zeminini iyileştirme teknikleri (Teknik Blok uygulaması):

Köprü yaklaşım bölgesinde karşılaşılan sorunları (oturmalar, rijitlik farklı ve dinamik yükleme durumu vb.) önlemek, bakım süresini uzatmak ve bakım maliyetini düşürmek için en verimli yöntemlerden biri geçiş bölgesinde yapılacak zemin iyileştirme çalışmalarıdır. Bu çalışmalar farklı demiryollarına göre değişkenlik göstermektedir. Literatürde ani rijitlik değişimini ve oturmaları engellemek için yapılan bir çok farklı akademik çalışma vardır. Genellikle kama şeklinde dolgu bölgesi oluşturmak bu çalışmalarda önerilen temel yöntemdir. Japonya Ulusal Demiryolları 1970’lerde hızlı demiryollarında bu tür uygulamaları deneyen ilk kurumdur. Ardından Fransa Ulusal Demiryolları (SNCF) köprü geçiş bölgelerinde çimento karışımı zemin dolgularını önermiştir. Zaman içinde çimento-zemin karışımları Roma-Floransa Hızlı Demiryolu’nda da kullanılmıştır. Dolgu uygulama bölgesi bu projede ve birçok projede en az 15-20 m veya köprü ayağının 4 katı uzunluğunda alınmaktadır.

Son 30 yılda geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunları anlama ve çözüm yolları bulmaya odaklanan bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar ışığında kama şeklindeki dolgu yapılarında çok iyi sıkıştırılmış granüllü zemin malzemeleri kullanımı ve özel bir geometri ve eğim ile dolgu yapılması öne çıkmıştır.

Güçlendirilen özel dolgu tabakaları farklı oturmaları engellediği gibi aynı zamanda rijitlik değişimleri arasında yumuşak bir geçiş sağlamaya da yardımcı olmaktadır. Bu amaçla kullanılan dolgu malzemeler yüksek elastisite modülüne sahip ve plastik deformasyonlara karşı dayanıklı olanlar arasında seçilmektedir. Genellikle geçiş bölgesindeki dolgularda kullanılan malzemeler bu özelliklere sahip olan; bağlanmamış granüllü malzemeli (UBM) ve çimento ile bağlanmış granüler malzemeli (CBGM) zeminlerdir. Ülkeden ülkeye bu uygulamanın ismi “teknik blok” veya “geçiş kamalı zemin” olarak değişmektedir.

Genellik geçiş bölgesindeki zayıf performans sebepleri yanlış dolgu uygulaması, uygun olmayan malzeme kullanılması, yetersiz zemin sıkıştırması ve zayıf drenajdır. Bu hatalar ile karşılaşan hatlarda çok ağır bakım yükleri ortaya çıkmaktadır.

Geçiş bölgelerindeki sorunların önüne geçmek için hat altyapısının taşıma kapasitesinin yükseltilmesi gerekmektedir. Oturmaları önlemek için aşağıdaki şartlara uyulmalıdır;

- Köprü yaklaşımında dolgu öncesi bulunan mevcut zemin yerine daha yüksek taşıma kapasitesine sahip zemin ile dolgu yapılması,
- Geosentetik uygulamaları (geotekstiller, geogridler, geomembranlar),
- Zemin stabilitesinin bağlayıcı malzemeler (çimento, kireç, veya bitümlü malzemeler) ile arttırılması,
- Dolgu bölgesine çimento enjekte edilmesi.

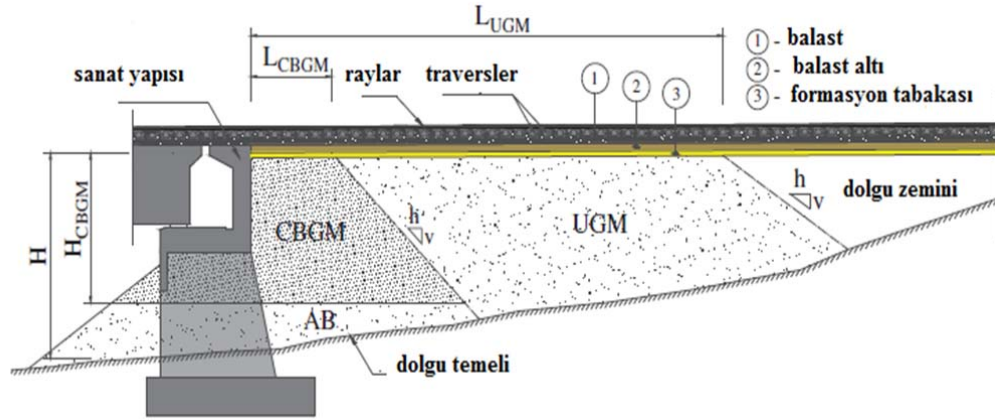
Genellikle kama şeklindeki dolgular iki ana kısımdan oluşur;

- Birinci kısım (CBGM): köprü ayağına yakın olan çimento ile bağlanmış granüllü tabakadır.
- İkinci kısım (UBM): Seçilmiş bağlanmamış granüllü malzemeli zemin.

Farklı tasarımlarda değişik dolgu malzemesi katmanları da kullanılabilir. Önemli olan sanat yapısına doğru taşıma kapasitesinin arttırılması ve rijitliğin aniden değil yumuşak bir şekilde değişmesidir. Ayrıca CBGM tabakasında altında bir dolgu temeli tabakası (AB) da önerilmektedir.

Şekil 4.11’de şematik bir zemin güçlendirmesi uygulaması gösterilmiştir. Buradaki dolgu yüksekliği (H)’ a göre, dolgunun sanat yapısından önce veya sonra

yapılmasına göre veya sanat yapısının türüne göre geçiş bölgesi geometrisinde değişimler olabilir [36].

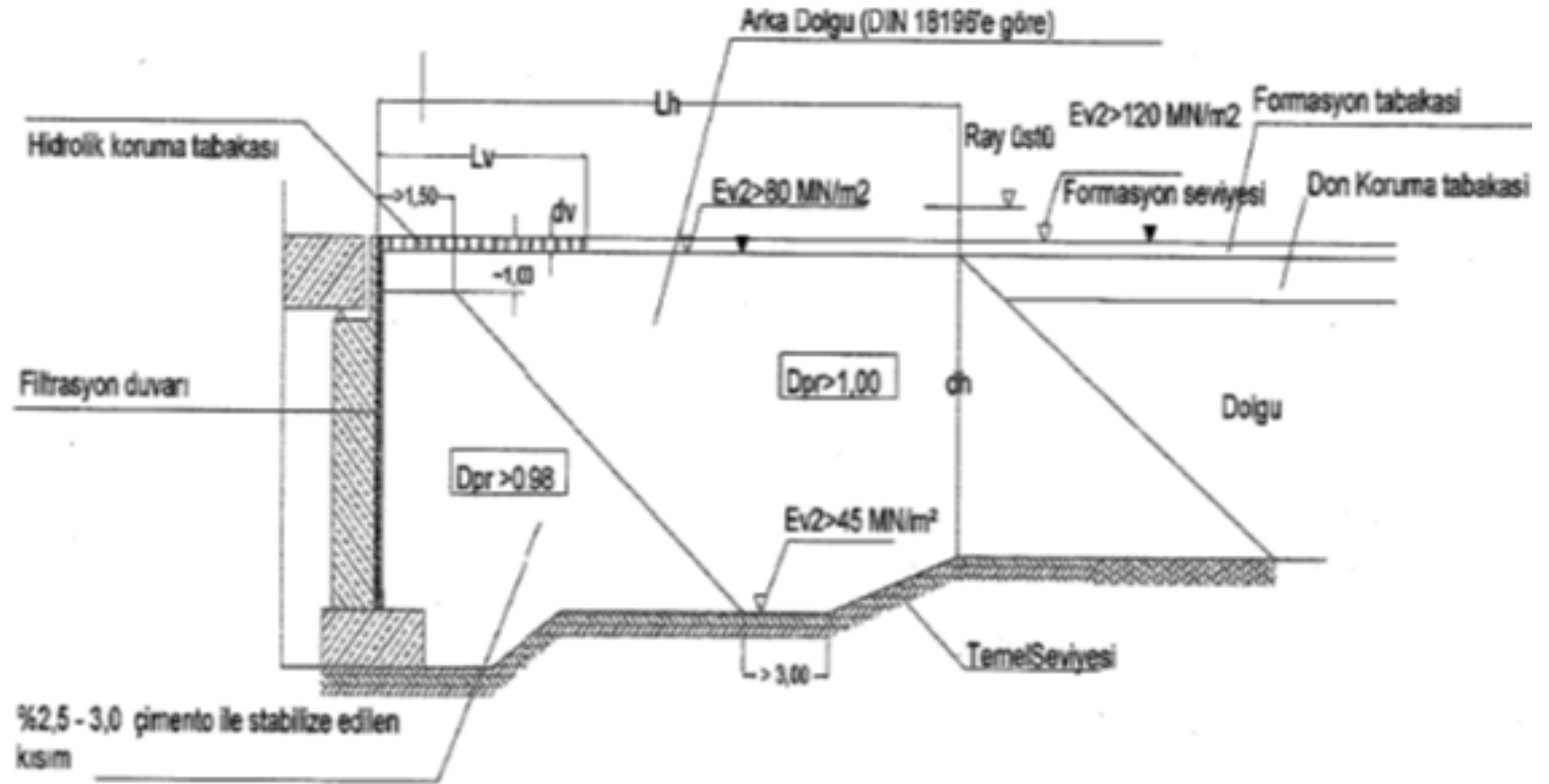


Şekil 5.14 : Geçiş bölgesinde dolgu ile iyileştirme şematik gösterimi [29]

Çeşitli geçiş bölgesi uygulamaları incelendiğinde aşağıdaki bazı özellikler benzerlik gösterir;

- Dolgu tabakaları sanat yapısından geriye doğru 20 m uzunlukta bir alana yayılır,
- Kademeli geçişi sağlayabilmek için köprüye doğru eğim artırılır (3:2, 2:1 gibi eğimlerde).
- CBGM tabakası 1:1 eğimle ve yüzde %3 ile %5 arası bağlayıcı malzeme (çimento, kireç vb.) oluşturulur.
- Geçiş bölgesi boyunca dolgu ve CBGM tabakası arasında iyi sıkıştırılmış bir UGM tabakası yerleştirilir.
- Köprü ve CBGM tabakası arasında drenajı sağlayabilmek için bir ayırıcı tabaka tasarımı yapılması.

