

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLUNDA HAT RİJİTLİĞİNİN
VE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Osman ŞAHİN**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Ulaştırma Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

MART 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLUNDA HAT RİJİTLİĞİNİN
VE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Osman ŞAHİN
501081418**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.03.2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 17.03.2011**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK (İTÜ)

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Haluk GERÇEK (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜRSOY (YTÜ)**

MART 2011

ÖNSÖZ

Gelişmiş ülkeler hızlı, konforlu, ekonomik, güvenli ve çevre dostu ulaştırma sistemleri üzerinde durmakta ve en iyi çözümü esas almaktadırlar. Demiryolları istenen özelliklere optimum çözümü verebilecek bir sistem olarak gün geçtikçe gelişmekte ve diğer ulaştırma sistemleri içindeki payı artmaktadır.

Demiryollarının bu gelişiminin önemli nedenleri, taşımacılık sektöründe karayolu ve havayollarında yüklü bir trafiğin oluşması ve mevcut koridorların bu ağır trafik yükünü kaldıramaz duruma gelmiş olması ve daha kısa sürede daha fazla yolcu ve yükü, ucuz ve güvenli taşıma olanağıdır.

Bütün bu nedenlere bağlı olarak yüksek hızlı demiryolu projeleri ve uygulamaları yaygınlaşmıştır. Hem yüksek hızlı hatlarda hem de kentiçi raylı sistemlerde konfor, maliyet ve güvenlik üzerinde giderek daha fazla üzerinde durulan kavramlardır. Bunların yeterli olabilmesi için de birçok faktörün yanısıra iyi bir alt ve üstyapı projelendirmesi, uygulanması ve bakımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, balastlı ve balastsız demiryolu üstyapılarının temel farklılıkları, tasarım çeşitleri, maliyet açılarından karşılaştırılmaları ve hat rijitliğinin değişik açılardan etkileri incelenmektedir.

Yaptığım bu çalışma boyunca, beni sabır ve hoşgörü ile yönlendiren, değerli fikir ve tecrübelerinden faydalandığım tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Mart 2011

Osman ŞAHİN
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	19
2. BALASTLI-BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN ÖZELLİKLERİ	21
2.1 Balastlı Hat Özellikleri	22
2.2 Balastlı Hattın Uygulama Esasları	23
2.3 Balastsız Hat Özellikleri.....	24
2.4 Balastsız Hattın Uygulama Esasları	26
3. BALASTLI VE BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN KARŞILAŞTIRMASI.....	29
3.1 Balastlı ve Balastsız Üstyapı Uygulamalarının Karşılaştırılması	29
3.2 Balastlı ve Balastsız Üstyapıda Bakım Çalışmaları Açısından Farklılıklar	31
3.3 Balastlı ve Balastsız Hatlarda Üstyapı Maliyeti.....	32
3.4 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro Hattının Üstyapı Maliyet Analizi	34
3.5 Hollanda'daki HSL-Zuid Hattı İçin Değerlendirmeler	42
4. BALASTLI VE BALASTSIZ ÜSTYAPININ TASARIM ÇEŞİTLERİ.....	45
4.1 Balastlı Üstyapının Tasarım Çeşitleri	45
4.2 Balastsız Üstyapının Tasarım Çeşitleri	46
4.2.1 Asfalt Beton Yataklı Üstyapılar	47
4.2.2 Beton Plaklı Üstyapılar	48
4.2.2.1 Beton plak üzerinde traversli olarak yapılanlar	48
4.2.2.2 Traverssiz olarak yapılan tipler.....	49
4.2.3 Prefabrik Panelli Üstyapı	49
5. HAT RİJİTLİĞİ	51
5.1 Rijitlik Katsayısı.....	51
5.2 Balastlı Üstyapıda Hat Rijitliği	54
5.3 Balastsız Üstyapıda Hat Rijitliği	59
5.4 Optimum Hat Rijitliği	63
6. SONUÇLAR	71
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
ERS	: Embedded Rail Structure
YİD	: Yap İşlet Devret
UIC	: International Union of Railways
AVE	: Alta Velocidad Española
TGV	: Trains à Grande Vitesse

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Bazı üstyapıların yapım ve eşdeğer yıllık maliyetleri.....	34
Çizelge 3.2 : Hat bakım makinelerinin günlük amortisman maliyetleri.....	36
Çizelge 3.3 : Makine malzeme maliyeti.	37
Çizelge 3.4 : Makine diğer maliyeti.	37
Çizelge 3.5 : Makine maliyeti.....	38
Çizelge 3.6 : Operatör maliyeti.....	38
Çizelge 3.7 : Makine çalışma maliyeti.	38
Çizelge 3.8 : Bakım çalışması işçilik maliyeti.	39
Çizelge 3.9 : Balastlı üstyapının toplam bakım maliyeti.	41
Çizelge 3.10 : Yapım ve bakım maliyetlerinin toplamı.....	42
Çizelge 4.1 : Uygulanan balastsız üstyapı sistemleri.....	47
Çizelge 4.2 : Balastsız üstyapıların burulma rijitlikleri.	47
Çizelge 5.1 : Üstyapı elemanlarının rijitlik katsayıları.....	52
Çizelge 5.2 : Hat elemanının toplam hat elastikliğine ortalama katkısı	52
Çizelge 5.3 : Elastik ped düşey rijitliği.....	61
Çizelge 5.4 : Fransa’da çeşitli tabakalar ve elastik ped için düşey rijitlik.....	63
Çizelge 5.5 : Almanya’da ray taşıyıcısı için düşey rijitlik.....	63
Çizelge 5.6 : Mesnet rijitlik sınıfları.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Plasser-Theurer 08-16 buraj makinası.....	23
Şekil 2.2 : Plasser-Theurer RM74 balast eleme makinası.	24
Şekil 2.3 : Plasser-Theurer balast regülatör makinası.	24
Şekil 2.4 : Speno International ray taşıma makinası.....	25
Şekil 3.1 : Yenibosna-Havaalanı arası balastsız üstyapı.	35
Şekil 3.2 : Vossloh-336 bağlantı sistemi.	36
Şekil 4.1 : Klasik demiryolu yapısının enkesiti.	45
Şekil 4.2 : Balastlı üstyapının tasarım örnekleri.	46
Şekil 5.1 : Demiryolu üstyapısının basitleştirilmiş modeli.....	52
Şekil 5.2 : Sonsuz kiriş üzerinde ray çökmesi ve eğilme momenti.	53
Şekil 5.3 : Balastlı ve balastsız hatta ray çökmesi.	53
Şekil 5.4 : Dinamik balast gerilmesi - hat rijitlik katsayısı ilişkisi.....	55
Şekil 5.5 : Darbe kuvveti - hat rijitlik katsayısı ilişkisi	56
Şekil 5.6 : Traverse gelen tekerlek yük oranı - hat rijitlik katsayısı ilişkisi.	57
Şekil 5.7 : Mesnet levhasının esnekliğinin balast titreşimine etkisi.	58
Şekil 5.8 : Balast çökme miktarı - hat rijitlik katsayısı ilişkisi.....	59
Şekil 5.9 : Rijitlik katsayısının hat üstyapı elemanlarına ve taşıta etkisi.....	64
Şekil 5.10: Bakım maliyetlerinin düşey rijitlikle değişimi	65
Şekil 5.11: Hat rijitliği etkisinin yaklaşık değerleri.....	67
Şekil 5.12: Yüksek hızlı demiryolunun km başına harcanan enerjinin tahmini yıllık maliyetleri.....	68
Şekil 5.13: Hat rijitliği ve toplam maliyet arasındaki ilişki.....	69

SEMBOL LİSTESİ

k_d	: Eşdeğer Rijitlik Katsayısı
k_{ped}	: Elastik Tabaka Rijitlik Katsayısı
$k_{travers}$	: Travers Rijitlik Katsayısı
k_{bz}	: Balast-Zemin Rijitlik Katsayısı
k_{bp}	: Balast- Platform Sisteminin Düşey Rijitliği
k_s	: Ray Taşıyıcının Düşey Rijitliği
Q	: Tekerlek Yüğü
α	: Travers Aralığı
A	: Travers Mesnet Alanı
EI	: Ray Eğilme Rijitliği
σ	: Gerilme
Q_{dingil}	: Dingil Yüğü
M_t	: Yaylandırılmayan Taşıt Kütlesi
α_e	: Contanın Eğilme Açısı
V	: Taşıt Hızı
d	: Hat Çökme Oranı
E_i	: Enerji Dağılımı

DEMİRYOLUNDA HAT RİJİTLİĞİNİN VE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Klasik demiryolu üstyapısı, balast yatağı içine hat çerçevesinin yerleştirilmesi ile oluşmaktadır. Düşük inşa giderleri, kısa yapım süresi, yapım hatalarını düzeltme, deyer ve geometride değışiklik imkanları, balastlı üstyapının çok önemli avantajları, balastın ihtiyaç duyduğu yüksek bakım maliyetleri ve uzun bakım süresi ise göz ardı edilemeyecek dezavantajlarıdır.

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmanın ikinci ve üçüncü bölümlerinde, demiryollarında balastlı ve balastsız üstyapı özellikleri, birbirlerine olan üstünlükleri, uygulama, bakım ve maliyet açılarından karşılaştırmaları yapılmıştır. Örnek bir çalışmada, yapım maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, bakım maliyetlerinin göz önünde bulundurulması ile balastsız üstyapının balastlı üstyapıya göre daha az maliyetli olduğu görülmüştür. Ayrıca dördüncü bölümde balastlı ve balastsız üstyapıların farklı tasarım çeşitleri incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise, balastlı ve balastsız üstyapıda hat rijitliği ve rijitliğin yolculuk konforu, bakım maliyetleri ve işletim maliyetlerine etkilerine değinilmiştir.

Hat rijitliği üzerinde durularak, hat rijitliklerinin dinamik balast gerilmesi, travers aralığı, dingil yükü, darbe kuvveti, traverse gelen tekerlek yük oranı ve balast çökme miktarı parametrelerine göre değışimi ilgili bağıntılarla ve diyagramlarla irdelenmiştir.

Tasarlanacak yeni bir hatta, hat rijitliğine gereken önemin verilmesi, her hattın kendi özelinde değeriendirilmesi ve optimum çözümün araştırılması işletim esnasındaki sorunları ve maliyetleri azaltacaktır.

ANALYSIS OF TRACK STIFFNESS AND ITS EFFECTS ON RAILWAYS

SUMMARY

Classical railway structure designed with placing the track frame into the ballast bed. Low construction costs, short project time, availability for adjusting the errors, opportunity to modify geometry and cant, are the important benefits of ballasted track. High maintenance cost, and long-term maintenance processes are the disadvantages of ballasted track that can not be negligible.

At the second and third chapters of this study, which is presented as a master thesis, properties of ballasted and ballastless railway structures, the superiorities of each other, and comparisons regarding cost, maintenance and application are made. In an example study, although it's construction cost is higher, the maintenance cost for this type of infrastructure designed without ballast is lower when compared to the with ballast. Moreover at the fourth chapter different design types for ballasted and ballastless track are also studied.

At the chapter five, track stiffness of the structures with and without ballast, stiffness's effects on railway comfort, maintenance costs and service costs are analyzed.

With focusing on the track stiffness, track stiffness's variation with the parameters of dynamic ballast stress, traverse's interval, axis load, impact force, wheel load ratio on traverse and ballast's deformation degree are studied with related equations and diagrams.

For a new track, attaching importance to the track stiffness, examining all the tracks on their own properties, and researching the optimum solution would decrease the problems in the life cycle and cut down the service costs.

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişmiş ülkeler ulaştırma sistemleri arasında hız, konfor, ekonomi, güven ve enerji tasarrufu yönünden optimum çözümü esas alan sistemler üzerinde durmaktadır. Bu sistemler arasında ise demiryollarının özellikle de yüksek hızlı hatların en iyi çözümü sağlayabilecek bir yol olarak ulaştırma sistemleri arasındaki payı gün geçtikçe artmaktadır.

Ulaşım sektöründe karayolu ve havayollarında ağır trafik yükünün oluşması ve mevcut potansiyelin bu ağır yüklü trafiği kaldıramaz hale gelmiş olması, daha kısa sürede daha fazla yolcu ve yükü ucuz ve güvenli şekilde taşıma olanakları yüksek hızlı trenlere ihtiyaç duyulmasının temel nedenleridir.

Karayolu ve özellikle havayolu taşımacılığında giderek artan tıkanmaların kıtanın ulaştırma sistemini tehdit etmesi, aynı zamanda demiryollarının çevre ve enerji sorunlarına karşı en uygun bir ulaştırma türü olması Avrupa'da yüksek hızlı demiryollarının yaygınlaştırılmasının nedenleridir. Enerji tasarrufu işletme ekonomisinin en önemli unsurlarından biridir. Yüksek hızlı tren tasarımlarında yolcu-km başına düşen enerji tüketim miktarını düşürücü yöndeki gelişmeler örneğin vagon ağırlıklarının azaltılması, iki katlı vagon tasarımları vb. bu tercihi daha da güçlendirmektedir [1].

Bütün bu nedenlere bağlı olarak yüksek hızlı demiryolu projeleri ve uygulamaları hem Japonya'da hem Avrupa ülkelerinde yaygınlaşmıştır. Hem yüksek hızlı hatlarda hem de kentiçi raylı sistemlerde konfor ve güvenlik, üzerinde giderek daha fazla durulan kavramlardır. Bunların yeterli olabilmesi için de birçok faktörün yanısıra iyi bir alt ve üstyapı projelendirmesi, uygulanması ve bakımı önem kazanmaktadır.

Demiryolunda balastlı ve balastsız üstyapıların birbirlerine alternatif olmaları durumu göz önünde bulundurularak, çalışmanın bölümlerinde bu iki üstyapı tipi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın amacı; balastlı ve balastsız üstyapılarda hat özelliklerinin, maliyet farklılıklarının, hat rijitliğinin ve etkilerinin incelenmesidir.

İkinci bölümde bir üstyapıdan taşıyıcı ve yol olarak beklenenler ifade edildikten sonra bu iki üstyapı tipinin özellikleri ve uygulama esaslarına değinilmiştir.

Üçüncü bölümde bu iki üstyapı tipinin birbirlerine göre olan konumlarının ortaya konulabilmesi için uygulama, bakım ve maliyet açılarından karşılaştırılmaları yapılmış ve örnek bir hat üzerinde maliyet analizi çıkarılmıştır.

Örnek bir çalışmada kentiçi raylı sistemlerin inşaatında balastsız üstyapının sağladığı avantajlar açıklanarak ve servis ömrü boyunca maliyet analizi yapılarak bu üstyapının daha ekonomik olduğu ortaya konulmuştur. Bu amaçla, İstanbulda Yenibosna-Havaalanı hafif metro hattı seçilmiştir. Hafif metro hattının Aksaray-Yenibosna arasında kalan kısmı balastlı üstyapı olarak inşa edilirken, Yenibosna-Havaalanı kısmı balastsız üstyapı olarak inşa edilerek 2002 yılında işletmeye açılmıştır.

Dördüncü bölümde bu iki üstyapı tipinin tasarım çeşitleri ele alınmış ve dünya üzerindeki uygulamalarından örnekler verilmiştir.

Beşinci bölümde ise balastlı ve balastsız üstyapıda hat rijitliği ve etkileri incelenmiştir.