UIC 719-R “Demiryolları Hatları için Toprak İşleri ve Altyapı” standardına göre farklı demiryolları ağları için farklı geçiş bölgeleri tasarımları vardır. Bunların en sık kullanılanlardan biri olan Alman Demiryolları standardı Şekil 5.15’te gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : Alman Demiryolları için köprü geçiş bölgesi zemin dolgusu tasarımı [6]

Alman Demiryollarının Şekil 5.15'deki standardı, hızın Alman Demiryollarına göre $V > 160 \text{ km/saat}$ olan yeni hatlarda viyadük ile doğal zemin arasındaki geçiş bölgesinde alınması gereken durumlar için geçerlidir. Farklı hızlar için Çizelge 5.1'deki değerler verilmiştir. İyileştirilen zemin kısmının genişliği verimli olması için minimum 1.5 metre olmalıdır ve 1:1 eğimle devam etmelidir.

Çizelge 5.1 : Farklı proje hızları için dolgu ölçüleri [6]

Proje hızı (km/saat)	Min. dh (m)	Min. Lh (m)	Min. Lv (m)	Min. dv (m)
$V \geq 250$	3	≥ 20	10	0.5
200-250	2.5	≥ 15	5	0.4
160-200	2.5	≥ 20	3	0.3
120-160	2.5	≥ 10	-	-
≤ 120	2	≥ 5	-	-

Avrupa'da farklı ülkelerin farklı standartları vardır. Uygulama yapılacak bölgenin zemin karakteristiklerine ve sanat yapısı türüne göre uygun olan tasarım yapılmalıdır.

Raylı sistemlerin geçiş bölgesinin iyileştirmesi çalışmalarında farklı disiplinler uyum içinde çalışmalı aşağıdaki şartları sağlamalıdır;

- Toprak işleri uygulamasının doğru şekilde uygulanması için; zemin tabakaların uygun geometlerinin belirlenmesi, tabakalara yeterli sıkıştırma uygulanmalıdır,
- Düzgün bir rijitlik geçişi sağlanması için tren hızlarının göz önüne alınarak uygun dayanıma sahip malzeme özellikleri belirlenmelidir,
- Uzun vadede oluşacak oturmalar asgari seviyeye indirgenmelidir,
- Zemin malzemeleri homojon dağılıma sahip olmalıdır ve eşdeğer zemin yoğunluğu sağlanmalıdır,
- İnşaat aşamasındaki uygulamaların kalite kontrolü tasarıma uygun olarak yapılmalıdır ve sahada titizlikle takip edilmelidir.

Geçiş bölgelerinde yapılabilecek iyileştirme çalışmalarını yukarıdaki bilgiler ışığında iki ana kısımda toplayabiliriz. Bunlardan birincisi altyapı ve zemin özelliklerinin değişimi ile sağlanan iyileştirmelerdir. İkinci kısım ise üstyapı elemanlarında yapılan

eğişimler ile sağlanan iyileştirmelerdir. Aşağıdaki Çizelge 5.2’de bu uygulamalar bu iki ana başlıkta detaylı olarak listelenmiştir;

Çizelge 5.2 : Geçiş bölgesi iyileştirme uygulamaları [33]

Raylı Sistemlerde Geçiş Bölgesi İyileştirme Uygulamaları	
Altyapı ve zemin elemanları üzerinden yapılan uygulamalar	Üstyapı elemanları üzerinden yapılan uygulamalar
Balast altında asfalt tabakası (HMA) kullanılması	Ek ray uygulaması
Taş kolon ve kazık uygulamaları	Farklı rijitlikte pedlerin köprü üstyapısında kullanılması
Geotekstil kullanımı	Travers için farklı malzemeler seçilmesi (Polimer, ahşap vb.)
Yaklaşım plakası gibi gömülü yapıların kullanımı	Çerçeve şeklinde travers kullanımı veya genişleyen traverslerin sanat yapısına doğru sıklaştılarak kullanılması
Zemine farklı uzunlukta çelik çubuklar yerleştirilmesi	
Balastlı hattan balastsız hatta geçiş yaparak rijitlik artırımı	Özel reçeneler, poliüretan malzemeler ile balast stabilitesinin artırılması
Dolgu zeminde iyileştirmeler (teknik blok)	

5.2 Örnek Bir Hafif Raylı Sistem Geçiş Bölgesi İçin İrdelemeler

Tezin bu bölümünde, köprüye yaklaşımı bulunan bir hafif raylı sistem projesinin geçiş bölgesinde bir modelleme örneği verilecektir. Bu modelleme çalışmalar geçiş bölgesinde iyileştirme yöntemleri uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda ve

farklı iyileştirme yöntemleri kullanıldığında ortaya çıkacak zemin oturmalarını inceleyecektir.

Modelleme çalışmasındaki ana amaç; örnek bir hafif raylı sistem için geçiş bölgesinin köprü yaklaşımında yapılan dolgular ile zemin iyileştirmesi ve yaklaşım plakası uygulamalarının normal zemin durumuna göre katkılarının sayısal olarak incelenmesidir. Dinamik teker yükleri altında zeminin davranışı, HyperWorks yazılımı ile sonlu elemanlar analizi kullanılarak farklı zemin özellikleri altında oturma miktarları incelenmiştir.

5.2.1 HyperWorks yazılımı

HyperWorks programı sonlu elemanlar analizini (SEM) kullanan bir modelleme programıdır [34]. Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin, daha basit ve kısa zamanda çözmek için bu problemlere eşdeğer ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözüme gidilmesi sonlu elemanlar metodunun temelindeki fikirdir.

Programa inceleme yapılacak eleman özellikleri (Elastisite modülü, Poisson oranı, sürtünme katsayısı vb.) tek tek girilmesi gerekmektedir. Daha sonra belli aralıklarla zemin katmanları tanımlanır ve analize hazır hale getirilir.

HyperWorks programı zemin oturma sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanması için yeterli görsel araçları sağlamaktadır. Çözüm sırasında elde edilen değerler ekrana grafik olarak yansıtılmakta, karşılaştırmalar yapılmakta ve çıktı alınmaktadır.

5.2.2 Tasarım prensipleri

Yapılan model çalışmasında balastsız bir hat üzerinde dinamik tekerlek yükü 115 kN olan bir hafif raylı sistem aracı için 16 m uzunluğunda bir model kesitinde statik yükleme durumu incelenmiştir. Normal bu hafif raylı sistem taşıtının tekerlek yükü 65 kN, dingil yükü ise 130 kN'dur. Ancak daha doğru sonuçlar alınması için seçilen tekerlek yükünün normal durumdan %75 daha fazladır. Bunun nedeni hız ile beraber tekerleklerin yaratacağı dinamik yükleme durumunun tasarımda dikkate alınmasıdır. Tasarım da 2 dingil(4 tekerlek) etkidiği durum göz önüne alınmıştır. Aracın tasarım hızı 80 km/saat'tir.

Örnek çalışmadaki hattın üstyapı özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Balastsız beton üstyapıdır ve altında ince temel betonu taşıyıcı tabakası vardır,
- Sıkıştırılmış alt zemin tabakası elastisite modülü $E = 50 \text{ MPa}$
- Doğal zemin elastisite modülü $E = 100 \text{ MPa}$ 'dır
- Hat Açıklığı 1435 mm,
- Balastsız üstyapı taşıyıcı döşemesi 2400mm genişlikte, 5250mm uzunlukta, 200mm kalınlıkta betonarme, 3 arda arda döşeme olarak tanımlanmıştır. Üstyapı beton sınıfı C35/45'tir.
- Alt taşıyıcı tabaka 2600mm genişlik ve 150mm kalınlıkta taşıyıcı döşeme altında sürekli bir alt tabaka oluşturur. Malzeme C20/25 betondur.
- Bağlantı elemanı aralığı 750mm'dir.
- Ray 54G2 oluklu ray eşdeğeri.

Tasarımda üstyapı ve altyapı elemanları bitişik olarak modellenmiştir. Ancak temel betonu ile alt zemin bitişik değil hareket edebilir şekilde modellenmiştir. Perspektif görünüşleri tek ray için alınsa da bütün analizler simetrik olarak bütün hat için yapılmıştır. Malzemeler lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Deformasyonlar düşük seviyede kaldığı için lineer elastik malzeme yaklaşımı geçerliliğini korumaktadır. Köprü ayağı ile zemin tabakası arasındaki sürtünme katsayısı(μ): 0.5'tir. Yaklaşım plakası ebatları; uzunluk:5.15m, genişlik:3.0m ve yükseklik:0.40m'dir. Malzeme C35/45 donatılı betondur.

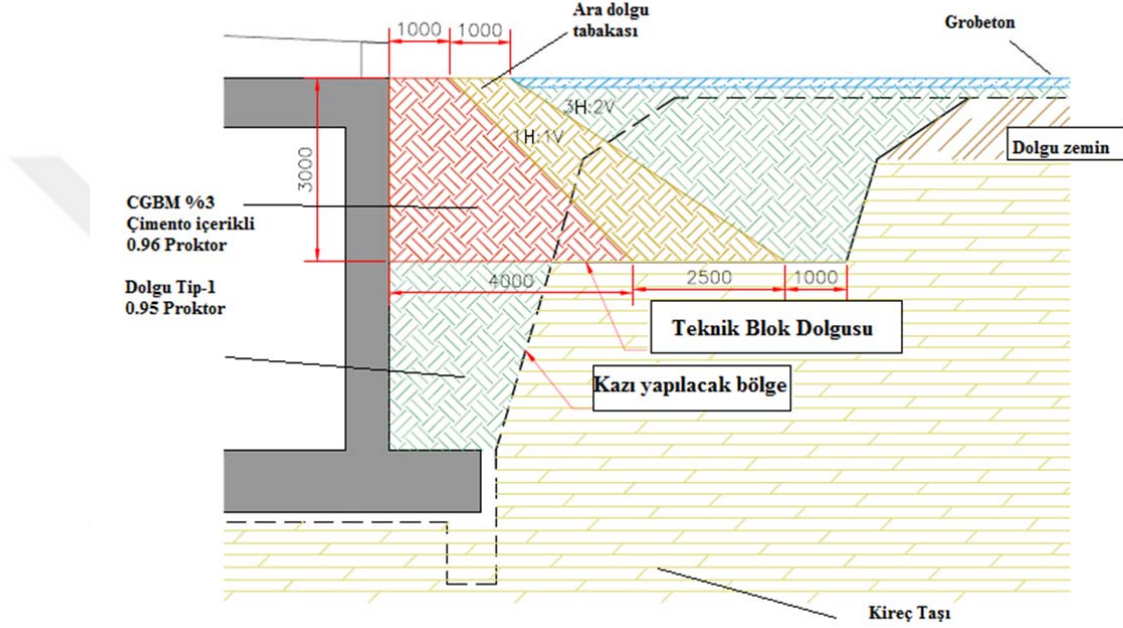
5.2.3 İrdelenecek durumlar

Örnek çalışmada 4 ana durum için inceleme yapılmıştır. Bunlar;

- **Durum 1:** Açık demiryolu hattında sadece sıkıştırılmış dolgu altında doğal zeminin tekerlek yükleri altında zemin davranışı,
- **Durum 2:** Köprü yaklaşımında herhangi bir iyileştirme uygulanmadığı durumdaki davranış,
- **Durum 3:** Köprüye geçişte betonarme yaklaşım plakası uygulandığı durumdaki zemin davranışı,

- **Durum 4:** Geçiş bölgesindeki dolgu zeminini iyileştirme teknikleri (Teknik Blok uygulaması) uygulandığındaki zemin davranışı.

Şekil 4.14'te Teknik Blok uygulaması için uygulanacak zemin katmanları gösterilmiştir. Bu 4 durum için bütün zemin parametreleri ileriki bölümlerde verilecektir.



Şekil 5.16 : Model için temel alınan teknik blok uygulaması

5.2.4 Malzeme özellikleri

Modelde farklı zemin katmanları farklı renkler ile gösterilmiştir. Davranışsal olarak zemin dolguları plastik davranış sergilerken beton katmanlar çok yüksek elastisite modullerine sahiptir ve rijit davranış gösterirler. Teknik blok zemin dolguları 3 ana farklı tipten oluşmaktadır. Bölüm 5.1.2’de anlatılan şartlara uygun olarak Çimento ile bağlanmış granüler dolgu zemin (CGBM) köprü ayağının yanına doldurulurken ve bağlanmamış granüllü zemin ara dolgu tabakası (UGM) olarak kullanılmıştır. Tip-1 dolgu yeşil renk ile belirtilmiştir ve iyice sıkıştırılarak (porozite=0.95 p) CGBM’nin altındaki katmana ve ara dolguya destek olarak doldurulmuştur.

Üstyapıda ise rijitliği düşürmeye katkıda bulunan bağlantı elemanı altlığı ve ray pedi modele alınmıştır.

Modelde kullanılan altyapı ve üstyapı malzemelerinin karakteristikleri aşağıdaki Şekil 4.16’ da verilmiştir;

Çizelge 5.3 : Örnek çalışmada kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme Tipi	Programdaki Rengi	Elastisite Modülü(MPa)	Poisson Oranı(n)
Dolgu tipi 1	Koyu yeşil	120	0.4
Bağlantı elemanı altlık (çelik ile aynı)	Yeşil	210000	0.3
CGBM %3 Çimento içerikli	Kırmızı	320	0.4
Balastsız hat beton mesneti	Gri	34000	0.2
Ara dolgu	Sarı	250	0.4
Grobeton	Mavi	24000	0.2
Sıkıştırılmış alt zemin	Pembe	50	0.4
Ray Pedi	Mor	33	0.4
Kireç taşı	Kahverengi	100	0.25
Ray çeliği	Turuncu	210000	0.3

5.2.5 Oturma limitleri

Oturma limitleri örnek çalışmadaki model için altyapı ve üstyapıda 2 mm olarak alınmıştır. Seçilen zeminin nispeten sağlam bir kireç taşı malzemesinden oluştuğu düşünülerek gerçekçi limitler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu değerlerin içinde elastik üstyapı elemanlarının esnemeleri de bulunmaktadır. Hem zemin oturması hem de üstyapı elastik değişimleri göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır.

5.2.6 Model çalışmaları

Örnek bir hat çalışması kapsamında HyperWorks programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi ile dört farklı durum için modelleme yapılmıştır [34]. Bu çalışmalardan alınan 4 farklı durum için perspektif görünüşleri ve oturma analizleri Ekler bölümünde verilmiştir.

5.2.7 Analiz sonuçları

Balastsız üstyapı ile hafif raylı sistem geçiş bölgelerinin incelemesi örnek çalışma kapsamında dört farklı model analizi ile incelenmiştir. Bu modeller Ekler bölümündeki şekillerde de görüldüğü gibi;

- **Durum 1:**Serbest zemin durumu modeli,
- **Durum 2:**Köprü balastsız hat geçişinde serbest zemin durumu modeli
- **Durum 3:**Köprü balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumu modeli,
- **Durum 4:**Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulanması durumu modelidir.

Bu modellerin HyperWorks programı kullanılarak oturma analizleri yapılmıştır.

Durum 1-Serbest zemin durumu modeli analizi sonuçları:

Bu model çalışmasında temel alınan altyapı ve üstyapı malzeme karakteristikleri doğrultusunda, açık hatta doğal zemin durumunda, her bir katmanda oluşan oturmalar görülmektedir. Modelde inceleme sonucunda farklı maksimum oturma değerleri; ray bölgesi için 1.77 mm, sıkıştırılmış alt zemin için 1.30mm, daha alttaki doğal zemin tabakası için ise 1.06 mm seviyelerinde bulunmuştur.

Durum 2-Köprü balastsız hat geçişinde serbest zemin durumu modeli analizi sonuçları:

Bu model çalışmasında temel alınan altyapı ve üstyapı malzeme karakteristikleri doğrultusunda, köprü yaklaşımında hiç bir iyileştirme yöntemi kullanılmayan bir geçiş bölgesinde, üstyapı ve altyapının her bir katmanında oluşan oturmalar görülmektedir. Modelde inceleme sonucunda farklı maksimum oturma değerleri; ray bölgesi için 1.71 mm, sıkıştırılmış alt zemin için 1.14 mm, daha alttaki doğal zemin tabakası için ise 0.91 mm seviyelerinde bulunmuştur. Bu sonuçlar 1. Modele göre

daha düşüktür. Bunda köprü ayağının geçiş bölgesine yaptığı rijitlik katkısı önemli bir etmendir. Özellikle zemin katmanlarındaki oturmalar incelendiğinde köprüye yaklaştıkça yayılımın azaldığı görülmektedir.

Durum 3-Köprü balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumu modeli sonuçları:

Hafif raylı sistem balastsız üstyapısından köprüye geçiş bölgesinde yaklaşım plakası uygulaması yapılması durumunda oluşacak oturma miktarları bu model kapsamında incelenmiştir. Model sonuçlarına göre trenin arka tekerleklerinin temas ettiği ray bölgesi için maksimum oturma değeri 1.38 mm iken ön tekerlekle için bu değer 1.11 mm seviyelerindedir. Bu durumun nedeni köprüye yaklaştıkça yaklaşım plakasının oturmaları engellemeye katkısının da artmasıdır. Hem betonarme plaka hem de mesnetlendiği köprü ayağı rijitliği arttırmaktadırlar. Sıkıştırılmış alt zemin için 0.74 mm, daha alttaki doğal zemin tabakası için ise 0.55 mm seviyelerinde bulunmuştur. Bu sonuçlar ilk iki modele göre yaklaşım plakasının geçiş bölgesindeki oturmaları engellemekte büyük ölçüde faydalı olduğu göstermektedir. Ayrıca ray temas bölgelerinde de yüzde otuz civarında daha az oturma olmuştur. Özellikle zemin katmanlarındaki oturmalar incelendiğinde dağılımın daha eşdeğer ve az olduğu görülmektedir.