Hat rijitlik katsayısının üstyapı elemanlarının yer değiştirmesine, gerilme dağılımına, titreşim seviyelerine doğrudan etkisi vardır. Bu etkilerin en önemli sonuçları bakım-işletme maliyetleri ve yolculuk konforudur. Bu nedenle, hat tasarım aşamasında optimum hat rijitliği belirlenerek uygun tasarım yapılmalıdır. Demiryolunda rijitliğin önemi aşıkardır, çünkü altyapının rijitliği raylar, traversler ve balast gibi hat bileşenlerinin ekonomik ömürlerini etkilemektedir.

Tecrübeler ve deneysel sonuçlar, düşey rijitlikteki artışın, ray üzerinde araç tarafından oluşturulan düşey gerilmeler üzerinde negatif bir etkisinin olduğunu gösterir. Bununla beraber, düşey rijitlikteki bu değişim, enerji sarfiyatında oldukça önemli azalmaya sebep olur. Bu ikilem, hat düşey rijitlik seviyesinin, hat bakım maliyetleri ve enerji sarfiyatı arasındaki ilişkide maliyetleri azaltarak optimum seviyeye gelmesini gerektirir.

2. BALASTLI VE BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN ÖZELLİKLERİ

Demiryolu taşıtlarının güvenli, konforlu ve ekonomik olarak seyrini sağlayan ve altyapı üzerine döşenmiş bulunan malzeme ve elemanların tümüne üstyapı denir. Klasik demiryolu üstyapısı basit olarak ray ve traversler tarafından çerçevelendirilmiş ve balast tarafından desteklenmiştir. Çerçeveler hattın en küçük birimi olup art arda gelmeleri ile üstyapıyı oluştururlar.

Üstyapı aşağıdaki kısımları içerir:

- Raylar, tren tekerleklerini kılavuzlar ve tekerleklerle temas yüzeyi sağlar.
- Bağlantı elemanları ile traversler, raylara gelen yükleri yayar ve ray açıklığını korurlar.
- Balast, genellikle kırma taştandır, çok ender durumlarda çakıldan olur. Bu tabaka taşıt kaynaklı titreşimlerin önemli kısmını sönmülemeli, yeteri kadar yükü yaymalı ve yağmur sularını çabuk drene edebilmelidir.
- Alt balast tabakası çakıl, kum, doğal agrega karışımıdır. Alt balast tabakası, balastın altyapıya gömülmesini ve ikisinin karışmasını önler, drenaja yardım eder ve ayrıca daha fazla yük dağılımını sağlar [2].

Üstyapının taşıyıcı ve yol olarak görevleri ise şunlardır:

1. Hat boyunca demiryolu araçlarına düzgün ve pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak.
2. Demiryolu taşıtlarından gelen statik ve dinamik yükleri, güvenle ve kalıcı şekil değişikliğine uğramadan karşılamak ve kısmen azaltarak altyapıya iletmek.
3. Yeterli elastikliğe sahip olmak.
4. Şekil bozukluğuna uğradığında, kolayca eski durumuna getirilebilir özellikte olmak.
5. Yüzey sularının bünyesinden kolaylıkla uzaklaştırabilir özellikte olmak.
6. Uzun ömürlü ve ekonomik olmak.

2.1. Balastlı Hat Özellikleri

Göreceli olarak düşük yapım masrafları ve kısa yapım süresi, yapım hatalarını düzeltme imkanı, deyer ve geometride değişiklik imkanları, balastlı üstyapının çok önemli avantajlarıdır.

Balastlı hatların bunların yanında bazı dezavantajları vardır, bunlar;

- Zaman içinde balastın doğrusal olmayan ve plastik davranışı sonucu boyuna ve yanal doğrultularda hat yatağında kaymalar oluşması,
- Kurbalarda balast yatağının yetersiz yanal kayma direnci sonucu dengelenmeyen yanal ivmelerin oluşması,
- Yüksek hızlarda balastın havaya fırlayıp raya ve araca çarpması,
- Köprü ve viyadüklerde balastın oluşturduğu ağır yükten dolayı, taşıyıcı mesnetlerde daha büyük kesitlerin yapılması ve bunun inşaat maliyetlerini artırması,
- Balast yatağından dolayı tünel kesiti yüksekliğinin artmasıdır.

Balastlı üstyapıda sıkı sıkıya temellendirme olmadığından işletme etkileri altında zamanla balast yatağında danelerin yer değiştirmeleri ve bununla birlikte hat çerçevesinin düzensiz yerleşip oturması gibi mahsurlar ortaya çıkar, yani hat kalitesinde giderek bir kötüleşme meydana gelir. Bu nedenle balastlı üstyapıda düzenli aralıklarla buraj makinesi ile hattın yatay ve boyuna doğrultusundaki hatalar düzeltilmelidir. Bakım işleri yoğun sefer yapılan hatlarda işletmenin engellenmesine yol açar. Bu bakımdan performansı yüksek demiryolu üstyapısında oturma davranışının optimize edilmesi beklenmektedir.

Geniş kapsamlı laboratuvar araştırmaları ve işletme hatlarında uzun yıllar yürütülen gözlemlere dayanarak, balastın oturma davranışının balastın basınçla sıkışmasına, işletme ve hava şartlarına bağlı olduğu görülmüştür [2].

Klasik hatta (balastlı hat), dinamik yükleri absorbe edecek esnekliğin yarısı balast yatağından, yarısı da altyapıdan sağlanır. İdeal olarak, hat yapısının rijitliği 100 kN/mm civarında olmalıdır, bu da 20 ton dingil yükü altında 1 mm deplasmana denk olur. Yüksek frekanslı vibrasyonlar ray ile travers arasına yerleştirilen ray pedi ile absorbe edilir.

2.2. Balastlı Hattın Uygulama Esasları

Raylı sistemlerin balastlı hat bölümlerinde jeoteknik raporlar ile zemin sınıfları belirlenir ve söz konusu zemin sınıflarına göre gereken derinlikte hafriyat yapılır. Bu aşamada hat eksenini düz kısımda 20 m, kurb veya birleştirme eğrisinde ise 10 m’de bir eksen kazığı uygulanarak belirlenir. Bu işlem için beton çivileri bir çivi tabancası yardımıyla aks ve kotunda; üzerine mira tutulabilecek durumda kolayca yerleştirilebilir. Altyapısı hazırlanmış olan dolgu zemin üzerine alt tabaka balast (ince kırma taş) serilir ve vibrasyonlu silindir ile sıkıştırılır. Son dolgu kotu travers alt kotundan 5 cm düşük olacak şekilde ± 3 cm tolerans dahilinde serilerek reglajı yapılır.

TCDD, balastlı hatlarda tam makinalı bakım gerçekleştirebilecek donanıma sahiptir. TCDD’de çok farklı tiplerde bakım makinaları kullanılmaktadır. Bunlar 08-16 buraj makinası, RM 76 UHR balast eleme makinası, D912 R balast tokmaklama makinası ve R780 E balast regülatörüdür. Demiryolu bakım makinalarının servis ömrü 15 yıl kabul edilmektedir [3].



Şekil 2.1: Plasser&Theurer 08-16 buraj makinesi.



Şekil 2.2: Plasser&Theurer RM74 balast eleme makinesi.



Şekil 2.3: Plasser&Theurer balast regülatör makinesi.

2.3. Balastsız Hat Özellikleri

Demiryolu hatlarının tasarımlarında servis ömrü maliyeti, inşaat süresi, elverişlilik ve durabilite gibi faktörlerin önemi oldukça artmaktadır. Balast yatağı demiryolu üstyapısının en zayıf elemanı olup, en yüksek bakım harcamalarını gerektirmektedir.



Şekil 2.4: Speno International ray taşlama makinesi.

Geçmişte, yapılacak yeni bir projede yatırım maliyetleri en önemli karar verme parametresi olurken, günümüzde servis ömrü toplam maliyeti daha çok önem kazanmıştır. Bu yeni görüşle balastlı üstyapılar, balastsız üstyapıların avantajları yanında çekiciliğini kaybetmektedir.

Günümüzde dünyanın bir çok bölgesinde balastsız hat benimsenmiştir. Bu yapıların önemli avantajları aşağıda özetlenmiştir:

- Tünellerde yapı yüksekliğinin azalması
- Daha az bakım ihtiyacı ve bundan dolayı daha fazla elverişlilik
- Artan servis ömrü
- Trenlerde yalpa (araçların kurbılarda dever gerekmezsizin yana yatması) teknolojisi ile birlikte hız artışlarına imkan veren yüksek yanal hat direnci
- Yüksek hızlarda balast sıçraması sorununun olmaması
- Viyadük ve köprülerde, balasttan gelen yükün azalmasıyla, daha ekonomik, daha ince, daha zarif bir görünüşe sahip yapılar elde edilmesidir.

Döşeme sistemli hattın düşük bakım özelliklerinden faydalanabilmek için altyapı tabakalarının homojen ve yükleri yataklayabilmesini sağladığından emin olmak gerekir. Balastsız üstyapının yanal kayma direnci oldukça yüksektir ve bundan dolayı yüksek hızlara imkan verir.

Bakım ihtiyacı hemen hemen yoktur ama işçilik maliyetlerine bağlı olarak yapım maliyeti yüksektir. Bu sebeple bir hat yapısına karar verilirken toplam ömür maliyetine dayanan bir alternatif karşılaştırması yapılmalıdır.

Balastsız hat özellikle tünellerde uygundur, çünkü tünel yüksekliğinde (25 cm kadar) önemli bir azalma sağlanabilir ve bakım gerekmemektedir. Bu durumda üstyapı rijitliğini azaltmak gerekir ve bunun için uygun kalınlıklarda elastik pedler kullanılır.

Balastsız hatlarda ve köprülerde, raylar doğrudan betona sabitlenir, balastın eksikliğini dengelemek için sisteme ek bir esneklik katılmalıdır. Bunu yapmanın iki yolu vardır. İlki ray altına ekstra esneklik eklemek, ekstra kalın ray pedleri eklemek veya gömülü ray sistemi kullanmak, ikincisi ise blok veya traverslerin altına ikinci bir esnek tabakanın eklenmesidir. Böylece araçlardaki gibi birinci ve ikincil süspansiyon ile iki kütleli yay sistemi efektif olarak sağlanır. Hem ray altına hem de travers veya beton blok altına esnek tabakaların yerleştirilmesi ile bu sağlanır.

En çok bilinen döşeme hat yapıları şunlardır:

- Rheda, Züblin ve diğer değişik tipler (Almanya)
- Stedef, Sonneville düşük vibrasyon tipi (Fransa)
- Walo (İsviçre)
- Edilon blok hat, gömülü ray yapıları (Hollanda)
- Shinkansen döşeme hattı (Japonya, Güney Kore)
- IPA döşeme hattı (İtalya)
- ÖBB-Por (Avusturya)

2.4. Balastsız Hattın Uygulama Esasları

Beton tabaka kalınlıkları, kullanılacağı yerlere (zemin, tünel, köprü, viyadük) göre değişmektedir. Beton taşıma tabakası dikdörtgen veya tekne kesitli olabilmekte, 2 mm profil toleransı ile yapılmaktadır. Beton tabakası üzerinde araçların seyredebilmesi için basınç mukavemetinin 12 N/mm^2 olmasına dikkat edilmelidir. Beton taşıma tabakası yerinde dökümün dışında, plak ya da çerçeve şeklinde prefabrik olarak da üretilir. Enine kuvvetlerin aktarılması için prefabrik elemanların birbirine bağlanması gerekir. Genel olarak bir betonarme üstyapının uygulanabilmesi için önkoşullar, laboratuarda test edilmiş ve 5 yıl işletme hattında denenmiş yapının yanında, kaliteli ve tecrübeli personel ihtiyacıdır [4].

Önemli uygulama esasları:

- Beton taşıma tabakası donatısız ve derzli, zayıf donatılı ve yüzeysel derzli, sürekli boyuna donatılı ve derzsiz olarak imal edilebilir. Tabaka kalınlıkları kullanılacağı yere göre değişir.
- Priz sırasında sıcaklık etkisiyle deforme olmaması için donatı yüzdesi, beton kesitin en az % 0.8-0.9'u oranında olmalıdır. Tabaka ortasına konulan boyuna donatıya bağlı enine donatı ile birlikte tabaka üst yüzeyindeki çatlak genişlikleri 0.5 mm ile sınırlandırılabilmekte, böylece donatı korozyonu önlenebilmektedir.
- Traverssiz yapılan tiplerde çatlakların, tabaka içine ray bağlantısı yapmak amacıyla açılan deliklerin, yerleştirilen dübel veya civataların bulunduğu yerlere ulaşmamaları için çatlak oluşumu kontrol altında tutulmalıdır. Bunu sağlamak üzere, beton son sertliğine ulaşmadan önce, üst yüzeyinde yaklaşık her üç mesnette bir, mesnetlerden sonra yaklaşık 5 cm derinliğinde ve 2-3 cm genişliğinde yarıklar oluşturulur.
- Beton taşıma tabakası üzerinde araçların seyredebilmesi için, beton kalitesi en az C20, karakteristik basınç dayanımları ise, silindir basınç dayanımı 20 N/mm², küp basınç dayanımı 25 N/mm² olması gerekir, (küp kenar uzunluğu 20 cm, silindir çapı 15 cm, yüksekliği 30 cm).
- Balastsız üstyapıda taşıyıcı beton plağın emniyet gerilmesi öncelikle betonun dozajına bağlıdır. Bu tip üstyapıda 350 dozlu beton kullanımı önerilmekte ve eğilme-çekme mukavemeti 550 N/cm² olarak ölçülmektedir. Kış aylarındaki çekme gerilmeleri dikkate alınarak, bu değerin % 40'ı alınmalıdır.
- Bazı balastsız üstyapılarda donmaya karşı koruyucu olarak teşkil edilen plastik köpüklü beton tabakada 100 N/cm² lik bir eğilme-çekme mukavemeti saptanmış olup, emniyet gerilmesi olarak 50 N/cm² olması istenir.
- Plastik köpük ızalasyonlu beton tabakada elastikiyet modülü 100.000 N/cm² olarak ölçülmüştür.
- Çimento enjeksiyonu ile sertleştirilmiş ve taşıma gücü artırılmış tabakada ise çekme mukavemetinin 150 N/cm² ye kadar ulaştığı tesbit edilmiştir. Sertleştirilmiş taşıyıcı tabakada çekme mukavemetinin yarısı yani 75 N/cm² kabul edilir. Bu tabakada elastikiyet modülü ise çimento enjeksiyon miktarına bağlı olarak 600.000 - 800.000 N/cm² arasında değerler almaktadır [2].

Altyapı çökmelerini önlemek için, taban zeminin özelliklerine, iklim ve çevre koşullarına, trafik yüklerine ve kullanılacak beton döşemeli üstyapı tipine bağlı olarak taşıma tabakası altında hidrolik ya da bitümle bağlı koruma tabakası gerekir. Hidrolik koruma tabakasının elastisite modülü $1.000.000 \text{ N/cm}^2$ ve basınç gerilmesi $500-600 \text{ N/cm}^2$ arasında olmalıdır. Tipik yüksekliği 30 cm ve genişliği 3,8 m'dir. Doğal veya kırma kum, 110 kg/m^3 dozajındaki portland çimentosu ile karıştırılarak yol finişeri ile serilir.