Durum 4-Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulaması durumu modeli sonuçları:

Hafif raylı sistem balastsız üstyapısından köprüye geçiş bölgesinde teknik blok (zemin dolgusunda iyileştirmeler ve farklı katmanlar oluşturma) uygulaması yapılması durumunda oluşacak oturma miktarları bu model kapsamında incelenmiştir. Analizler sonucunda sadece tek bir bölgede maksimum oturma düzeyinin 0.65 mm seviyelerinde kaldığı görülmüştür. Bu değer hem tek bölgeye yoğunlaşması hem de en düşük oturma değeri olması dolayısıyla önemlidir. Sıkıştırılmış alt zeminde oluşan maksimum oturma değeri 0.55 mm olmaktadır. Dolgu zemin ve doğal zemin katmanları incelendiğinde 0.45 mm ile 0.05 mm seviyelerinde geniş bir yayılma izlenmektedir. Sağlanması amaçlanan homojen dağılım da model sonuçlarında görülmektedir.

Bütün sonuçlar incelendiğinde, iyileştirme yöntemlerinin geçiş bölgesindeki oturmalara ciddi bir katkı yaptığı görülmektedir. Taşıma kapasitesi yüksek bir doğal

zemin sınıfı için yapılan çalışmada, zemin malzemesinin lineer elastik davranış izlediği kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak oturma miktarlarında en önemli düşürümü teknik blok iyileştirme yönteminin yaptığı görülmüştür.





6. SONUÇLAR

Demiryolu yapısı birbiri ile iç içe geçen bir çok katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar demiryolu taşıtının temas kurduğu raylar ile başlar ve altyapının en altındaki doğal zemin tabakasına kadar uzanır. Demiryolu yatırımlarının güvenli, konforlu, uzun ömürlü ve çevreye duyarlı olması beklenmektedir. Bu beklentilerin karşılanması için yapısal tasarım kritik öneme sahiptir.

Demiryolu üstyapı elemanları tekerlekten gelen yükleri ilk üstlenen çerçeve ve ona mesnetlik sağlayan balast veya beton tabaka olarak özetlenebilir. Kullanılacak ray malzemesinin ve bağlantı elemanlarının taşıt yükleri ile uyumlu olması gerekmektedir. Balastlı ve balastsız üstyapı tiplerinin birbirlerine olan üstünlükleri günümüzde hala araştırılmakta ve karşılaştırılmaktadır. Bu konudaki literatür araştırması sonucunda görülen bazı temel farklar vardır. Balastlı hat ilk yatırım maliyetleri konusunda balastsız hatta karşı hala üstün konumdadır. Ayrıca balastlı hat, balastsız hatta göre daha kolay ve hızlı uygulanabilirliği sahiptir. Ancak son 30 yılda uygulanması çok pratik olan bazı balastsız hat üstyapı tipleri de geliştirilmiştir. Yakın gelecekte balastlı hat kolay uygulanabilirlik konusunda balastsız hatta olan üstünlüğünü kaybedebilir. Diğer yandan balastsız hattın sunduğu uzun tasarım ömrü ve düşük bakım giderleri önemli bir tercih sebebidir. Özellikle şehir içi raylı sistemlerde günümüzde sıklıkla balastsız hatlar tercih edilmektedir. Farklı balastsız hat tipleri ve iki üstyapı tipinin karşılaştırması, bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

Demiryolu projeleri planlanırken geçilecek güzergahdaki zemin özelliklerinin araştırılması ve mevcut durumun doğru olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Bu geoteknik analizlerde kabul gören belli standartlar tez kapsamında incelenmiştir. Zeminlerin geoteknik olarak sınıflandırılması birçok ülkede birbirinden farklılık göstermektedir. Bu sınıflandırmalarda yararlanılan iki temel karakteristik vardır. Bunlar: granülometrik derecelendirme ve Atterberg limitleridir (sıvılaşma, esneklik ve büzüşme limitleri). Birleşik Krallık, Almanya, Fransa, İsviçre gibi ülkeler USCS (Birleşik Zemin Sınıflandırma sistemi) sınıflandırma sistemini kullanmaktadır. Ülkelere göre farklılık gösterse de genellikle sınıflandırmada benzer kabuller alındığı görülmüştür. Önemli olan analizin rasyonel olarak yapılması ve maruz kalınacak

tekrarlı trafik yüklerine karşı stabil ve uzun ömürlü bir demiryolu altyapısı tasarlayabilmektir.

Geoteknik analizden sonra cevaplanması gereken en önemli soru; zemin yapısının hattan geçen trafik yüklerine ne kadar dayanıklı olduğudur. Ayrıca zamanla tekrarlayan bu trafik yükleri altında bakım maliyetleri ve yapısal deformasyonlara uğrama ihtimalleri de detaylı olarak incelenmelidir. Demiryolu altyapısı, üstyapıdan farklı olarak yenilenmesi çok zor bir katmandır. Özellikle yoğun kullanıma sahip kent içi raylı sistemlerde hattın kısa süreliğine bile kapatılması, hat işletmesini ve kullanıcıları zor durumlara düşürmektedir. Bu sebeple trafik yüklerinin uzun vadede ulaşacağı değerler hattın kapasitesi ve işletim sıklığına göre doğru hesaplanmalı ve altyapısal güçlendirmeler buna bağlı olarak değerlendirilmelidir. Dingil yüküne bağlı trafik yüklerinin hesabında kullanılan formüller çalışma içinde belirtilmiştir.

Kent içi raylı sistemler gelişmiş ülkelerde uzun mesafelere ve yaygın kullanıma sahiptirler. Özellikle son yıllarda demiryolu yatırımları dünyada hızla yaygınlaşan bir trend halindedir. Karayolu ulaşımının artan trafik yükleri sebebiyle kent içi ulaşım taleplerine yeterli cevabı verememesi demiryoluna yönelimin en büyük sebebidir. Kent içi raylı sistemler taşıma kapasitelerine göre farklı türlere ayrılırlar. Bu türler ve özellikleri, km başına harcanması gerekli olan yatırım maliyeti ve taşıma kapasiteleri tez kapsamında karşılaştırılmıştır.

Demiryolu üst ve altyapısının amacı taşıta elastik bir destek görevi görmektedir. Hattaki ani rijitlik değişimleri hem üstyapı hem de altyapı elemanlarına büyük zararlar vermekte ve zaman içinde bakım maliyetlerini fazlasıyla artırmaktadır. Raylı sistemlerde açık hattan köprü/viyadük bölgesine geçişlerde, bu ani rijitlik değişimleri sıklıkla görülmektedir. Bunun temel sebebi, derin temeller üzerinde duran çok yüksek rijitliğe sahip sanat yapısı ile elastik davranış gösteren zemin tabakasının farklı rijitlik değerlerine sahip olmasıdır. Tekerlek yükleri bu geçiş üzerinde seyrederken iki bölgede oluşan farklı zemin oturmaları, seviye farklılıklarına neden olmaktadır. Zaman içinde bu seviye farklılığı demiryolu yapısına gelen düşey yöndeki dinamik etkiyi artırır ve hem üstyapı hem de altyapıyı hasara uğrattır. Traverslerde kırılma, ray çatlakları, şekil bozuklukları ve zemindeki oturmalar bu hasarlardan en önemlileridir.

Bu çalışmanın 5. bölümünde demiryolu geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ve nedenleri, uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri incelenmiş ve bir kent içi raylı sistem köprü geçişi için örnek bir çalışma yapılmıştır. Amaç raylı sistemler köprü geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlara nasıl önlemler alınabileceğini incelemektir. Literatürde hız farklarına göre değişen oturma miktarları bazı kaynaklar içinde irdelenmiştir ve artan hız ile beraber oturmaların da arttığı görülmüştür (Şekil 5.5, Şekil 5.6). Araştırmalar sonunda geçiş bölgesi iyileştirme yöntemleri altyapı ve zemin elemanları üzerinde yapılanlar ve üstyapıda yapılanlar olarak ikiye ayrıldığı görülmüştür. Altyapısal önlemlerin faydalı olabilmesi için geçiş bölgesinin, 15-20 m'den veya mevcut köprü/viyadük yapısının 4 katından az olmayan bir uzunlukta yapılması önerilmektedir.

İyileştirmelerde genel amaç zemin stabilitesinin artırılmasıdır. Bu amaçla teknik blok, beton yaklaşım plakası, balast altında asfalt tabaka kullanılması, taş kolon-kazık uygulamaları ve geotekstil kullanımı en başarılı sonuç veren yöntemlerdir. Yöntemler mevcut zemin durumuna göre farklılık gösterebilir.

Üstyapı elemanlarında ise; geçiş bölgesinde ek ray uygulaması, balastın stabilitesinin özel yapışkanlar yardımı ile artırılması, genişleyen travers bölgesi yapılması ve köprünün rijitliğini azaltmaya yönelik ped ilaveleri alınabilecek önlemlerden bazılarıdır. Geçiş bölgelerindeki farklı iyileştirme yöntemleri tek başlarına uygulanabileceği gibi, birleşik bir şekilde de uygulanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalarda birleşik yöntemlerin (altyapı ve üstyapıda aynı anda) daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Örnek bir balastsız üstyapı ile köprü geçiş bölgesi çalışmasında, sonlu elemanlar analizi kullanılarak, HyperWorks yazılımı yardımıyla, belirlenen 16 m'lik geçiş bölgesi için, 2 mm seviyesindeki oturma limitlerini sağlayıp sağlamayamadığı, 4 farklı durum için incelenmiştir ve Ekler Bölümünde, bu durumların perspektif görünüşleri ve oturma analizleri verilmiştir. Bu durumlar; serbest zemin durumu, köprü yaklaşımında iyileştirme yapılmayan durum, beton yaklaşım plakası ile iyileştirme ve teknik blok uygulaması ile zemin katmanlarının iyileştirilmesi durumudur. Statik yükleme analizi yapılmasına rağmen, tekerlek yükleri %75 arttırılmış ve dinamik yükleme durumuna yakın sonuçlar bulunmaya çalışılmıştır. Bu tez kapsamında lineer elastik davranış gösteren, taşıma kapasitesi yüksek zeminler irdelendiği için örnek çalışmada 100 Mpa elastite modülüne sahip bir zemin

incelenmiştir. Şekil 2.8’de görüleceği gibi bu QS3 zemin sınıfında bulunan, taşıma kapasitesi yüksek bir zemindir.

Serbest zemin ve köprü yaklaşımındaki açık hat durumlarında analizi yapılan oturma değerlerinin belirlenen limit değerlere çok yaklaştığı saptanmıştır. Ayrıca tekerleğin temas içinde olduğu bölümler incelendiğinde oturma bölgelerinin bu bölgelerde, ray üstünde toplandığı görülmüştür. Bu bölgelerdeki sorun zaman içinde istenmeyen ray seviye değişimleri ve üstyapı bozulmalarına neden olabilir.

Birinci model (bkz. Şekil A.5) herhangi bir geçiş bölgesinin olmadığı 100 Mpa elastisite modülüne sahip doğal zemindeki balastsız üstyapılı demiryolu hattının oturma analizini göstermektedir. Hattaki oturmalar incelendiğinde değerlerin 1.77 mm seviyesinde ve iki dingil bölgesinin alt tarafında yoğunlaştıkları görülmektedir.

İkinci modelde (bkz. Şekil A.6) köprü ile balastsız üstyapı geçiş bölgesinde yine doğal zemin durumunda oluşan oturmalar gösterilmiştir. Birinci modele kıyasla köprü ayağının zemine olan rijit desteği, çok düşük seviyede de olsa oturma değerlerin düşürmüştür. Yine taşıt yüklerinin temas bölgelerinde 1.71 mm civarında otumalar vardır ve köprü ayağına yakın bölgede zemin oturmalarının azaldığı gözlemlenmektedir.

Yaklaşım plakası kullanımının balastsız üstyapı köprü geçiş bölgesinde oturmaları engellemek için ciddi bir katkı yaptığı analiz sonuçlarında görülmektedir. Oluşan en büyük oturma değeri 1.38 mm civarında olmuştur (bkz. Şekil A.7) ve zemin altındaki oturmalar daha geniş bir bölgeye, daha az seviyelerde iletilmiştir. Arka tekerde 1.38 mm olan maksimum oturma değeri ön tekerde daha da azalarak 1.11 mm civarına kadar düşmüştür. Ayrıca zemin altında kullanılan bu rijit mesnet tekerleklerden iletilen yükü ön ve arka tekerlek bölgelerinde normal zemin durumuna göre daha iyi sönümlemiş ve bu bölgedeki oturmaları azaltmıştır. Bununla beraber balastsız üstyapıyı desteklemiş ve bölgenin rijitliğini artırmıştır.

Teknik blok iyileştirmesinde, köprü ayağına yakın taraftaki dolgu zeminde %3 civarında çimento bazlı karışım kullanılacağı varsayılmış ve köprü ile olan düşey sürtünme katsayısı 0.5 alınmıştır. Zemin iyileştirmelerini irdeleyen bu modelin analizi, en iyi geçiş bölgesi performansını teknik blok uygulamasının verdiğini göstermiştir. En yüksek oturma değeri 0.65 mm olarak bulunmuş ve belirlenen oturma limitlerinden çok daha düşük çıkmıştır (bkz. Şekil A.8). Daha önemlisi

herhangi bir bölgede, tekerlek temas bölgesi dahil, yüksek bir oturma görülmemiş ve zemin katmanları içinde derinlere yayılan düşük oturma değerleri alınmıştır.

Örnek çalışma sonucunda görüldüğü gibi geçiş bölgesinin performansı, altyapının stabilitesinin artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Zemin analizleri sonucunda görülmüştür ki eğer bölgedeki mevcut zemin oturmaya elverişli bir zemin ise bu bölgeye teknik blok uygulaması yapılması hattın uzun ömürlü ve konforlu olması için faydalıdır. Bununla beraber yaklaşım plakası da uygulanabilecek bir başka alternatif metot olabilir.

Hat inşası sırasında alınacak önlemler demiryolu geçiş bölgesinin bakım gereksinimlerini ve hattaki bozulmaları azaltacaktır. Bu tez kapsamında lineer elastik davranış gösteren, taşıma kapasitesi yüksek zeminler irdelenmiştir. İlerde yapılacak farklı çalışmalar için ise kohezyonlu ve düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerin köprü geçiş bölgelerinin incelenmesinde fayda vardır.



KAYNAKLAR

- [1] **Profillidis, V. A** (1995). Railway Engineering, *Cambridge University Press*, UK.
- [2] **Esveld, C.** (2001). Modern Railway Track, Secon Edition, *Delft University of Technology*, Hollanda.
- [3] **MEB, Platform ve Tüneller.** (2013). Raylı Sistemler Teknolojisi, Mesleki ve Teknik Eğitim Programlar ve Öğretim Materyalleri, Ankara.
- [4] **Li, D.** (1994). Railway Track Granular Layer Thickness Design Based on Subgrade Performan Under Repeated Loading, PhD Thesis, University of Massachusetts, Massachusetts, ABD.
- [5] **MEB, Köprüler.** (2013). Raylı Sistemler Teknolojisi, Mesleki ve Teknik Eğitim Programlar ve Öğretim Materyalleri, Ankara.
- [6] **UIC Code 719R.** (2008). Earthworks and Track-Bed Layers For Railway Lines, *International Union of Railways*, 3rd Edition.
- [7] **Hartmark H.** (1978). Frost Protection of Railway Lines, *Norwegian State Railways*, Oslo, Norveç.
- [8] **Nurmikolu A. ve Kolisoja P.** (2005). Extruded polystyrene (XPS) foam frost insulation boards in railway structures, Laboratory of Foundation and Earth Structures, *Tampere University of Technology*, Tampere, Finlanda.
- [9] **Ay İ.** (2014). Geosentetik Malzemelerin Demiryollarında Kullanımı ve Balast-Alt Balast Tabaka Kalınlıklarının Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [10] **Erel A.** (1989). Demiryollarında Üstyapı Testi ve Boyutlandırılması (Mikroyol Yöntemi), YTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [11] **UIC Code.** (2017) Code of Practice for the Loading and Securing of Goods on Railway Wagons. Volume 1, Principles, 1st Edition
- [12] **Öztürk, Z. ve Arlı, V.** (2009). Demiryolu Mühendisliği, *İstanbul Ulaşım A.Ş.*
- [13] **Şahin, O.** (2011). Demiryolunda Hat Rijitliğinin ve Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [14] **Michas, G.** (2012). Slab Track Systems for High-Speed Railways, Department of Transport Science, Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç
- [15] **URL** <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schwellen_Rheda.jpg>, erişim tarihi 01.10.2017.
- [16] **URL** <<http://www.slabtrackaustria.com>>, erişim tarihi 01.10.2017.

- [17] **Thuer, G. ve Vocks, H.** (2012). Track Slab System Technology in Australia-Innovation Challenges Based on European Long Term Experiences, Rhomber Rail Australia.
- [18] **Öncü, E.** (1999). Kentlerimizde Raylı Sisteme Geçilme Koşulları, Kent İçi Ulaşımında Raylı Sistemler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası.
- [19] **Baştürk, G.** (2014). Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi ve Dünya Örnekleri ile Karşılaştırılması, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ulaştırma ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- [20] **Arlı V.** (2010). Kent İçi Raylı Sistemler, Teknik Dergi, EMO Antalya Şubesi Yayını.
- [21] URL<https://en.wikipedia.org/wiki/Medium-capacity_rail_system>, erişim tarihi 24.10.2017.
- [22] **Demirdağ, M. N.** (2007). Kent İçi Raylı Sistemlerde Hat Bakım ve Maliyeti, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- [23] URL<[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Notre-Dame-des-Champs_\(Paris_Metro\)](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Notre-Dame-des-Champs_(Paris_Metro))>, erişim tarihi 24.10.2017.
- [24] **Elker, C.** (2013). Kentsel ulaşım sistemlerinin özellikleri: bir karşılaştırma, *1. Toplu Taşıma Kongresi*, Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [25] **Şenlik, İ.** (2013). Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemlerinin Değerlendirilmesi, *Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi*, Mart 2013 sayısı, sayfa 1.
- [26] **Sasaoka, C., Davis, D., Guilen D.** (2004). Damping Pads and Track Designs for Reducing Impacts at Special Trackwork, *Transposrtation Tech. Center, Inc.* Pueblo, Colorado, ABD.
- [27] **Stark, D., Wilk T., Rose, J.** (2016). Design and Performance of Well-Performing Railway Transitions, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, sayfa 20-26.
- [28] **Coelho, L. M.** (2014). Structure/Embankment Transitions in Railway Infrastructures, *Universidade Tecnica de Lisboa*, Lizbon, Portekiz.
- [29] **Paixao, A., Fortunato E., Calçada R.** (2013) Design and construction of backfills for railway track transition zones, *Instituion Mechanical Engineers, Journal of Rail and Rapid Transit*.
- [30] **Banimahd, M. Woodward, P., Kennedy, J., Medero G.** (2010). Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions, *Institution of Civil Engineers, ICE Proceedings, Transport Volume 165, Issue TR3*.
- [31] **Read, D. Li, D.** (2006). Design of Track Transitions, *Transportation Technology Center*, Pueblo, Colorado, ABD.
- [32] **Kerr, A. D., Moroney, B. E.** (1993). *Track Transition problems and remedies, AREMA Bulletin 742, Washington, ABD.*

- [33] **Sanudo, R., Casado, J. A.** (2016). Track transitions in railways: A review, *Construction and Building Material Journal, Volume 112*, Sayfa 140-157.
- [34] **Altair Engineering** (2013). Altair HyperWorks 13.0, Pre-processing with HyperMesh for OptiStruct.