Dona karşı hassas zeminlerde don kabarması ile hat doğrultusu bozulmaktadır. Bunun için hidrolik koruma tabakasının altına ısı yalıtımı sağlayacak bir tabaka eklenir. Karayolu yapım deneyimlerine dayanılarak en iyi ısı yalıtımı sağlayan ve taşıyıcı olan tabaka strafor beton ya da sert köpük plakalar yerleştirilebilir [5]. Dona karşı emniyetli bir yapım için karayoluna nazaran bu değerlerin 0.15-0.20 m kadar büyütülmesi tavsiye edilir, don kabarması oluşması ancak böyle önlenebilir. İnce çakıl içeren bu tabaka suyun hızlı bir şekilde uzaklaşmasını sağlayarak donma-kabarma olayını önler. Geçirgenlik katsayısı $1-10 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ arasında olması gereklidir. Elastisite modülü E_{v2} yeni hatlarda en az 120 Mpa, poz yapılan hatta 100 Mpa olması istenir.

Balastsız hatlarda 50 m ara ile 6 m derinliğe kadar zemin etüdüleri yapılmalıdır. Zeminin elastisite modülünün Alman Demiryollarına göre yeni hatta 120 Mpa ve iyileştirilmiş hatta 45 Mpa olması gereklidir. Bunun için zemin kireç ve çimento ile iyileştirilir ve 3 m derinliğe kadar sıkıştırılır [2].

3. BALASTLI VE BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Klasik demiryolu üstyapısı, balast yatağı içine hat çerçevesinin yerleştirilmesi ile oluşmaktadır. Düşük inşa gideri, kısa yapım süresi, yapım hatalarını düzeltme imkanı, deyer ve geometride değışiklik imkanları balastlı üstyapının çok önemli avantajlarıdır. Ancak balast yatağı demiryolu üstyapısının en zayıf elemanı durumundadır ve en yüksek bakım harcamalarını gerektirmektedir [3].

Yüksek hız hatlarında büyük hat kesimlerinin köprüler, viyadükler veya uzun tüneller içinde döşeniyor olması ve buralarda zaten uygun bir taşıyıcı kaplamanın bulunması, ayrıca daha küçük taşıyıcı sistem kesiti ve daha az tünel gabarisi gerektirmesi gibi nedenler de balast bakım maliyetine eklenince, yüksek hız hatlarının yapımı ve planlanmasında balast yatağı yerine beton tabaka veya plak gibi bir taşıyıcı konstrüksiyon kullanmayı teşvik etmiştir.

Balastsız üstyapı, sanat yapılarının dışında kalan kesimlerde de fazla bakım gerektirmediğinden kent içi raylı sistemler olan metro, hafif metro ve tramvay hatlarında da kullanılmaktadır.

Bakım işlerinin kentlerde mevcut trafikte yapılmasının, hem güç hem de çok masraflı olduğu, ayrıca trafiğı aksattığı açıktır. Bundan dolayı genellikle hat bakım çalışmaları gece saatlerinde yapılmaktadır. Birçok demiryolu kurumunda gece bakım çalışma süresi 5 saat civarındadır. Bazı hatlarda gece de işletme seferleri yapıldığı için bakım süresi devamlı azalmaktadır. Yüksek hızlı hatlardaki deneyimler, balastlı hatların bakım ihtiyacının zaman ve maliyet açısından balastsız hatlara göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu nedenlerden dolayı, çok az bakım gerektiren balastsız hatlara talep artmaktadır.

3.1. Balastlı ve Balastsız Üstyapı Uygulamalarının Karşılaştırılması

Mevcut demiryollarının çoğı, balastlı üstyapı tipi şeklindedir, ancak son zamanlarda balastsız üstyapı uygulamaları daha ağırlık kazanmaktadır. Balastsız hattın en önemli

avantajı bakım ihtiyacının fazla olmaması ve bunun yanısıra üstyapı yüksekliği ile ağırlığının azalmasına bağlı olarak sağladığı kesit ve gabari azalmalarıdır. Daha küçük kesitli sanat yapıları ise estetik görünüşün yanısıra inşa maliyetinde de önemli düşüş sağlamaktadır.

Ayrıca uygun balast malzemesinin bulunamaması, balast tozlarının çevreye yayılmasını önleme isteği, elektriklelendirmede gabari açısından sağladığı avantaj, balast taneciklerinin araca ve üstyapıya çarparak zarar vermesi, balastta dever yüksekliğini muhafaza etmedeki sıkıntılar gibi nedenlerle de balastsız üstyapı tercih edilmektedir. Köprüler dahil toprak gövdede yeni yapılan ya da ıslah edilen hatlarda, tren hızları 200 km/saat ve üzerinde olan hatlarda veya trafiği çok yoğun hatlarda (80-100 tren/gün/yön) balastsız üstyapı uygulaması düşünülmelidir [6]. Balastsız teknoloji, uzun vadede hat pozisyonunun değişmeyeceğini, yüksek hızlı trafikten kaynaklanacak büyük yükler altında dahi yüksek kalite, fonksiyonellik ve güvenlik düzeyini garanti eder. Balastsız hattın kurulumu esnasında mm derecesinde titizlik gösterilmesi yüksek sürüş konfor düzeyinin ve daha az yük uygulanmasının temelini oluşturur.

Balastsız üstyapı uygulamasının servis ömrü balastlı hatta göre daha uzundur. Balastsız hat araçların 250 km/sa ve üzeri hızlarda emniyetle seyredebilmesine olanak verdiği gibi yüksek yanıl direnç sağladığı için balastlı hatta göre daha büyük dever uygulama imkanı da sağlar. Alınan özel önlemlerle, trafik kaynaklı vibrasyon seviyesinin düşürülmesi ve bundan dolayı araca daha az kuvvetin etkimesi, daha az tekerlek yükü dalgalanmaları ise balastsız üstyapının diğer avantajlarındanır.

Günümüzde dünyanın birçok ülkesinde avantajları nedeniyle balastsız hat benimsenmiştir. Balastsız hat özellikle tünellerde uygundur çünkü tünellerdeki taban kaplamaları yeterli dayanıma sahip olduğundan, üstyapı taşıma tabakasının kalınlığı 15cm'ye kadar düşürülmektedir. Balastsız üstyapıda yapı yüksekliğinin az olması, tünel kesitini küçültür ve dolayısıyla yapım maliyetlerini azaltır. Daha alçak yapı yüksekliği nedeniyle de daha büyük bir açık hava profili elde edilir, yani özellikle iki tren karşılaştığında oluşan hava direnci büyük ölçüde azalabilir. Diğer avantajları balastlı hatlarda bakım sırasında tünel içinde oluşacak toz ve kirlenmeden kaçınılması ve yüksek hızlı trenlerin altında oluşan girdap etkisiyle balast taşlarının yukarı savrulmasıyla taşıta çarpma tehlikesinin bulunmamasıdır. Aynı zamanda uzun tünellerin

içinde, balastlı üstyapıda gerekli üstyapı bakım çalışmaları nedeniyle oluşan işletme engellemeleri ortadan kalkmakta veya en alt seviyeye inmektedir.

Viyadük ve köprülerde, balasttan gelen yükün azalmasıyla daha ekonomik, daha ince, daha zarif bir görünüşe sahip yapılar elde edilmektedir.

Örneğin; küçük yarıçap ve keskin eğimlerde balastsız hat teknolojisi, yüksek hızlı sistemler için güzergahın belirlenmesinde balastlı hatlara göre jeomorfolojik açıdan daha fazla uyum gösterir. Bu ihtimaller yapım maliyetinin düşmesinde etkilidir.

Gelişmiş kurulum teknolojisi, şantiye alanına ulaştırılmasında sofistike ve zamanında bir lojistik ve yüksek verimlilikteki bir proje yönetimi kaliteyi garanti altına alan hızlı bir hat yapımının olmazsa olmazlarıdır.

3.2. Balastlı ve Balastsız Üstyapıda Bakım Çalışmaları Açısından Farklılıklar

Demiryolu hatlarına geometrik bozuklukları düzeltmeye yönelik olan geometrik bakım, mekanik özellikler açısından yapılan mekanik bakım olmak üzere iki çeşit bakım uygulanır. Mekanik bakım sadece gerekli kısımların (ray, travers, bağlantı elemanı vb.) değiştirilmesi ile yapılan bakımdır ve geometrik bakımlara kıyasla 1/5-1/15 sıklığında uygulanır.

Balastlı üstyapıda geometrik bozulmalar trafik yükleri, hava koşulları ve altyapı sorunlarından dolayı meydana gelmektedir ve oluşan bozulmaları tamir çalışmaları, buraj, tokmaklama veya dinamik stabilizatör ve regülatör makinalarından oluşan makinalı bir ekip ile yapılır. Nivelman, dever ve dresaj bozukluğunu düzeltmek için ise dresaj ekipmanlı buraj makinaları kullanılmaktadır.

Balastsız üstyapının en önemli avantajı ise yok denecek kadar az bir bakım ile en az 60 yıl hizmet ömrü sağlayarak, yüksek hızlı işletimler için büyük bir uygunluk ve maliyet açısından tartışmasız en verimli sonucu sunmasıdır.

Her iki üstyapıda da balast eleme ve geometrik bakım dışında ortak olarak malzeme bakımı, makas bakımı, hat kontrolü, ölçümü ve hat temizliği gibi rutin bakımlar ile ray taşıma yapılır ve bunların gerektirdiği bakım periyotları iki üstyapı için de aynıdır.

Almanya'da ana hatlarda 25-28 MGT (milyon gros ton) trafik yükü geçtikten sonra geometrik bakım yapılmaktadır. Hollanda Demiryollarına göre genel olarak 10 yılda

bir balast elemesi yapılmalıdır ve eleme sonrası % 13 balast takviyesi yapılmalıdır [7].

Yıllık trafik yükü ortalama 12 MGT olan İstanbul Aksaray-Yenibosna balastlı hattındaki bakım deneyimlerine göre, her iki yılda bir buraj makinesi ile geometrik bakım ve taşıma çalışması yapılmalıdır. Ayrıca ortalama olarak 9-10 yılda bir balast elemesi yapılmalıdır.

3.3. Balastlı ve Balastsız Hatlarda Üstyapı Maliyetleri

Balastsız teknoloji, ilk yatırım aşamasında klasik balastlı yapılara göre yaklaşık olarak % 20 ile % 40 arasında daha pahalıdır. Bu tartışmalar, kısa ve orta dönemli finans planlamalarında karar verici rol oynamaktadır. Ancak, bu yaklaşım balastsız sistemlerin artan ömürlerini, azalan bakım maliyetlerini ve toplamda yeni yapılan bir hattaki maliyet açısından pozitif yönlerini gözden kaçırmaktadır. Yeterince iyi değerlendirildiğinde uzun vadede balastsız teknolojinin ekonomik açıdan da daha mantıklı ve çekici bir seçenek olduğu gerçeği görülecektir.

Hattın işletmeye açılmasıyla ilk yenileme çalışması arasındaki süreye, hattın servis ömrü denilmektedir. Daha önce, yapılacak yeni bir projede yatırım maliyetleri en önemli karar verme kriteri olurken, günümüzde birçok ülkede “life cycle cost” yani servis ömrü süresince maliyet analizleri yapılmakta ve bu analizlerde ilk yatırım maliyetiyle birlikte projenin ekonomik ömrü boyunca ortaya çıkabilecek maliyetler de dikkate alınmaktadır. Demiryolu projelerinde yapım maliyetleri ile birlikte servis ömrü boyunca yapılan kontrol, ölçüm, bakım ve tamirat çalışmalarının maliyetleri bu analizlerde dikkate alınmaktadır.

Her iki üstyapının yapım ve bakım maliyetleri, net bugünkü değer analizine göre karşılaştırılmalıdır. Net bugünkü değer analizinde gelecek yıllardaki maliyetler, bugünkü değere dönüştürülür. İlk maliyeti eklenerek projenin başlangıcındaki “net bugünkü maliyet” hesaplanır ve alternatifler arasında net bugünkü maliyeti düşük olan tercih edilir.

Demiryolu yapıları üzerinde yapılan maliyet analizlerinde, ‘eşdeğer yıllık maliyetler’ de karşılaştırılmaktadır. Eşdeğer yıllık maliyet; hesaplanan net bugünkü maliyete göre hattın servis ömrü boyunca sabit kabul edilen yıllık maliyetlerdir [3].

$$\text{Net Bugünkü Değer} = c \times [1/(1+r) + 1/(1+r)^2 + \dots + 1/(1+r)^n] \quad (3.1)$$

Burada c : yıllık maliyet, r : yıllık faiz yüzdesi, n: yıl sayısıdır.

Raylı taşıma plaklarının klasik balastlı hatlara göre mali açıdan daha verimli olduğu belirlendiğinden bu konuda yeni ve daha gerçekçi bir bakış açısı önem kazanmış ve geçerlilik görmüştür. Trafik altyapı projelerinin işletiminde ve yapımındaki alternatif finansal oluşumların ve proje yapılarının artması, hizmet ömrü-maliyet çalışmalarını da içeren daha kapsamlı yaklaşımların ortaya konulmasına katkı sağlamıştır. Bu çalışmaların fikir oluşumunda ve karar verme aşamasında büyük bir etkinliği vardır. Balastsız teknolojinin mühendislik açısından avantajlarına ilaveten ekonomik açıdan pazardaki potansiyeli de gittikçe artmaktadır. Sistemi bir bütün olarak ele alan büyük ve yeni yapılacak raylı ulaşım projeleri için yapılan uzun vadeli analizlerde, klasik balastlı yapıya karşı balastsız teknolojiyi savunanların haklı çıkacağı açıktır.

15 ile 30 yıl arasında değişen periyotlarda yürütülen uzun dönemli ömür döngüleri çalışmalarında ortaya çıkmıştır ki yeni yapılan bir hat için balastsız hattın ilk baştaki fazla yatırım maliyeti sistemin hizmet ömrü sürecinde önleyici bakım maliyetlerini azaltarak kendisini fazlasıyla amorti etmektedir.

Tecrübeler göstermiştir ki, hattın sadece kendisi için olan maliyet, toplam maliyetin % 10'undan daha azdır. Harcamaların 2/3'ü kadarı klasik hafriyat işleri ve tünel, köprü gibi diğer inşaat işlerine harcanmaktadır. Yatırımın yaklaşık olarak 1/4'ü elektrik gücünün sağlanması ve sinyalizasyon için gerekmektedir. Balastsız hat teknolojisi, daha önce de bahsedildiği gibi küçük çaplı kurplar ve dik eğimlerle daha düz bir güzergah oluşturabildiği için daha az inşaat işleri gerektirmektedir. Son analiz olarak, kısa tünel ve alçak köprüler (balastsız sistemin düşük yapısal yükseklikleri sayesinde) daha az inşaat maliyeti demektir. Balastsız sistemin yapımındaki fazla maliyet ise hattın kendisinin ve altyapısının zaman içindeki kazanımları ile dengelenir. Bazı durumlarda bu kazanımlar, hattın ilk yatırım maliyetinden bile çok olmaktadır.