EKLER

EK A.1 İncelenen 4 farklı durum için perspektif görüşleri

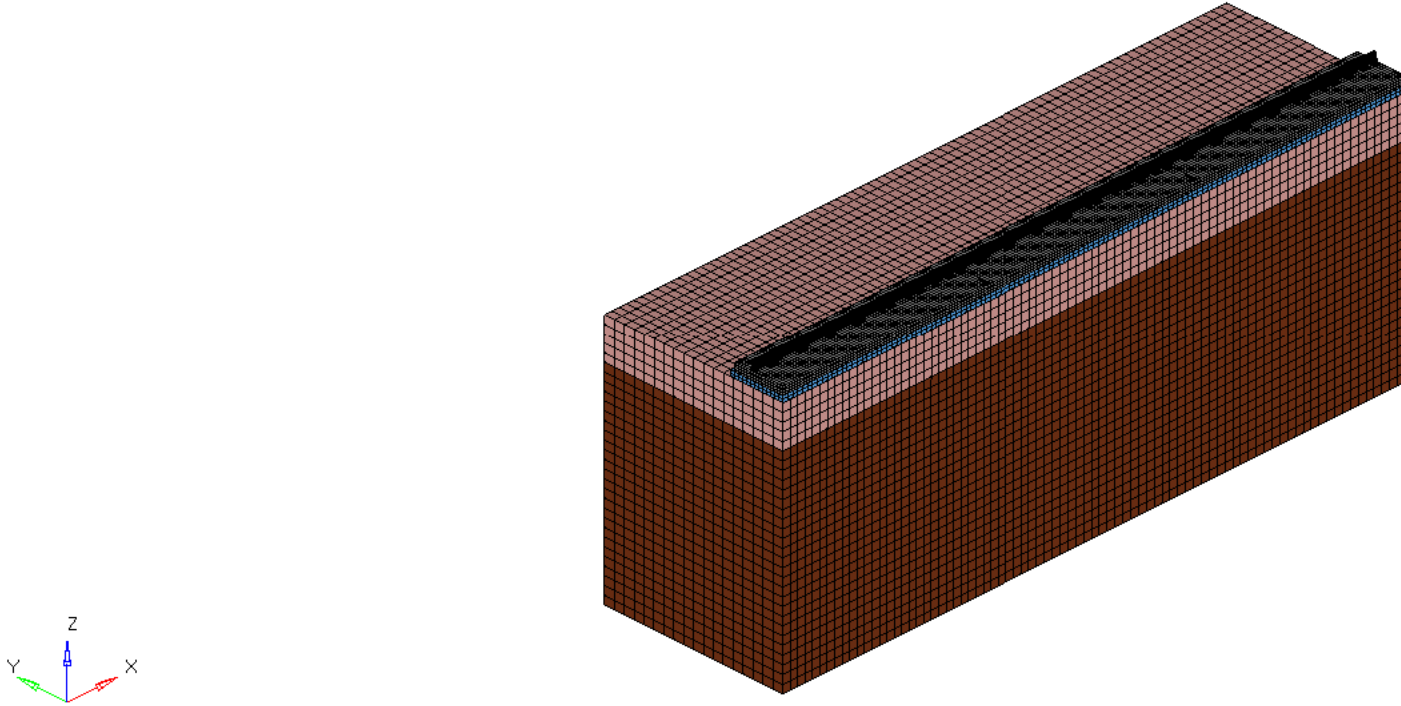
EK A.2 İncelenen 4 farklı durum için oturma analizleri



EKLER

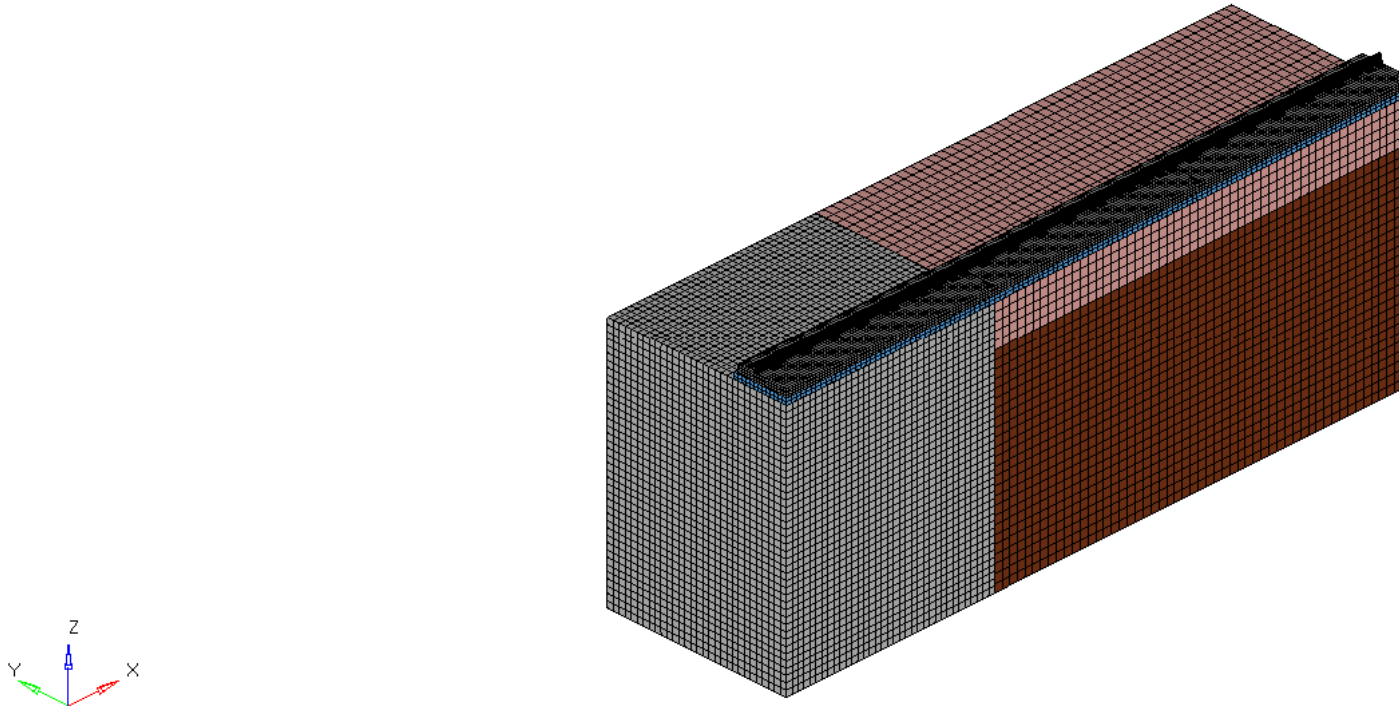
EK A.1 İncelenen 4 Farklı Durum İçin Perspektif Görünüşleri

DURUM 1:



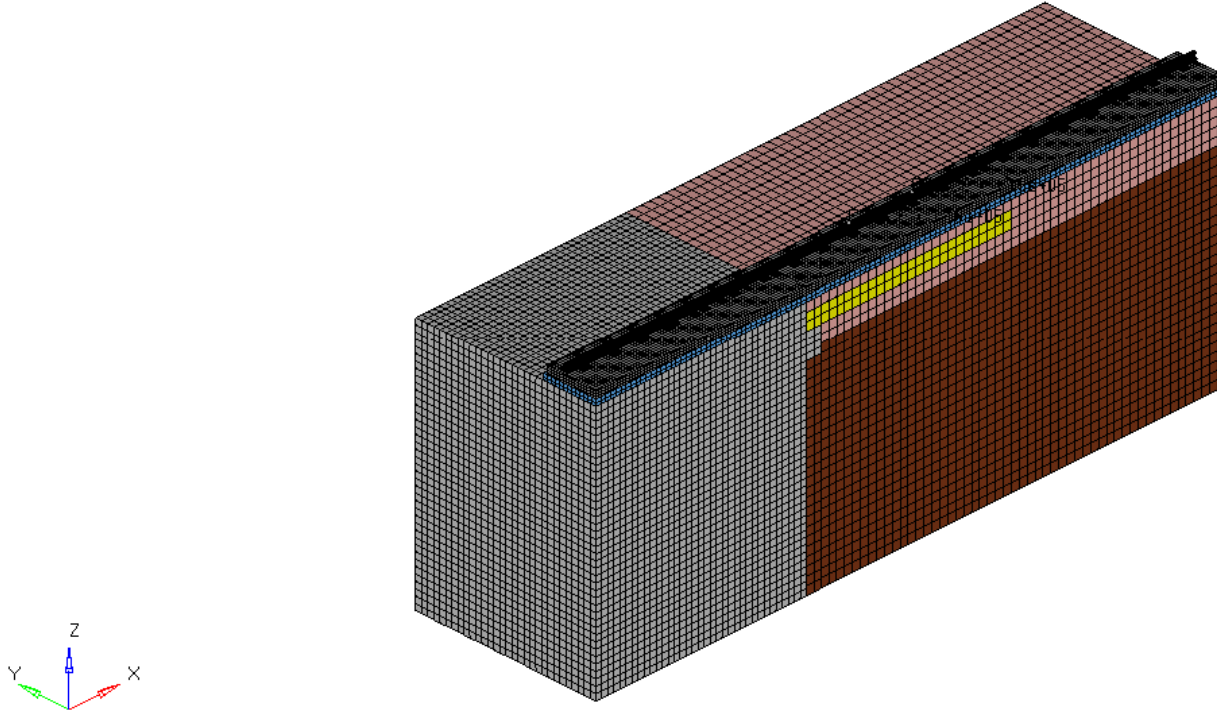
Şekil A.1 : Serbest zemin durumu modeli perspektif görünüşü

DURUM 2:



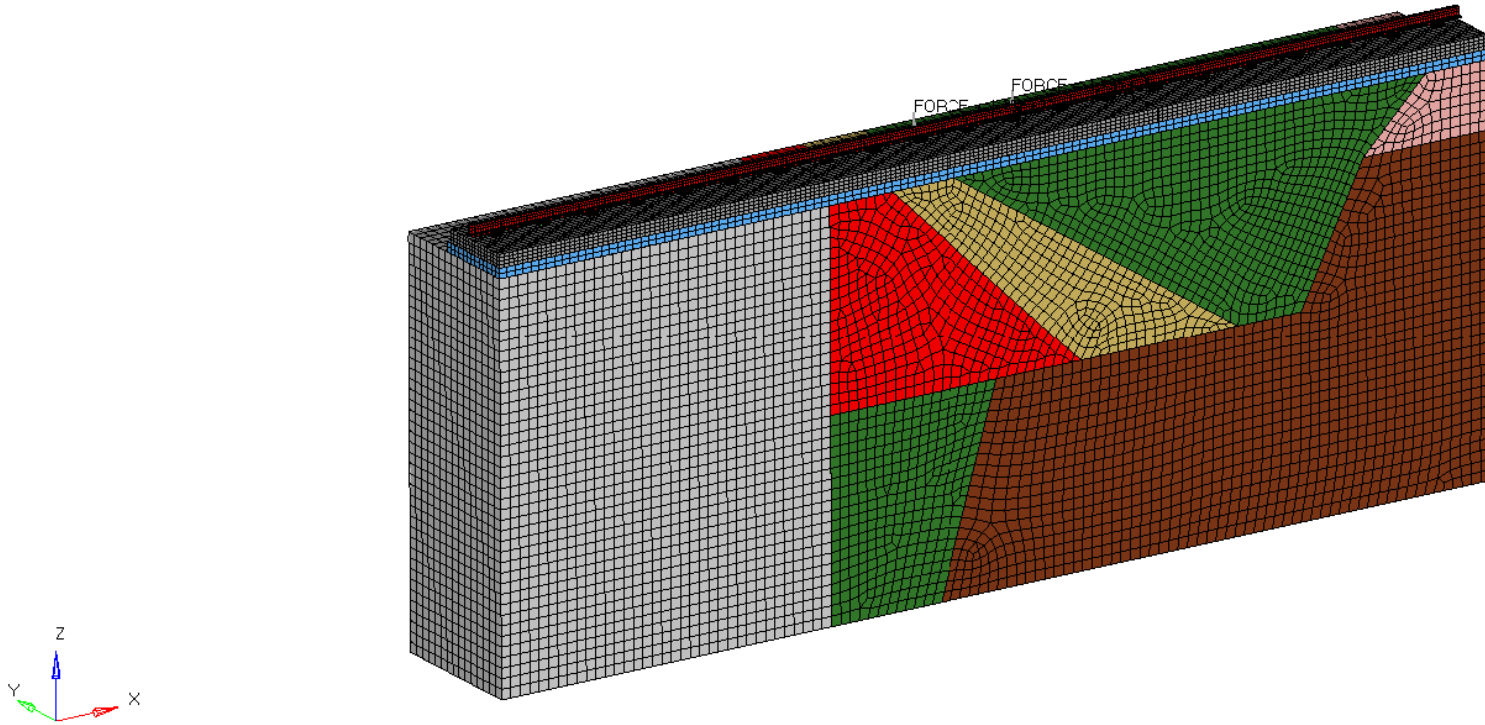
Şekil A.2 : Köprü balastsız hat geçişinde serbest zemin durumu modeli perspektif görünüşü

DURUM 3:



Şekil A.3 : Köprü balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumu modeli perspektif görünüşü

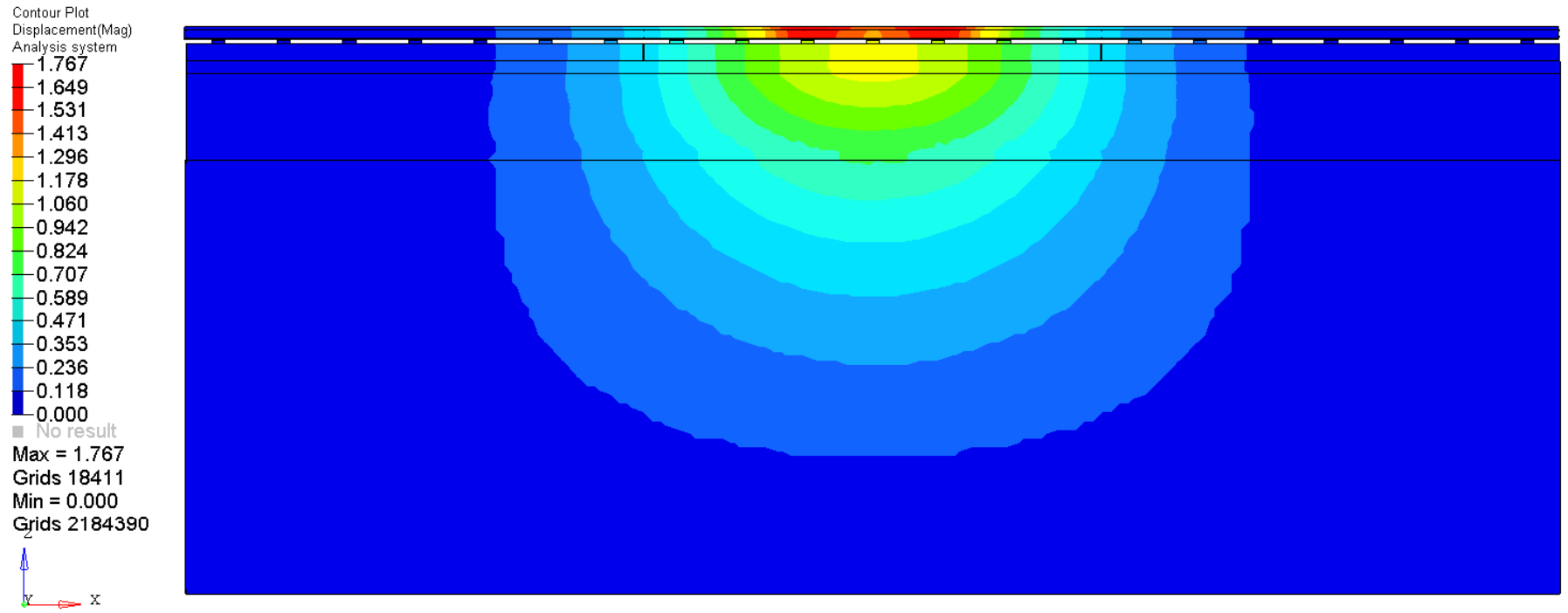
DURUM 4:



Şekil A.4 : Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulanması durumu modeli perspektif görünüşü

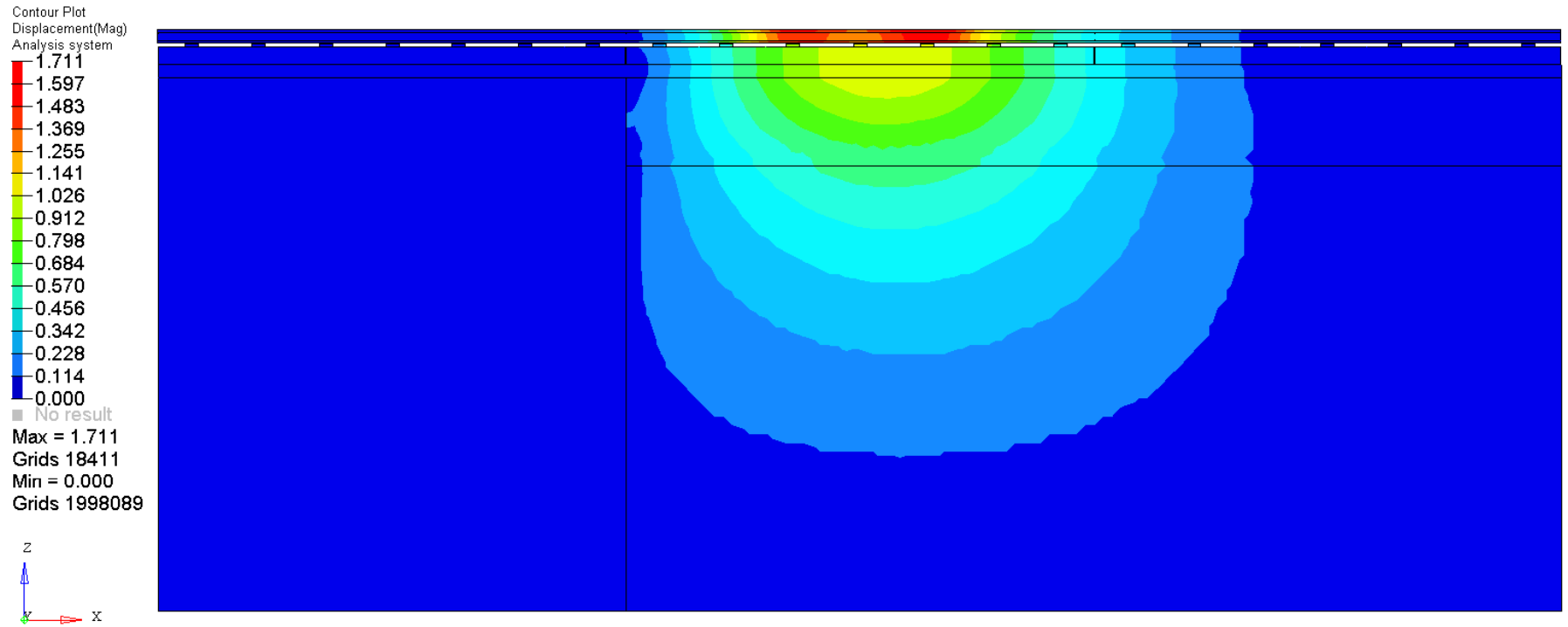
EK A.2 İncelenen 4 Farklı Durum İçin Oturma Analizleri