Hollanda'da Amsterdam ile Hazeldonk arasında 100 km'lik ve 300 km/sa hızlı HSL-Zuid yüksek hız hattının çoğu bölgesinde zemin çok zayıf olduğu için alçak viyadüklerin uygulanmasına ve viyadükte mevcut taşıyıcı beton tabakanın üstüne 36 cm'lik balastsız üstyapı yapılmasına karar verilmiştir. Üstyapı tipine karar verilirken, Delft Teknoloji Üniversitesinde birkaç üstyapı tipi arasında maliyet karşılaştırması

yapmak için sadece üstyapı maliyetleri hesaba katılarak servis ömrü boyunca maliyet analizi (life cycle cost analysis) yapılmıştır. Viyadüğe gelen balast yükünün ve üstyapı yüksekliğinin azalması gibi balastsız üstyapının bazı avantajları analize alınmamıştır (Çizelge 3.1). Karşılaştırmaya alınan üstyapı tipleri; yüksek hız taleplerine uygun balastlı hat, Rheda tipi üstyapı, beton taşıma tabakasına gömülü ERS INT (embedded rail structure) ve taşıma tabakasına gömülü olmayan ERS NI'dır.

Çizelge 3.1: Bazı üstyapıların yapım ve eşdeğer yıllık maliyetleri.

Üstyapı Tipi	Yapım Maliyeti (€/m)	Eşdeğer Yıllık Maliyet (€/m)
ERS NI	1200	90
ERS INT	910	80
Rheda	1270	100
Balastlı	1000	110

Analiz sonucunda, balastsız üstyapı alternatiflerinin hepsinin eşdeğer yıllık maliyetlerinin balastlı hat maliyetinden önemli ölçüde az olduğu ortaya konmuştur.

3.4. Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro Hattının Üstyapı Maliyet Analizi

Aksaray-Yenibosna hafif metro hattının bir uzantısı olan Yenibosna-Havaalanı hattının projesinde balastlı ve balastsız üstyapı alternatifleri arasında bir karşılaştırma yapılmış ve balastsız üstyapıya karar verilmiştir. Bu proje 1792 m uzunluğunda ve çift hatlı olup, hattın % 92'si viyadükten ve tünelden oluşmaktadır. Doğrudan beton üzerine oturan üstyapıda selet ile beton taban arasına (yay katsayısı 28×10^6 N/m) 10 mm kalınlığında elastomer yerleştirilmiştir. Rayın altına yerleştirilen ped ise daha serttir, (yay katsayısı $500-600 \times 10^6$ N/m). Balastsız üstyapıda beton kirişler üzerine oturan raylarda Vossloh-336 elastik bağlantı sistemi kullanılmıştır. Çalışmada bakım maliyetlerinin sabit olduğu, yani hatta herhangi bir trafik değişiminden vb. dolayı bakım sıklığının dolayısıyla bakım maliyetlerinin değişmediği kabul edilmiştir.

Çalışmada, Yenibosna-Havaalanı hattının yapım ve bakım çalışmaları maliyetlerinin net bugünkü değerleri hesaplanmıştır. Hattın servis ömrünü, hattın en önemli elemanı olan ray belirlediği için, S49 rayın kullanıldığı hattın servis ömrü 36 yıl olarak kabul edilmiştir. Geometrik bakım periyodu 2 yıl ve balast eleme periyodu 9 yıl olarak alınmıştır. Bu kabule göre, hattın 36 yıllık servis ömrü boyunca 17 defa geometrik bakım yapılacaktır.



Şekil 3.1: Yenibosna-Havaalanı arası balastsız üstyapı.

Balastsız üstyapı yapım maliyeti Ek A.1 ve Ek A.2 den hesaplanacak olursa;

Malzeme maliyeti = 1.228.195,99 \$

İşçilik maliyeti = 109.693,67 \$

Toplam yapım maliyeti = 1.337.889,66 \$

1 km balastsız üstyapı yapım maliyeti = $1.337.889,66 / 3.584 = 373.295,11$ \$ dir.

Balastlı üstyapı yapım maliyeti Ek A.3 ve Ek A.4 den hesaplanacak olursa;

Malzeme maliyeti = 896.990,83 \$

İşçilik maliyeti = 301.847,70 \$

Toplam yapım maliyeti = 1.198.838,53 \$

1 km balastlı üstyapı yapım maliyeti = $1.198.838,53 / 3.584 = 334.497,36$ \$ dir.

Bakım makinelerinin çalışma maliyeti (\$/gün) ise makine maliyeti ve operatör maliyeti toplamıdır. Burada makine maliyeti ise amortisman, malzeme ve diğer maliyetlerden oluşmaktadır. Demiryolu bakım makinelerinin servis ömrü 15 yıl

kabul edilmekte olup, bir yılda hava şartlarından ve arızalardan dolayı ortalama 130 gün çalışabilirler. Yani makinenin servis ömrü $15 \times 130 \approx 2.000$ gündür.



Şekil 3.2: Vossloh-336 bağlantı sistemi.

Çizelge 3.2: Hat bakım makinelerinin günlük amortisman maliyetleri.

Makine	Makine Bedeli* (\$)	Makine Servis* Ömrü (gün)	Amortisman maliyeti (\$/gün)
Buraj Makinesi	780.000	2.000	390,00
Balast Eleme Makinesi	2.250.000	2.000	1.125,00
Balast Tokmaklama Makinesi	535.000	2.000	267,50
Balast Regülatörü Makinesi	535.000	2.000	267,50
Ray Taşlama Makinesi	2.120.000	2.000	1.060,00

*Değerler İstanbul Ulaşım A.Ş.'den alınmıştır.

Bakım makinelerinin malzeme maliyeti yakıt, yağ, üstüğü maliyetleri oluşturur. Bakım makinelerinin bir saat içinde harcadıkları mazot miktarı, motor gücünün 0,15 katı alınarak bulunur. Mesela, 225 BB motor gücündeki bir buraj makinesi 1 saat içinde $225 \times 0,15 = 33,8$ lt mazot harcamaktadır. Makinelerin periyodik bakımlarında kullanılan yağ, üstüğü, benzin gibi sarf malzemeleri yakıt miktarının % 20'si kadardır. Yağ ve benzin malzemelerinin birim maliyeti de yakıt ile aynı alınır. Bu giderlerle beraber yakıt maliyetleri % 20 artmaktadır. Yani bir saatlik çalışma için harcanan toplam malzeme miktarı motor gücünün $0,15 \times 1,2 = 0,18$ katı alınarak bulunur. Bu çalışmada bakım çalışmalarının 4 saatlik bir aralıkta yapıldığı kabul edilmiştir.

Malzeme miktarı (lt/sa) = Motor gücü (BB) x 0,18

Malzeme maliyeti (\$/gün) = Malzeme miktarı (lt/sa) X Birim Maliyet (\$/lt) x 4
(sa/gün)

Mazotun birim maliyeti= 2,17 \$/lt

Ray taşlama makinesinin mazot, yağ, üstüğü dışında taşlama taşları da malzeme maliyetine girmektedir. Sekiz taşlı taşlama makinesinin her günkü çalışması için taşları değiştirilir. Bir adet taşın maliyeti 15 \$ olduğuna göre, bir günlük çalışma için 8 taşın malzeme maliyeti 120 \$ olur.

Çizelge 3.3: Makine malzeme maliyeti.

Makine	Motor Gücü* (BB)	Malzeme Miktarı (lt/sa)	Malzeme maliyeti (\$/gün)
Buraj Makinesi	225	40,5	351,50
Balast Eleme Makinesi	180	32,4	281,20
Balast Tokmaktama Makinesi	213	38,3	332,40
Balast Regülatörü Makinesi	400	72,0	625,00
Ray Taşlama Makinesi	180	32,4	401,20

*Değerler İstanbul Ulaşım A.Ş.'den alınmıştır.

Makinelerin tamir ve bakımı ile ilgili yedek parça, işçilik, sigorta gibi giderler diğer giderleri oluşturur. Makinenin diğer giderleri bir saatlik çalışmaları için makine bedelleriyle belli bir katsayı çarpılarak bulunur. Bu katsayı ağır iş makineleri için Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın genel fiyat analizinde 0,000179 olarak verilmiştir.

Diğer Maliyetler (\$/gün) = Makine Bedeli x 0,000179 x 4 (sa/gün).

Çizelge 3.4: Makine diğer maliyeti.

Makine	Makine Bedeli* (\$)	Diğer Maliyetler (\$/gün)
Buraj Makinesi	780.000	558,50
Balast Eleme Makinesi	2.250.000	1.611,00
Balast Tokmaktama Makinesi	535.000	383,10
Balast Regülatörü Makinesi	535.000	383,10
Ray Taşlama Makinesi	2.120.000	1.517,90

*Değerler İstanbul Ulaşım A.Ş.'den alınmıştır.

Makine maliyeti bütün bu maliyetler toplamıdır (Çizelge 3.5).

TCDD makine operatörleri işçi sınıfına girdikleri için aylık maaşlarının dışında ikramiye, çalışma tazminatı, sosyal hakları vardır ve bunlarla beraber aylık maliyetleri maaşlarının iki katı olmaktadır. TCDD operatörlerinin aylık maaşları 1.040 TL (684,20 \$) olduğuna göre aylık maliyetleri 1.368,40 \$ olur. Bir ay içinde hafta sonu tatilleri çıkarıldığı zaman 22 iş günü kalmaktadır.

Operatör maliyeti (\$/gün) = Operatör sayısı x Operatör aylık maliyeti/ 22 (gün/ay)

Çizelge 3.5: Makine maliyeti.

Makine	Amortisman maliyeti (\$/gün)	Malzeme maliyeti (\$/gün)	Diğer Maliyetler (\$/gün)	Makine Maliyeti (\$/gün)
Buraj Makinesi	390,00	351,50	558,50	1.300,00
Balast Eleme Makinesi	1.125,00	281,20	1.611,00	3.017,20
Balast Tokmaklama Makinesi	267,50	332,40	383,10	983,00
Balast Regülatörü Makinesi	267,50	625,00	383,10	1.275,60
Ray Taşlama Makinesi	1.060,00	401,20	1.517,90	2.979,10

Çizelge 3.6: Operatör maliyeti.

Makine	Operatör Sayısı	Operatör * Maliyeti (\$/gün)	Toplam Operatör Maliyeti (\$/gün)
Buraj Makinesi	3	62,20	186,60
Balast Eleme Makinesi	2	62,20	124,40
Balast Tokmaklama Makinesi	2	62,20	124,40
Balast Regülatörü Makinesi	2	62,20	124,40
Ray Taşlama Makinesi	2	62,20	124,40

*Değerler İstanbul Ulaşım A.Ş.'den alınmıştır.

Bu durumda makine maliyeti ve operatör maliyeti toplamı olan makine çalışma maliyeti şu şekilde olur.

Çizelge 3.7: Makine çalışma maliyeti.

Makine	Makine Maliyeti (\$/gün)	Toplam Operatör Maliyeti (\$/gün)	Makine Çalışma Maliyeti (\$/gün)
Buraj Makinesi	1.300,00	186,60	1.486,60
Balast Eleme Makinesi	3.017,20	124,40	3.141,60
Balast Tokmaklama Makinesi	983,00	124,40	1.107,40
Balast Regülatörü Makinesi	1.275,60	124,40	1.400,00
Ray Taşlama Makinesi	2.979,10	124,40	3.103,50

Makineli bakım çalışmaları, bir ekip şefinin sorumluluğu altında bir ekip tarafından yapılmaktadır. Operatörlerin dışında bu ekipte bulunan eleman sayısı şöyledir:

-Ölçüm ekibi: Buraj makinesinin önünde ray nivosu ile ölçümleri yapan ve ölçüm değerlerini rayın üstüne yazan bir ekiptir. Ekipte iki işçi ve bir sürveyan görev alır.

-Bakım ustaları: Makinenin bakım ve arızaları ile ilgilenen bir motor, bir elektrik, bir elektronik ve bir de mekanik olmak üzere toplam 4 eleman çalışır.

-Bakım işçileri: Ekip şefinin verdiği işleri yapan 4 işçi bulunmaktadır.

Toplam ekip sayısı dört usta, 6 işçi, bir sürveyan ve bir ekip şefinden oluşmaktadır.

Bakım ustaları ve işçilerin ikramiye ve diğer sosyal hakları ile beraber aylık maliyetleri maaşlarının iki katı olur.

Çizelge 3.8: Bakım çalışması işçilik maliyeti.

Elemanın Ünvanı	Maliyet* (TL/ay)	Eleman Sayısı	İşçilik Maliyeti (TL/gün)
Usta	2.535,00	4	460,91
İşçi	2.223,00	6	606,27
Sürveyan	972,00	1	44,18
Ekip Şefi	1.365,00	1	62,05
İşçilik Maliyeti	1.173,41 TL/gün (771,98 \$/gün)		

*Değerler İstanbul Ulaşım A.Ş.'den alınmıştır.

Balastlı ve balastsız üstyapılarda, periyodik olarak yapılan rutin bakımlar için iki maliyet kalemi vardır; bunlar işçilik maliyeti ve malzeme maliyetidir. Malzeme maliyetini balastlı ve balastsız hatlarda 9 yılda bir değiştirilecek olan ray altı plastik seletler oluşturur. Bir yıl içinde 3 işçinin 10 km lik bir hattın rutin bakımını yapabildiğini düşünürsek, 1 km hat için 0,3 adam gerekli olduğunu söyleyebiliriz. Yukarıdaki çizelgeden işçilik maliyetini 2.223,00 TL/ay yani 1.462,50 \$/ay ve yıllık maliyetini $12 \times 1.462,50 = 17.550,00$ \$/yıl alabiliriz. Bu durumda 1 km lik hattın rutin bakımının toplam işçilik maliyeti $0,3 \times 36 \times 17.550,00 = 189.540,00$ \$ dır.

Travers aralığı 60 cm olan 1 km hatta 1.666 adet travers vardır ve her traverste iki adet ray altı seleti olduğu için, toplam $2 \times 1.666 = 3.332$ adet ray altı plastik selet vardır. Bir plastik seletin maliyeti 0,67 \$ olduğuna göre, 1 km hattın ray altı plastik selet maliyeti $0,67 \times 3.332 = 2.232,44$ \$ olur. Hattın servis ömrü boyunca 9, 18 ve 27. yıllarda balast eleme çalışmasından önce ray altı seleti değiştirilir. Buna göre toplam servis süre boyunca toplam malzeme maliyeti şöyle bulunur:

1 km hattın toplam malzeme maliyeti = $3 \times 2.232,44 = 6.697,32$ \$

Toplam Rutin Bakım Maliyeti = Toplam İşçilik Maliyeti (\$/km) + Toplam Malzeme Maliyeti (\$/km)

Toplam Rutin Bakım Maliyeti = 189.540,00 + 6.697,32 = 196.237,32 \$/km.

Balastlı hatta her iki yılda bir periyodik olarak balast hacminin % 4'ü kadar balast takviyesi yapılmalıdır. Her 9 yılda bir yapılan balast eleme çalışmasından sonra ise % 13 kadar balast takviyesi yapılmalıdır. TCDD'de bir hattın balast miktarı ortalama 2 m³/m ile hesap edilir. Buna göre 1 km lik bir hat için iki yılda bir 1000 x 2 x 0,04 = 80 m³ ve 9 yılda bir 1000 x 2 x 0,13 = 260 m³ balast takviyesi yapılmalıdır.

TCDD'nin balast ikmalinde kullandığı birim fiyat tarifine (poz no: 33.004 kazı taşından konkasörle balast hazırlanması ve hat boyunca fiğüre edilmesi) göre balastın hazırlanması, vagonlara yüklenmesi, iş yerine nakli, boşaltılması ve hatta döşenmesi işinin m³ maliyeti 30,57 TL (20,11 \$) dır (2007 yılı birim fiyatına göre).

Her iki yılda bir yapılan balast takviye maliyeti = 80 x 20,11 = 1.608,80 \$/km

Her 9 yılda bir yapılan balast takviye maliyeti = 260 x 20,11 = 5.228,60 \$/km

Toplam balast takviye maliyeti = 43.035,40 \$/km

Geometrik bakım çalışması, tüm hat geometrisinin düzeltilmesi ve balast yatağı stabilitesinin tekrar sağlanması için yapılan bir çalışmadır. Balast takviyesinden sonra buraj, tokmaklama ve regülatör makinelerinin oluşturduğu bir dizi halinde geometrik bakım yapılır. Geometrik bakım çalışması periyodik olarak 2 yılda bir yapılması gerekir.

Ortalama 4 saatlik bir bakım zamanı içinde buraj, tokmaklama ve regülatör makineleri net 3 saat çalışarak 1 km hattın geometrik bakımını yaparlar.Yani 1 km hattın makine çalışma maliyeti Çizelge 3.7 deki makinelerin günlük çalışma maliyetlerine eşittir. Üç makinenin çalışma maliyetleri toplamı 3.994 \$/km olur. Bir km hattın geometrik bakımı için ekibin bir günlük mesaisi gitmektedir. Çizelge 3.8 e göre bakım ekibinin günlük işçilik maliyeti 771,98 \$/gün dür.

Bir geometrik bakımın maliyeti (\$/km) = Makine çalışma maliyeti (\$/km) + İşçilik maliyeti (\$/km)

Bir geometrik bakımın maliyeti = 3.994 + 771,98 = 4765,98 \$/km.

Hattın 36 yıllık servis ömrü boyunca 17 defa geometrik bakım yapılacaktır. Buna göre toplam geometrik bakım maliyeti 17 x 4765,98 = 81.021,66 \$/km olacaktır.

Balastlı hatta her iki yılda bir yapılan geometrik bakımdan sonra ray kusurlarını temizlemek ve ray profilini yeniden sağlamak için ray taşlaması yapılmalıdır. Ray

taşılama makinesi bir gecede 1 km hattın rayını taşlamaktadır. Ray taşılama makinesinin günlük çalışma maliyeti 3103,50 \$/gün dür. Toplam servis ömrü boyunca 17 kez taşılama yapılacağına göre, toplam ray taşılama maliyeti 52.759,50 \$/gün olacaktır.

Balast eleme maliyeti ise balast eleme makine maliyeti, işçilik maliyeti ve buraj makinesi çalışma maliyeti toplamından oluşmaktadır. Balast eleme makinesinin çalışma hızı ortalama 90-110 m/saat'tır. Makinenin çalışmaya hazırlanması ve toplanması için 1,5 saat gerekmektedir. 4 saatlik bir bakım süresi içinde net 2,5 saat çalışabilir. Ortalama 100 m/saat çalışma hızı ile bir günde 250 m kadar balast eleme yapılabilir. 1 km hattın elemesi için de 4 gün çalışması gerekir ve bu durumda makine maliyeti $4 \times 3141,60 = 12.566,40$ \$/km dür. Aynı şekilde bu 4 gün için işçilik maliyeti $4 \times 771,98 = 3.087,92$ \$/km olacaktır. Buraj makinesi ise günlük 500 m den 2 gün çalışacaktır ve $2 \times 1486,60 = 2.973,20$ \$/km maliyet tutacaktır. Balast eleme maliyeti bu üç maliyetin toplamı 18.627,52 \$/km olup, servis ömrü boyunca 9, 18 ve 27. yıllarda yapılarak toplamda 55.882,56 \$/km harcanmasına sebep olacaktır.

Balastlı hattın servis ömründe toplam bakım maliyeti, tüm bu çalışmalar değerlendirildiğinde, Çizelge 3.9 da 422.239,12 \$/km çıkmaktadır.

Çizelge 3.9: Balastlı üstyapının toplam bakım maliyeti.

Çalışmanın adı	Maliyet (\$/km)
Rutin bakım	189.540,00
Balast takviye	43.035,40
Geometrik bakım	81.021,66
Ray taşılama	52.759,50
Balast eleme	55.882,56
Toplam	422.239,12

Balastsız üstyapıda ise bakım çalışmaları rutin bakım ve ray taşılaması olup, bakım periyotları ve bakım süreleri balastlı üstyapı ile aynıdır. Bu durumda balastsız hat bakım maliyeti sadece bu iki kalemin toplamı olacaktır.

Balastsız üstyapı bakım maliyeti = $189.540,00 + 52.759,50 = 242.299,50$ \$/km dir.

Yenibosna-Havaalanı hafif metro hattının balastlı veya balastsız olarak yapılması durumunda maliyeti, yapım ve bakım maliyetlerinin toplamı olacaktır.

Çizelge 3.10: Yapım ve bakım maliyetlerinin toplamı.

	Yapım Maliyeti (\$/km)	Toplam Bakım Maliyeti (\$/km)	Toplam Maliyet (\$/km)
Balastlı Üstyapı	334.497,36	422.239,12	756.736,48
Balastsız Üstyapı	373.295,11	242.299,50	615.594,61
Maliyet Farkı	-38.797,75	179.939,62	141.141,87

Çizelge 3.10'a göre balastlı hattın servis ömrü boyunca ortaya çıkan toplam maliyeti balastsız hattan % 23 daha fazladır. Balastlı hattın yapım maliyeti balastsız hattan daha az olmasına rağmen bakım maliyetleri düşünüldüğünde bu fark 8 yılda kapanmaktadır.

3.1 denklemine göre Net Bugünkü Değer = $c \times [1/(1+r) + 1/(1+r)^2 + \dots + 1/(1+r)^n]$ yani $c \times [(1/r) - (1/(r \cdot (1+r)^36))]$ idi.

Ülkemizde yıllık faiz oranı % 9 olarak alınırsa yukarıdaki parantez içerisi 10,612 çıkmakta ve balastlı üstyapı eşdeğer yıllık maliyeti $c = 756.736,48 / 10,612 = 71.309,51$ \$/km, balastsız üstyapı eşdeğer yıllık maliyeti ise $c = 615.594,61 / 10,612 = 58.009,29$ \$/km çıkmaktadır. Yapılan bu analiz balastsız üstyapının, balastlı üstyapıya göre kilometre başına yıllık 13.300,22 \$ tasarruf sağlayacağı sonucunu göstermektedir.

Bu karşılaştırmada, sadece üstyapının yapım ve bakım maliyetleri dikkate alınmıştır. İşletme koşulları (süreklilik, yüksek hız imkanı, konfor vb), çevresel etkiler (gürültü, titreşim, toz vb), ve sanat yapılarının kesitlerine bağlı (viyadük, köprü ve tüneller vb) maliyetler de düşünülerek kapsamlı maliyet analizi yapıldığında, balastsız üstyapının tünel, köprü, viyadük gibi sanat yapılarında daha ekonomik olduğu ayrıntılı biçimde belirlenmiş olacaktır [3].

3.5. Hollanda'daki HSL-Zuid Hattı İçin Değerlendirmeler

Yukarıda özetlenen ve hat sistemi-maliyet açısından gerçekçi bir düşünce yapısının gerekliliğini savunan ifadeler ek olarak ulaşım altyapı projelerinin yapım ve işletimi için alternatif proje yapılarının artan sayı ve çeşitliliği, kalite düşüncesinin daha

büyük bir önem kazanmasını sağlamıştır. Kalite düşüncesi de zaten uzun vadeli düşünmeyle yakından ilişkilidir.

Raylı sistem firmaları, inşaat firmaları ve alt yükleniciler arasındaki projedeki görevlerin analizinde, proje planlaması ve hattın kurulumu aşamasında maliyet ve zaman büyük bir rol oynar. Bu düzenleme ile firmalar yalnızca ray hattının yapımıyla ilgilidir ve daha sonraki işletimle ilgili hiçbir sorumluluk almazlar (Genel garanti zorunlulukları hariç).

Kamu-özel sektör ortaklığına dayalı modeller ve YİD projeleri (YİD = yap, işlet, devret) son yıllarda büyük ulaştırma projelerinde daha fazla kullanılmaya başlamıştır. Bu modeller önemli sorumluluk zincirini daha fazla uzatmıştır.

Bu gelişmeye tipik ve bilgilendirici bir örnek olarak, Hollandadaki HSL Zuid yüksek hızlı hattının yapımında ve işletimindeki proje yapısı gösterilebilir. Bu hat, Avrupanın en büyük ve en önemli kamu-özel sektör ortaklığındaki raylı sistem projelerinden biridir.

HSL Zuid projesi açıkça göstermiştir ki kişisel bir projenin ötesinde uzun vadeli kalite düşüncesini ve kalite sorumluluğunu sağlamlaştıran daha kapsamlı sistem sağlayıcıların bir proje için tüm sorumluluğu alabildiği yeni bir entegrasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Bu düşünce aslında Royal BAM Grup, Almanyanın en büyük inşaat firması ve RAIL.ONE'dan oluşan bir ortak girişim tarafından gerçekleştirilmiştir [8].

Sorumluluğu ürün ve hizmetlerle kısıtlı tutulan bir alt yüklenicinin çabası bir süre sonra sadece projeye odaklı kısa vadeli kalite optimizasyonuna yönelik olacaktır. Ancak uzun vade açısından baktığımızda ise, sistem sağlayıcı sistemini mümkün olduğunca geliştirerek ve mümkün olduğunca deneyim kazanarak bu gelişme ve deneyim ile bir sonraki uygulamada daha fazla kar elde etmeye odaklanacaktır. Mühendisliğin, üretimin ve kalitenin garanti altına alınmasının iç içe olması bir zorunluluğun ötesinde, tüm ortaklar için bir fırsata dönüşecektir.

Proje sorumluluğunda, sistem sağlayıcıları arasındaki bu hassas entegrasyon performansı artırmasıyla birlikte şirketin imajında, projede aldığı rolde bir takım değişiklikler getirir:

- Raylı sistemlerin yapımındaki bu birliktelikte hattın kendisini yapan firma ile inşaat işlerini yapan firma arasında, geleneksel rekabetçi düşüncenin ve birbiri ile kavga halinde zaman kaybetmenin ötesine geçilmelidir. Diğerlerini ikna etme sürecinde,

temel gereksinimlerin belirlenmesinde tek söz sahibi sadece proje ortaklarıyla sınırlandırılmamalı ve yüklenici tarafına da ana sorumluluklar verilmelidir.

- İşbirliği içindeki raylı sistem şirketi, altyapı yöneticileri ve kamu ulaştırma sistemleri bir tarafta, diğer tarafta kendi başarısı için sorumluluğunu yerine getiren ve projeyi yürüten firmalar. Ortalık şeklindeki işbirliği, yüksek bir ihtimalle gelecekte başarıya ulaşmamıza olanak sağlayacaktır.

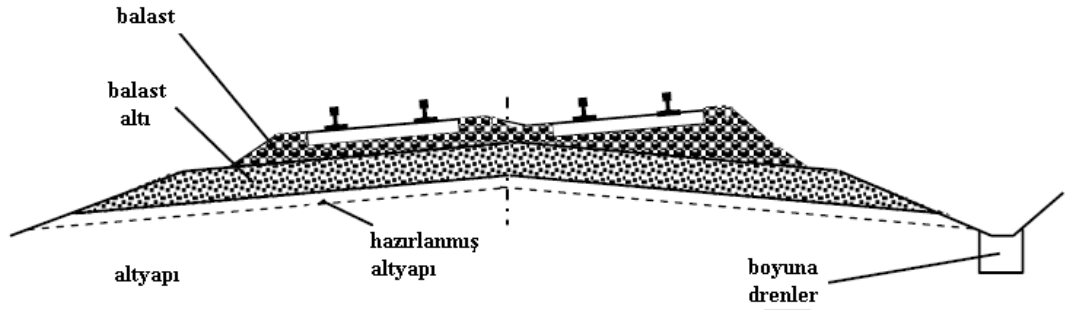
Yeni rol tanımı, endüstrideki şirketler ve raylı sistem ağ işletmecileri arasındaki görev dağılımı sadece özel sektördeki teknik gelişmelerin sorumluluğunun değişmesinde değil bu şirketlerin hat-ağ yönetimindeki rekabetinde de etkili olmuştur.

Son olarak, balastsız hat teknolojisinin yüksek hızlı ve orta hızlı raylı sistemlerdeki uygulamasındaki ana elementler : kapsayıcı bir maliyet analizi ve uzun vadeli kalite sorumluluğudur çünkü son yıllarda alternatif proje yapılarında daha etkili olduğu kanıtlanmıştır.

4. BALASTLI VE BALASTSIZ ÜSTYAPININ TASARIM ÇEŞİTLERİ

4.1. Balastlı Üstyapının Tasarım Çeşitleri

Klasik bir demiryolu hattı, rayların ve traverslerin oluşturdukları yol çerçevesi ile, bu çerçevenin altına döşenmiş balast, balast altı adı verilen kırma taş tabakaları ve bunların altındaki altyapı adı verilen değişik zemin tabakaları ya da köprü, viyadük, tünel vb. sanat yapılarından oluşur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Klasik demiryolu yapısının enkesiti.

Demiryolunun tasarım kalınlıkları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

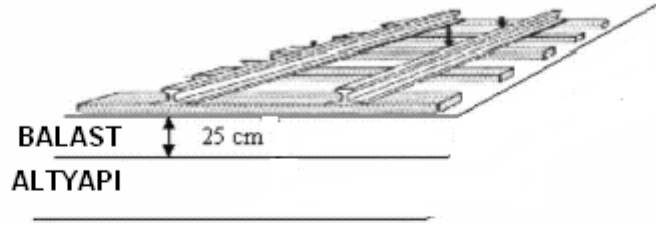
- Altyapıyı oluşturan zeminlerin özgül karakteristikleri (doğal yapısı, taşıma kapasitesi, suya ve dona tepkisi, vb.),
- Bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik koşulları,
- Bölgenin iklim koşulları,
- Statik ve dinamik trafik etkileri (Brüt-ton, dingil yükleri, hızlar),
- Yol kompozisyonu (Ray kesiti, traverslerin tipi ve aralıkları, vb.).

Balastlı üstyapı sadece balast tabakası olarak tasarlanabildiği gibi balast + alt balast olarak da tasarlanabilir. Balast altı tabakası, bir ya da birkaç tabakadan oluşabilir (alt-balast tabakası, dondan koruma tabakası, filtre tabakası).