DURUM 1:



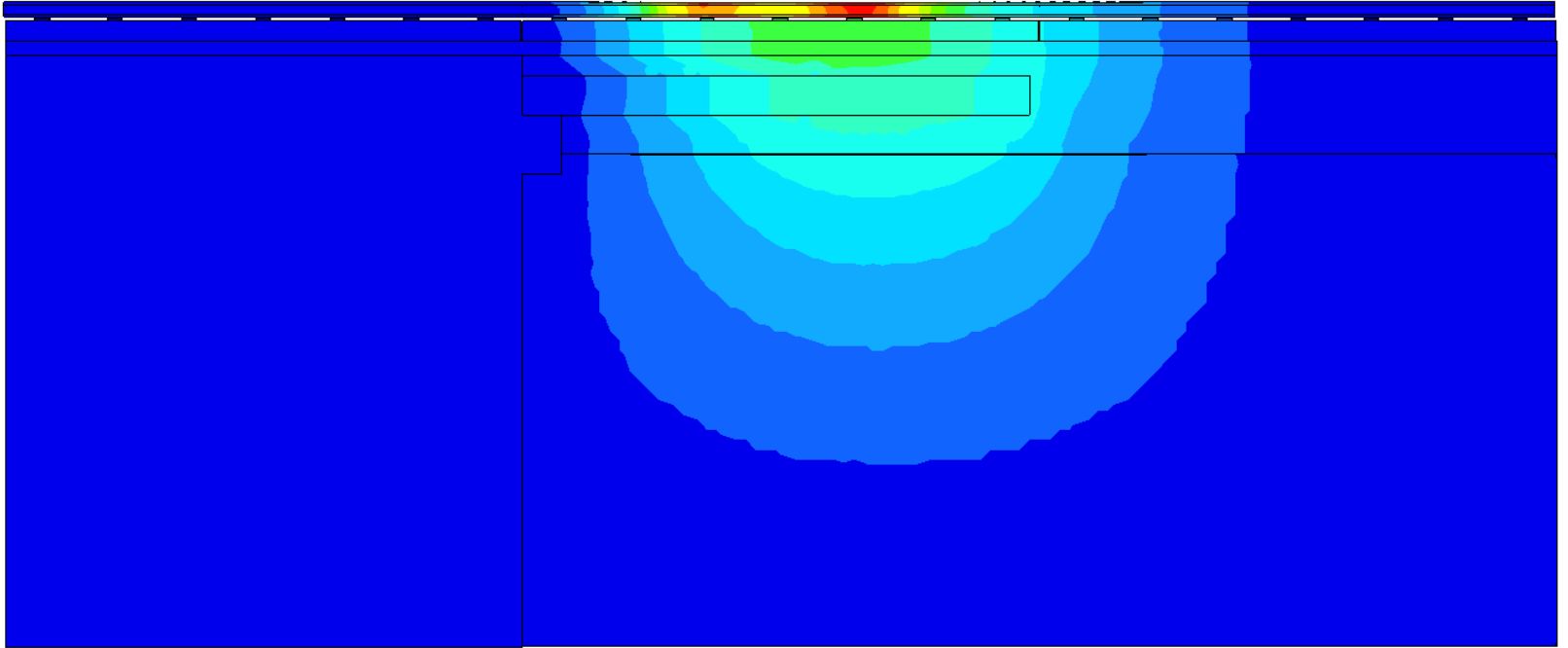
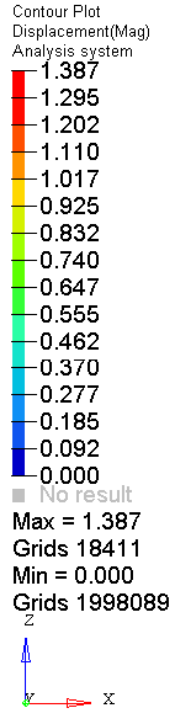
Şekil A.5 : Serbest zemin durumu zemin oturma analizi

DURUM 2:



Şekil A.6 : Köprü yaklaşımlı serbest zemin durumu oturma analizi

DURUM 3:



Şekil A.7 : Köprü balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumu modeli oturma analizi

DURUM 4:

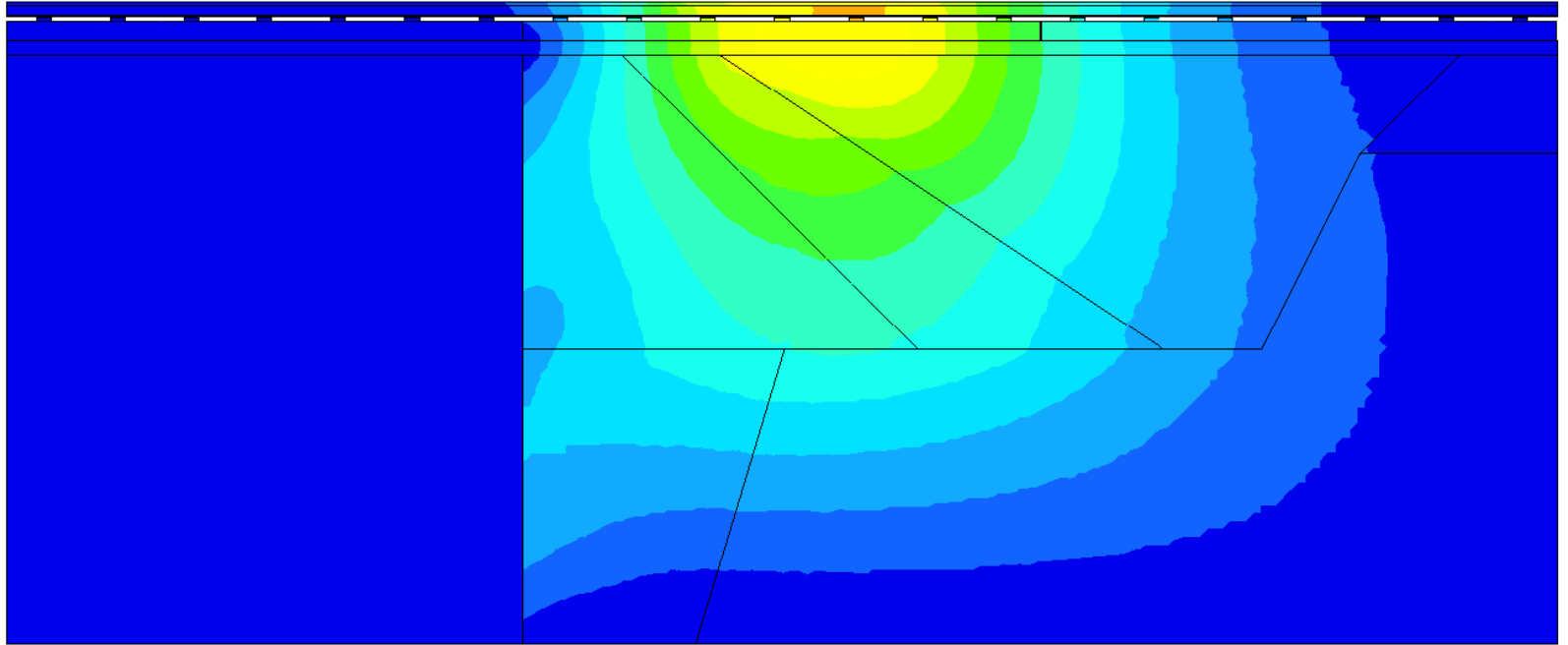
Contour Plot
Displacement(Mag)
Analysis system

0.760
0.709
0.658
0.608
0.557
0.506
0.456
0.405
0.354
0.304
0.253
0.203
0.152
0.101
0.051
0.000

■ No result

Max = 0.760
Grids 2322773
Min = 0.000
Grids 1998089

Y
X



Şekil A.8 : Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulanması durumu modeli oturma analizi



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Fahrettin Ersin ERBAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara / 13.07.1987
E-Posta : erbasersin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2006, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Lisansüstü : 2011, İTÜ, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2012 Üçer-Alter-Degenkolb İş Ortaklığı / İnşaat Mühendisi
- 2012-2013 Proses Mühendislik / Ulaştırma Mühendisi
- 2013-2014 OHL- Marmaray Projesi / Hat İşleri Mühendisi
- 2014-2015 Grontmij Mühendislik / Ulaştırma Mühendisi
- 2015- Halen Alstom Ulaşım A.Ş. / Hat İşleri Kıdemli Mühendisi