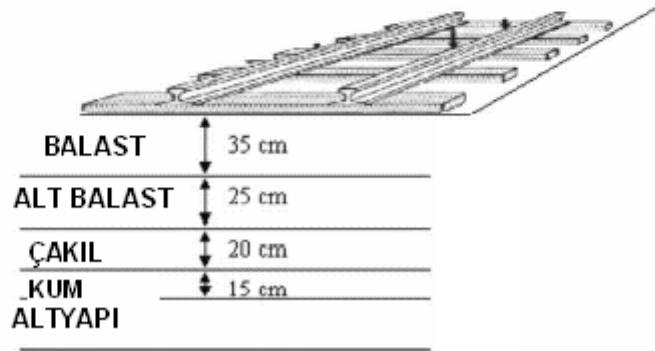
Demiryollarında üç tip travers kullanılmaktadır. Bunlar demir traversler, ahşap traversler ve betonarme traverslerdir. Günümüzde yeni hatlarda ve poz çalışmalarında en çok kullanılan beton traverslerdir ve buna karşın bazı hatlarda ahşap traversler de kullanılmaktadır. Demir traverslerin kullanımı azalmakta ve pozlarda

beton veya ahşap traversler ile değiştirilmektedir, yeni hatlarda ise kullanılmamaktadır. Dünyadaki 3 milyar traversin 500 milyonu beton traversdir.

a) Sadece balastlı tasarım



b) Balast + alt balastlı tasarım



Şekil 4.2: Balastlı üstyapı tasarım örnekleri.

Her hatta en uygun travers tipinin seçimi için aşağıdaki faktörlerin değerlendirilmesi ve hesaplanmasını içeren fizibilite analizleri yapılmalıdır.

- Travers yapım veya satın alma maliyeti
- Traversin ömrü
- Bağlantıların bedeli ve diğer tertibat maliyetleri
- Bakım maliyeti
- Servis ömrü sonundaki hurda maliyeti.

4.2. Balastsız Üstyapının Tasarım Çeşitleri

Günümüzde balastsız hatlar genelde yüksek hızlı hatlarda ve hafif metrolarda kullanılmaktadır. Çizelge 4.1 ve 4.2 de görülen düşük burulma rijitliğine sahip balastsız üstyapı sistemleri, yalnızca zeminin taşıma gücü ve rijitliğine dayanır. Prefabrike veya yerinde dökme beton üstyapılar, eğilme kuvvetine maruz kalabilir.

Yumuşak ve yetersiz zeminlerde öngermeli beton ekstra bir burulma rijitliği sağlar [5].

Çizelge 4.1. Uygulanan balastsız üstyapı sistemleri.

Balastsız Üstyapı Sistemleri					
Aralıklı Desteklenmiş Ray				Sürekli Desteklenmiş Ray	
Traversli veya Bloklı		Traverssiz			
Travers veya bloklar betona gömülü	Traversler asfalt-beton yatağın üstünde	Prefabrik beton plak	Tek parça yerinde dökülen plak	Gömülü ray	Kenetlenmiş ve sürekli desteklenmiş ray
Rheda Rheda 2000 Züblin (düşük titreşimli üsty) LVT	ATD (Beton-asfalt yatak)	Hızlı demiryolunda (Shinkansen Bögl)	Kaplamalı üstyapılarda	Decktrack Hemzemin geçitler LRT	CoconTrack ERL Vanguard KES

Çizelge 4.2. Balastsız üstyapıların burulma rijitlikleri.

Balastsız Üstyapı Tipleri	Burulma Rijitliği	
	Düşük	Yüksek
Travers veya bloklar betona gömülü		
Traversler asfalt-beton yatağın üstünde		
Prefabrik beton plak		
Tek parça yerinde dökülen plak		
Gömülü ray		
Kenetlenmiş ve sürekli yerinde desteklenmiş ray		

Balastsız üstyapılar asfalt-beton yataklı üstyapı, beton plaklı üstyapı ve prefabrik panelli üstyapı olmak üzere 3 ana grupta incelenmektedir [4].

4.2.1. Asfalt-Beton Yataklı Üstyapılar

Traverslerin asfalt-beton bir yol yatağı üzerine yerleştirilme esasına dayanır. Asfalt traverse rijit ve sağlam bir altyapı oluşturduğu için 180 mm'lik bir deyer uygulamada 2 mm'lik bir hasssiyet yakalamak mümkündür. Asfalt-beton yatağın üzerine plak

koyma imkanı vardır. Asfaltın sadece soğuması yeterli olduğu için imalat hızı fazladır ancak kullanılan asfalt malzeme yollarda kullanılanlardan farklı olduğundan birkaç değişiklik gerektirir. Yüklemeden ve sıcaklık farkından oluşan gerilmelere uyum sağlayabilen ve geri dönüşümü daha çok olan asfalt sürekli bir yol yatağı olarak uygulanabilir. Ancak demiryolu asfalt uygulamasında asfaltın stabilitesi ve deformasyona karşı dayanıklılığı önemlidir.

Almanya'da 28860 m uzunluğunda doğrudan asfalt üzerine yerleştirilen travers ve raydan oluşan demiryolu hattı bulunmaktadır. ATD sisteminde ise beton yatak üzerine asfalt bir tabaka ve onun üzerine traversler yerleştirilmiştir.

Asfalt karayolunda olduğu gibi demiryolunda da ± 2 mm kesinlikle karayolundakine benzer bir şekilde uygulanır. Özel karışımlarla geliştirilerek ekstrem hava koşullarında minimum 50-60 yıl kullanım ömrü sağlanır. Ortalama tabaka kalınlığı ise 25-30 cm arasında değişiklik göstermektedir.

4.2.2. Beton Plaklı Üstyapılar

Prefabrik plaklar Japonya ve Almanya başta olmak üzere birçok ülkede uygulanmaktadır. Rayın doğrudan yerleştirilip, düzeltilmesine izin vermesi, işçilik kalitesine çok bağlı olmaması, tamiri ve yenilenmesinin kolay olması avantajları arasındadır. Traversli olarak ve traverssiz olarak yapılanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

4.2.2.1. Beton Plak Üzerinde Traversli Olarak Yapılan Tipler

Genellikle prefabrik traversler ya elastik olarak ya da sıkı bir şekilde beton taşıyıcı plağa bağlanırlar.

Elastik bağlantıda lastik sömeller kullanılır ve elastikiyet (yay katsayısı $20-30 \times 10^6$ N/m) sağlamak için travers blokları altına lastik sömeller, rayla travers arasına ise elastikiyeti daha düşük olan seletler yerleştirilir.

Traverslerin taşıyıcı tabaka üstüne serbest yerleştirilmeleri veya gömülecek şekilde konulmaları çerçevenin kolayca monte edilmesini sağlar. Travers kullanılması ray açıklığı ve ray eğiminin verilmesini de kolaylaştırır. Bu iki geometrik standartın hassas bir şekilde uygulanabilmesi yüksek hızlı demiryollarında çok önemlidir.

4.2.2.2. Traverssiz Olarak Yapılan Tipler

Traverssiz olarak yapılanların özel yapıştırıcılı ve tabana gömülü gibi tipleri bulunmaktadır.

Özel yapıştırıcılı üstyapılar daha çok köprü, viyadük ve tünel gibi sanat yapılarında uygulanır. Ya doğrudan doğruya sanat yapısının betonu üzerine ya da bunun üzerine konulan beton veya betonarme yastık üzerine uygulanırlar. Ayrıca Alman Demiryollarında özel yapıştırıcı harç ile ve özel yapıştırıcı harç kapsülü ile ray tesbiti yapılan metro hatları bulunmaktadır.

Mantar ve poliüretan malzemelerden meydana gelen bir bileşim ile desteklenen gömülü rayları esas alan bu sistem, hafif raylı sistemlerden hızlı trenlere kadar tüm demiryolu sistemlerinde uygulanır. Söz konusu sistemde elastik şerit halinde rayın sürekli olarak desteklenmesi, rayın elastik sabitlendiği oluklar ile yönlendirilmesi, rayın elastik birleşik dökülerek sabitlenmesi, spesifik bir elastisite değerine ulaşmak için oluk boyutları, elastik birleşik ve şeritlerin optimum değerlerde tasarlanması gerekir.

4.2.3. Prefabrik Panelli Üstyapı

Tramvay hatlarında prefabrik paneller oldukça pratiktir ve kısa sürede uygulanabilmektedir. Panel kalıplarında sonradan raylar yerleştirilebilecek şekilde yuvalar bırakılmaktadır. Beton yuvanın iç cidarında ince bir çelik gömlekli kaplama vardır. Bu yuvaya yerleştirilerek, ray alttan lastik selet ve iki yandan da lastik kamalar ile tesbit edilmektedir. Beton prefabrik paneller, yol döşenmesinde birbirine yine lastik contalar ile birleştirilmektedir. Döşenecek yola göre kullanılacak prefabrik tip ve ebatları değişiklik gösterir.

Shinkansen hatlarında 5 m uzunlukta, 2,3 m genişlikte ve 16 cm kalınlıkta zayıf donatılı prefabrik betonarme plaklar kullanılır ve bu plaklar, boyuna ve enine yönde silindirik kesitli (40 cm çaplı) elemanlarla tutulur. Bunlar da taşıyıcı tabakanın konstrüksiyon betonuyla sıkı sıkıya bağlanmışlardır. Betonarme plakların altına 4 cm kalınlığında çimento-asfalt harcı doldurulur [4].

5. HAT RİJİTLİĞİ

Demiryolunda yüksek statik ve dinamik yükler zemine küçük bir alan tarafından iletilir. Taşıt geçtiğinde oluşan elastik çökmeler (mm) boyutundadır ve hızlar arttığında bunlar da azalır. Yol yatağındaki çökmeler hızların, dingil yüklerinin, dolgu yüksekliklerinin, altyapı esnekliğinin ve altyapı sönümlemesinin bir fonksiyonudur. Trenin hızı, alttaki yumuşak zemin, yol yatağı / dolgu ve hareketli yükten oluşan dinamik sistemin karakteristik dalga hızına erişebilir ya da aşabilir.

Yüksek hızlı trafiğin geçeceği hatları projelendirirken, yol yatağı - dolgu - altyapı sistemlerinin dinamik davranışlarının analizi çok önemlidir. Amaç, rastlanan titreşimler ve titreşimin altyapıya iletilmesini ve orada yayılmasını minimize etmektir. Bu konuda yol yatağı tabakaları ve taban zeminin esneklikleri çok önemli rol oynar [9].

5.1. Rijitlik Katsayısı

Rijitlik tanım itibarıyla maddenin hareket etmeye karşı gösterdiği dirençtir. Her elastik malzemenin bir rijitlik katsayısı olup, Çizelge 5.1’de bazı üstyapı elemanlarının rijitlik katsayıları görülmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi, zemin tabakasının rijitliği, yani rijitlik katsayısı çok düşük iken, kauçuk ray altı elastik tabakanın ve balastın rijitliği daha fazladır. Rijitlik katsayısı, belli yük altındaki malzemenin deplasmanını ifade eder ve birimi N/m dir. Rijitlik katsayısı yükseldikçe, malzemenin yüke karşı daha fazla direnci olacaktır. Tam tersi olarak, rijitlik katsayısının düşük olması esnekliği artırır ve daha fazla deplasmana neden olur. Bir üstyapının toplam elastikliğine her bir elamanın katkısı çok farklıdır ve aşağıdaki Çizelge 5.2’de oransal değerleri verilmiştir [10].

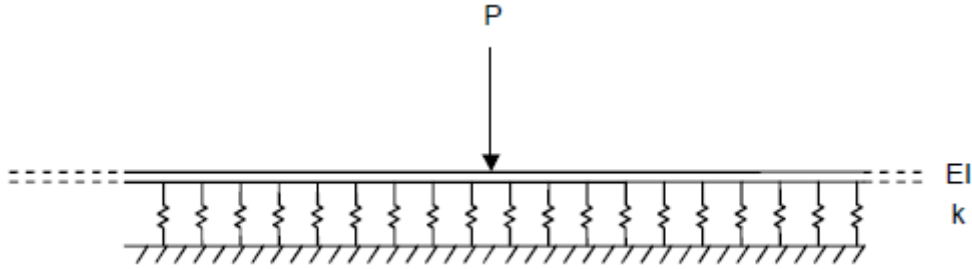
Demiryolu üstyapısı, bir seri ayrı yaylardan oluşan elastik temel üstündeki sonsuz bir kirişin üzerinde noktasal hareket eden bir yükün iki boyutlu modeli ile basitleştirilerek analiz edilir (Şekil 5.1). Bu model lineer elastiktir ve komşu tekerlek yüklerin etkisi süperpozisyon yöntemi ile hesaplanır [11].

Çizelge 5.1: Üstyapı elemanlarının rijitlik katsayıları.

Eleman	Rijitlik katsayısı ($\times 10^6$ N/m)
Ray	50.000-100.000
Ahşap travers	500-800
Beton travers	12.000-15.000
Balast	100-300
Kauçuk elastik tabaka	100-200
Çakıl/kaya zemin	20-80
Balçık zemin	5-15
Killi zemin	15-20

Çizelge 5.2: Hat elemanının toplam hat elastikliğine ortalama katkısı.

Hat elemanı	Ahşap traversli hat (%)	Beton traversli hat (%)
Ray	0.2	0.2
Ray elastik tabaka	25	34
Travers	15	0.8
Balast	20	22
Altyapı	40	43

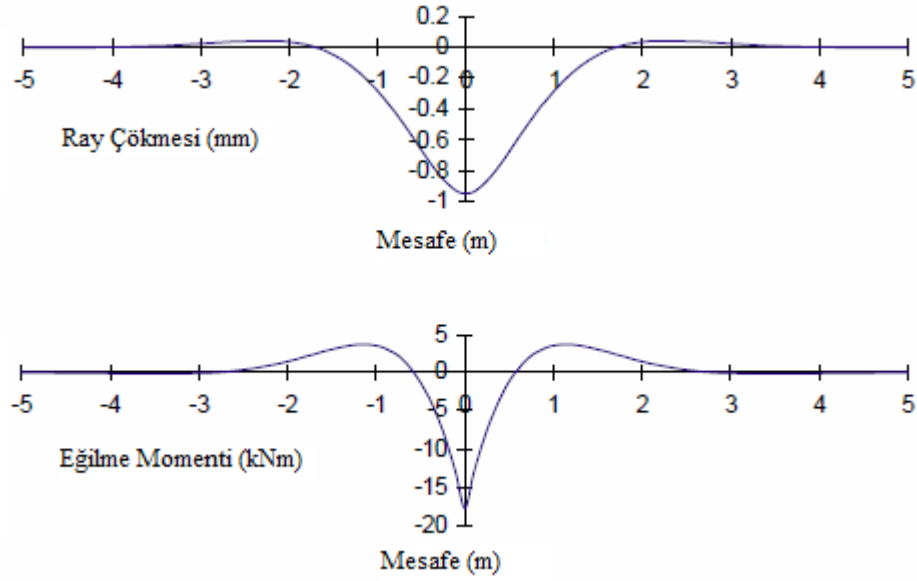


Şekil 5.1: Demiryolu üstyapısının basitleştirilmiş modeli.

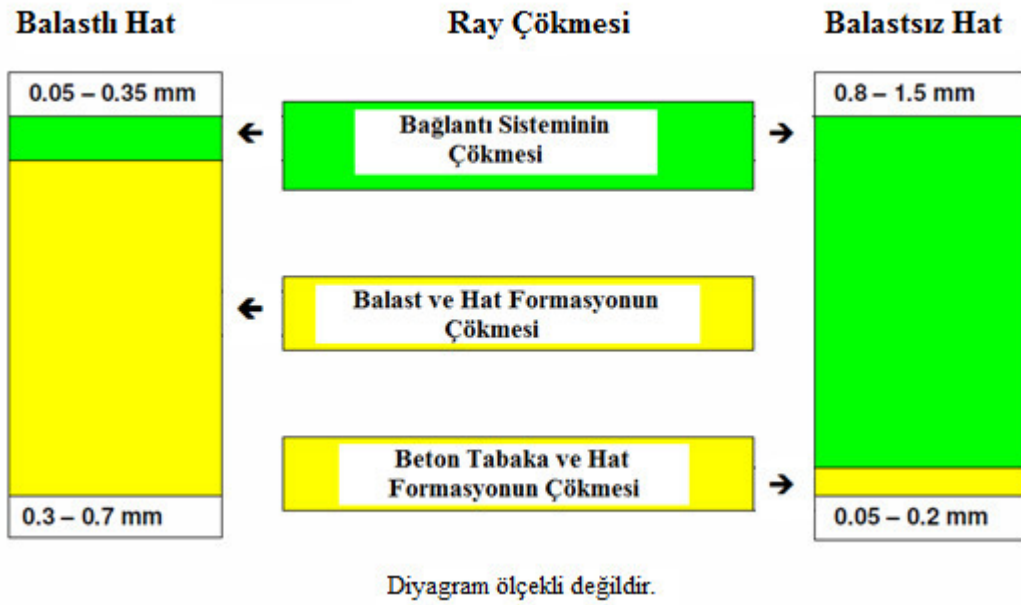
Üstyapının elastik tabakalarının, seri yaylardan oluştuğu kabul edilmektedir. Bir demiryolunun eşdeğer rijitlik katsayısı k_d ; ray elastik tabaka k_{ped} , travers $k_{travers}$, balast ve zemin tabakalarının k_{bz} rijitlik katsayılarından bulunur. Eşdeğer rijitlik katsayısına hat rijitliği adı verilmektedir.

$$\frac{1}{k_d} = \frac{1}{k_{ped}} + \frac{1}{k_{travers}} + \frac{1}{k_{bz}} \quad (5.1)$$

Balastlı hatlarda ray çökmesinde balast ve hat formasyonu çökmesi, ray bağlantı sisteminden daha etkin iken, balastsız hatlarda ise ray bağlantı sistemi, beton yatak ve hat formasyonundan daha etkindir (Şekil 5.3).



Şekil 5.2: Sonsuz kiriş üzerinde ray çökmesi (mm) ve eğilme momenti (kNm).



Şekil 5.3: Balastlı ve balastsız hatta ray çökmesi.

Hat rijitlik katsayısının üstyapı elemanlarının yer değiştirmesine, gerilme dağılımına, titreşim seviyelerine doğrudan etkisi vardır. Bu etkilerin en önemli sonuçları bakım- işletme maliyetleri ve yolculuk konforudur. Demiryolu mühendisliğinde çok yumuşak veya çok rijit hat istenmez. Hat rijitliğinin belli sınırlar dahilinde olması istenir. Bunun için hat rijitliğinin optimizasyonu ile maksimum fayda elde edilmiş olacaktır.

5.2. Balastlı Üstyapıda Hat Rijitliği

Balast-zemin gibi granüler malzemeler, fiziksel açıdan kompleks bir yapıdadır. Bundan dolayı dinamik tepki için elastiklik modülü ve değişik modül yaklaşımlarını içeren uygun kurallar geliştirilmiştir.

Balastın rijitliği, traversin yük alanına ve alan şekline, boşluk oranına, frekansa, basınç dağılımına ve balastın elastik özelliklerine bağlıdır.

Balastlı hat için, statik ray çökmesini en çok etkileyen hat parametresi zemin-balast rijitliğidir. Hat rijitliği, yola ve taşıta gelen dinamik gerilme ve titreşimleri belirleyen en önemli parametre olduğu için analiz yapılarak en uygun değer belirlenmelidir. Hat yatağının rijitliği zemin tipine (zayıf zemin, iyi zemin, kaya ve beton zemin), balast malzemesine, balast tabaka yüksekliğine ve balastın temizliğine bağlı olarak değişmektedir.

Düşük hat rijitliği balast ve zemin tabakasına gelen eğilme momenti ve gerilmeyi azaltmaktadır. Genel olarak bir tabakanın rijitlik katsayısı azaldıkça, üzerine gelen gerilmeler de azalmaktadır. Balast tabakasına gelen gerilme 3 kg/cm²'nin altında kalmalıdır.

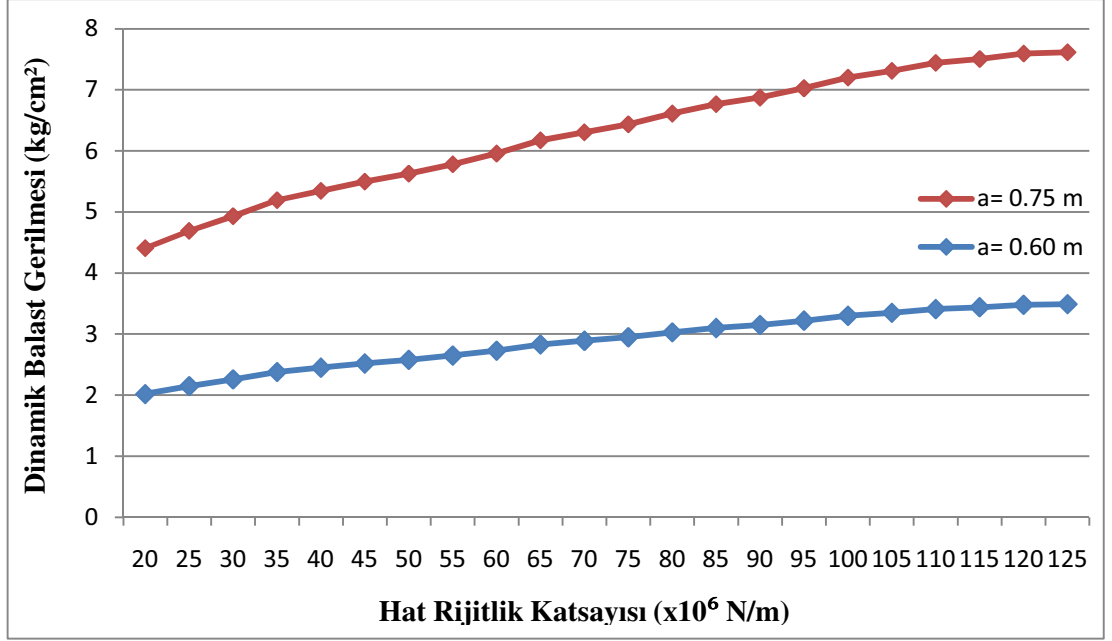
Balast tabakasına gelen gerilme (σ ; kg/cm²) Hanker yöntemi ile,

$$\sigma = \frac{Qa}{2A \sqrt[4]{\frac{4EIa}{k}}} \quad (5.2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada Q tekerlek yükü, a travers aralığı, A travers mesnet alanı, EI ray eğilme rijitliğidir. Proje hızı 250 km/saat, dingil yükü 17 ton ve tipik bir hat (S49 ray, a = 0.60 m, B70 W beton travers) için balast tabakasına gelen dinamik gerilme hesaplanmış ve hat rijitlik katsayısına bağlı olarak Şekil 5.4 grafiği elde edilmiştir.

İyi bakımlı bir hat için Eisenmann dinamik büyütme faktörü 1,94 hesaplanmıştır. Grafiğe göre, balast gerilmesinin limitin altında olması için, hat rijitlik katsayısı 80 x 10⁶ N/m'nin altında olması gereklidir.

Aynı değerlerle, a travers aralığının rijitlik üzerine etkisini görmek için travers aralığı 0,75 m alınarak tekrar çizilmiştir.



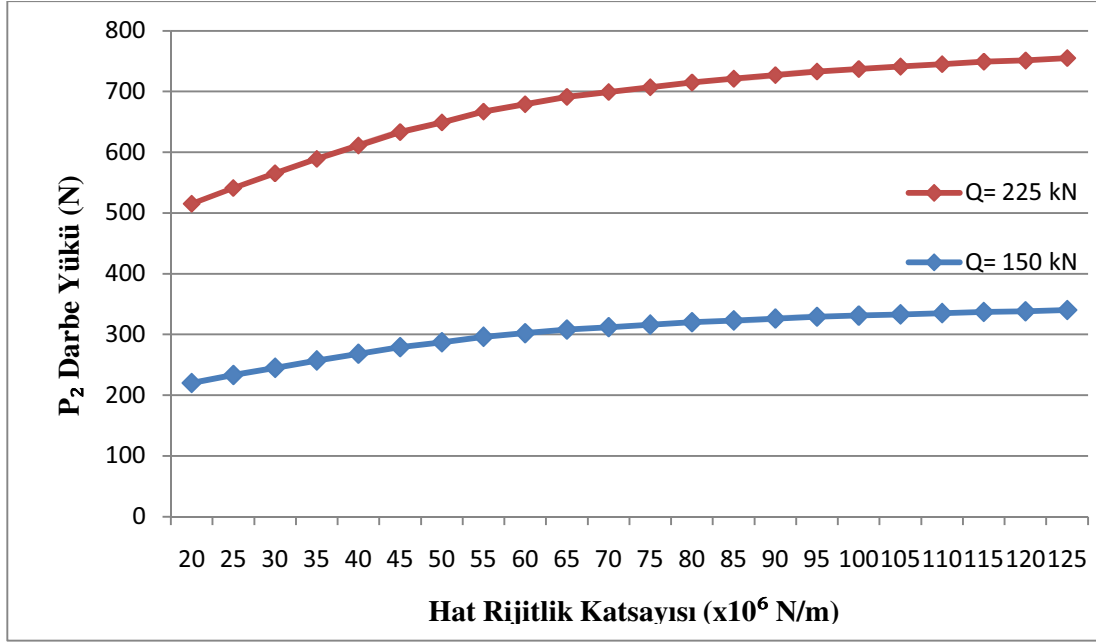
Şekil 5.4: Dinamik balast gerilmesi-hat rijitlik katsayısı ilişkisi.

Grafiğe göre, balast gerilmesinin limitin altında olması için, hat rijitlik katsayısının 50×10^6 N/m'nin altında olması gereklidir. Dolayısıyla, a travers aralığı arttıkça balastta oluşan gerilme artar, bu değer limitin altında olabilmesi için daha esnek bir hat tasarlanmalıdır.

Düşük hat rijitliği ray contalarından geçen taşıtların darbe yükünü azaltmaktadır. Darbe kuvvetinin önemli bir kısmı formasyon tabakasına iletilir. Ayrıca bu darbe kuvveti, travers ve balast tabakasının bozulmasının başlıca nedenidir. İngiltere'de ray contalarından geçen lokomotiflerin darbe kuvvetlerinin ölçülmesi ile ilgili kapsamlı testler yapılmıştır. Ray-tekerlek temasında oluşan darbe kuvvetinin (P_2) ampirik formülü şöyledir [12]:

$$P_2 = Q_{aks} + V \alpha_e \sqrt{M_t k} \quad (5.3)$$

Bu denkleme göre, $Q_{dingil} = 150$ kN statik dingil yükü, $M_t = 1230$ kg yaylandırılmayan taşıt kütlesi, $\alpha_e = 0.02$ radyan contanın eğilme açısı ve $V = 80$ km/saat tren hızı için, hat rijitliğine bağlı olarak darbe kuvveti hesaplanmış ve aşağıdaki Şekil 5.5 grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.5: Darbe kuvveti - hat rijitlik katsayısı ilişkisi.

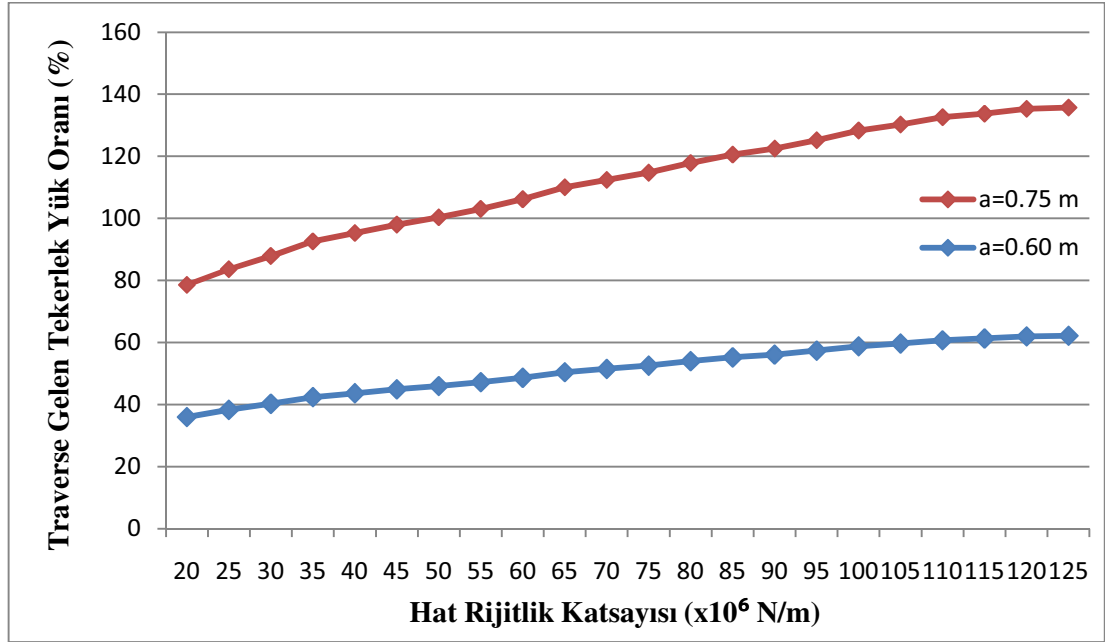
Aynı grafik $Q_{\text{dingil}} = 22,5$ ton yani 225 kN olan karışık hatlar için düzenlendiğinde ise P_2 darbe yükü çok daha yüksek değerler almaktadır. Karışık hatlarda, ray contalarına gelen travers ve balast tabakasının bozulmasının başlıca sebebi olan darbe kuvveti daha yüksektir. Dingil yükü 36 ton olan ağır yük hatlarında bu değer çok daha yüksek olacaktır. Demiryolu üstyapısında dingil yükü arttıkça balastlı hatlarda balast, travers ve ray contalarının servis ömrünün daha uzun olabilmesi için daha az rijit hatlar tasarlanmalıdır.

Düşük hat rijitliği taşıtın düşey titreşimlerini azaltmaktadır ve bu sayede yolculuk konforu artmaktadır. EN 1990-A1 normuna göre, “Çok İyi” seviyede yolculuk konforu için taşıtın düşey titreşim ivmesi 1 m/s^2 nin altında olmalıdır.

Hat rijitliğinin düşük olması durumunda yaylandırılmayan tekerlek kütlelerinden kaynaklanan ilave dinamik gerilmeler azalmakta ve daha iyi bir yük dağılımı sağlanmaktadır. Hat rijitliği azaldıkça tekerlek yükünden traverse gelen indirgenmiş yük de azalmaktadır, (Şekil 5.6). Traverse gelen yükün tekerlek yüküne oranı, Hanker yöntemi ile hesaplanabilir [5].

$$\text{İndirgenmiş tekerlek yük oranı (\%)} = \frac{a}{2 \sqrt[4]{\frac{4EIa}{k}}} \quad (5.4)$$

Şekil 5.8’de hat rijitlik katsayısına bağlı olarak yukarıdaki bağıntı ile hesaplanan indirgenmiş tekerlek yük oranı gösterilmiştir.

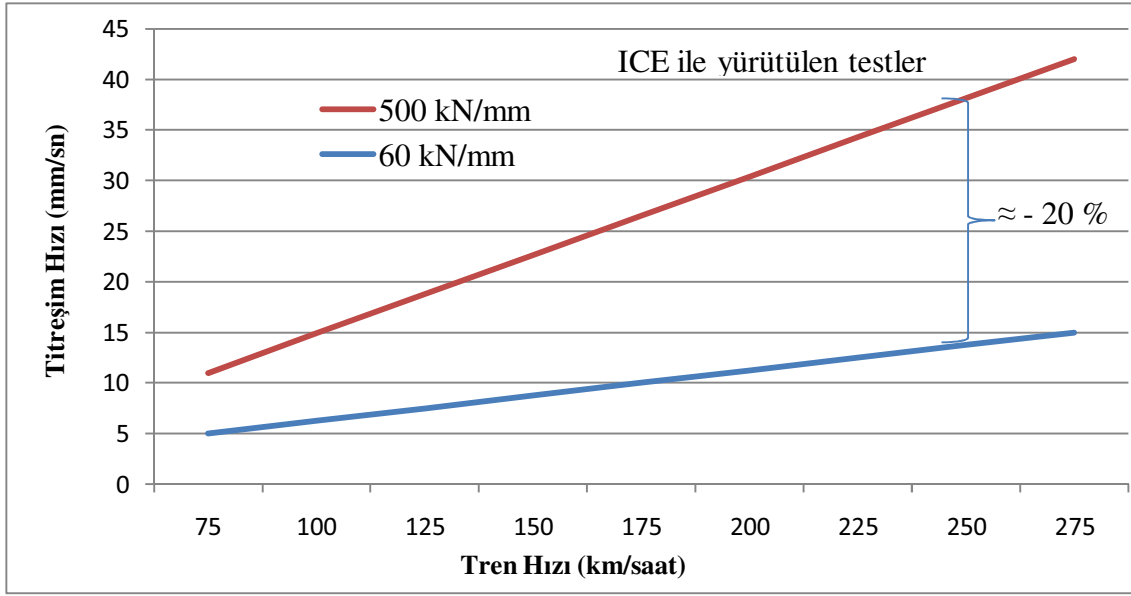


Şekil 5.6: Traverse gelen tekerlek yük oranı - hat rijitlik katsayısı.

Bunlara karşın yüksek hat rijitlik katsayısının avantajları şunlardır:

Yüksek hat rijitliği ray eğilme momentini ve dolayısıyla ray gerilmesini azaltmaktadır. Çünkü ray eğilme momenti hat rijitliğinin 1/4 üssü ile ters orantılı olarak değişmektedir [12].

Yüksek hat rijitliği balast titreşimlerini azaltmaktadır. Belli frekans aralığında, özellikle 25-100 Hz arasında, balast titreşim seviyesi balast stabilitesi açısından önemlidir. Maksimum balast titreşim hızı 15-18 mm/sn’nin altında olmalıdır. Mesela 40 Hz frekansın üstünde balast titreşimlerinin yüksek olması balast malzemesinin kenarlarına yayılarak akmasına neden olmaktadır. Yüksek balast titreşimleri 200 km/saat tren hızının üstünde olmaktadır. İstenmeyen balast titreşim seviyesine özellikle yüksek hızlarda ulaşıldığı için bazı önlemlerin alınması gerekebilir. Balast tabaka yüksekliğini artırmak balast dane titreşim seviyesini azaltır. Özellikle elastik ray altı ve travers altı pedleri sayesinde balast danelerinin titreşim hızı azalmaktadır. Mesela Alman Demiryollarında rijitlik katsayısı 500×10^6 N/m olan elastik tabaka yerine 60×10^6 N/m olan elastik tabakalar kullanıldığı zaman balast titreşimlerinde % 20 azalma sağlanmıştır (Şekil 5.7).

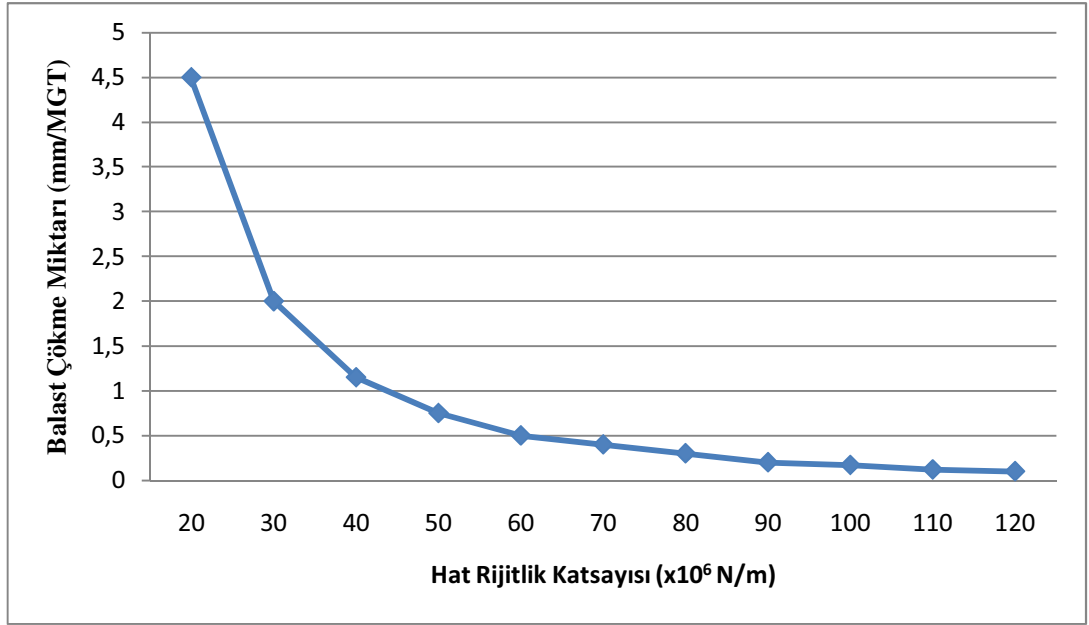


Şekil 5.7: Mesnet levhasının esnekliğinin balast titreşimine etkisi.

Yüksek hat rijitliği, trenin harcadığı çekim gücünü ve ray-travers çökmesini azaltmaktadır. Ray çökmesinin taşıt stabilitesine ve geometrik bakım maliyetine etkisi vardır. Ray deplasmanı fazla olursa, ray mantarında dönme ve buna bağlı olarak iki ray arası açıklığında artış olabilir ve taşıt stabilitesinde sorunlara neden olabilir. Hat rijitliği ile hat çökmesi arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Hat rijitlik katsayısı k (10^6 N/m) ile hat çökme oranı d (mm/MGT) arasındaki bağıntı şöyledir [5];

$$d = \frac{1800}{k^2} \quad (5.5)$$

Denkleme göre hat rijitlik katsayısına bağlı olarak balast çökme eğrisi Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Hat rijitlik katsayısı 2 kat artarsa, balast çökmesi 4 kat azalır. Hat çökme hızı ile hat geometrik bakım aralığı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Balast çökmesi durumunda yani hattın yatay ve düşey geometrisi bozulduğu zaman dresajlı ve nivelmanlı buraj makineleri ile tamirat yapılmalıdır.



Şekil 5.8: Balast çökme miktarı - hat rijitlik katsayısı ilişkisi.

5.3 Balastsız Üstyapıda Hat Rijitliği

Balastsız yüksek hızlı hatların inşa edilmesi kararı ile nispeten daha dar genişlikte hatların tasarımı mümkün olmuş ve balast tabakasının beraberinde getirdiği bir takım olumsuzluklar ortadan kalkmıştır. Ancak balastın yerine gelen beton yatak balastın sahip olduğu elastisiteyi sağlamak durumundadır. Bu ancak beton ile beraber çalışacak ara elemanların varlığı ile mümkün olmaktadır. Son yıllarda geliştirilen sistemler sayesinde balastsız üstyapı uygulamaları yaygınlaşmıştır.

Bir çok demiryolu tasarımcısının kabulüne göre; hatların bakım maliyetlerini düşük tutabilmek için, yüksek dinamik elastisite kavramı vazgeçilmez bir unsurdur. Bununla beraber aşınma miktarının artması, ray üzerinde oluşan ondülasyonlar ve ray mantarında oluşan aşınmalar kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca yüksek hız sonucu oluşan dinamik etkilerin artması ile sehimler meydana gelecektir. Saydığımız bu kusurlar ancak uygun ray sabitleme malzemelerinin optimum mühendislik tasarımları ile minimum değerlere indirilebilir. Bununla beraber oluşturulan sisteme etki eden kuvvetlerin doğru analizi, sistemin bu kuvvetlere dayanabilecek şekilde tasarlanması son derece önemlidir [13].

Balastsız üstyapıda ray ile tekerlek arasındaki düşey dinamik kuvvetlerin azaltılması, hattın rijitliğinin belli bir değerde tutulması için normalde balast ve altyapı tarafından

sağlanan elastiklik, ray altı elastik tabakalarının kullanılmasıyla sağlanır. Ray altı elastik tabakaları, kauçuk ya da elastomer elemanlar gibi düşey rijitliği yüksek olan malzemelerden üretilirler. Özellikle köprü, tünel ve hatta kritik özellikler taşırlar.

Hem ray altı elastik tabakanın kalınlığı hem de hattın düşey rijitliği bir ülkeden diğerine önemli değişiklikler göstermektedir. Hattın düşey rijitliğinin optimizasyonu yaylanmaz kütlenin düşey dinamik gerilmesi, hat deformasyonunda güç dağılımı gibi farklı birçok parametreye bağlı olduğu görülmektedir. Ancak ray altı elastik tabakanın rijitliğinde oluşacak büyük artışlar betonarme traversler için olumsuz sonuçlar doğuracaktır.

Araç ile hat arasında oluşan dinamik etkileşimde önemli bir paya sahip olan düşey rijitliğin iyi belirlenmesi ve üzerinde düşünülmesi, her değişken için en uygun değerin bulunmasında çok önemlidir.

Hızlı sefer yapan yani saatte 300 km'den yüksek hıza ulaşabilen trenlerin sorunsuz ve minimum bakım giderleri ile işletilebilmesi için hem hattın rijitliği hem de titreşim kapasitesi ile ilgili bir referans değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Yüksek hızlı hatların inşa edilmesi, araçların yola dinamik etkilerini azaltmak amacıyla, esnek yol yapıları için yapılan araştırmaları artırmıştır. Bu konuda Fransız demiryolları, yeni Paris – Lyon hattında travers ile ray arasına bir mesnet levhası (elastik ped) konulması yolunu tercih etmiştir. Bu tabakanın kalınlığı normal hatlarda kullanılan, 200 km/saat hıza izin veren 4,5 mm'lik tabakaların iki katıdır (9 mm). Rijitlik konusunda, yüksek hızlı hatlarda elastik ped için 90×10^6 N/m önerilir, bu değer konvansiyonel hatlar için 150×10^6 N/m'dir.

Almanya demiryolları Hannover – Würzburg ve Mannheim – Stuttgart arasındaki ilk yüksek hızlı hatlarda UIC 60B 70W olarak bilinen ve düşey rijitliği 500×10^6 N/m olan ZW 687a mesnet levhası kullanılan üstyapı modelini kullanmıştır. Sonradan, Almanya, yaklaşık 60×10^6 N/m'lik düşey rijitliğe sahip yeni elastik pedleri barındıran UIC 60B 70W 14k 900 modelini kabul etmiştir. Bu Hannover – Berlin arasındaki yeni hızlı demiryolu hattının balastlı bir kesiminde kullanılmıştır. Bu arada 60 kg/m'lik rayları kapsayan, 63 cm aralıklı B 75 traversler, Ioary tipi bağlantı elemanları ve 10 cm kalınlıkta 27×10^6 N/m düşey rijitliğe sahip elastik pedlerle

donatılmış yeni bir yol üstyapısı tasarlanmıştır. Bu model Hannover – Berlin yüksek hızlı hattında Stendal yakınlarında 14 km yola döşenmiştir.

Madrid – Seville yüksek hızlı hat söz konusu olduğunda ise, $400 - 500 \times 10^6$ N/m düşey rijitlik ve 6 mm kalınlıktaki EVA elastik pedleri kullanılmıştır. Madrid – Barcelona yeni hızlı hattında ortalama rijitliği 100×10^6 N/m olan 7 mm kalınlıktaki levha kullanılmıştır. Bilgiler Çizelge 5.3’de özetlenmiştir. Bunların farklılıkları ray mesnetlenmesinde dikkate değer etkiler yapmaktadır. Bu referansların analizi gösteriyor ki, yüksek hızlı hatlarda kullanılan elastik pedlerin düşey rijitliği hakkında, belli başlı Avrupa demiryolu şirketlerinin kabul ettikleri kriterler çok fazla çeşitlilik göstermektedir.

Çizelge 5.3: Elastik ped düşey rijitliği.

Yol türü	Elastik ped düşey rijitliği K_{ped} ($\times 10^6$ N/m)
<u>Geleneksel demiryolları</u>	
Fransa ulusal demiryolları	150
Almanya ulusal demiryolları	500
<u>Yüksek hızlı demiryolları</u>	
Paris – Lyon demiryolu	90
Hannover – Würzburg ve Mannheim – Stuttgart demiryolu	500
Hannover – Berlin demiryolu	60
Hannover – Berlin demiryolu (Stendal civarı)	27

Buna ilaveten, Lopez Pita tarafından açıklandığı üzere, bu değerlerden birini veya bir başkasını kabul etmenin hiç şüphesiz ray taşıyıcısının toplam rijitliği üzerinde büyük etkisi vardır [14].

Elastik ped ve travers altı granül malzemeleri kapsayan taşıyıcısının toplam rijitliğini belirleyebilmek için genellikle kullanılan hipotez, ray taşıyıcısının, bir dizi esnek sistemler takımına benzeşmesidir.

Bu hipotezin matematiksel gösterimi [14]:

$$k_s = (k_{ped} \times k_{bp}) / (k_{ped} + k_{bp}) \quad (5.6)$$

k_s = Ray taşıyıcısının (rayın oturduğu elemanlar) düşey rijitliği (elastik ped ve balast-platform sisteminden oluşan tabakalar)

k_{ped} = elastik pedin düşey rijitliği

k_{bp} = balast- platform sisteminin düşey rijitliği

Fransa ve Almanya hatlarındaki mesnet levhalarının rijitlikleri, ray mesnetlenme rijitliği konusunda dikkati çeken farklılıklar oluşturur. Dolayısıyla, yüksek hızlı hatlardaki mesnet levhalarının düşey rijitliklerinin arzu edilen değerlerinin merak edilmesi akılcı görünmektedir. Yaklaşık yanıt şöyle olabilir:

Yüksek hızlı hatlarda balast-platform sisteminin düşey rijitliği yaklaşık 98×10^6 N/m'dir. Eğer hat için arzu edilen düşey rijitliğin 75×10^6 N/m olduğu varsayılırsa, mesnet levhalarının yaklaşık $30 - 50 \times 10^6$ N/m değerinde bir rijitliğe sahip olmaları gerektiği kolaylıkla ortaya çıkar. Mesnet levhasının esneklik etkisinin, balast içindeki titreşim düzeylerinin azaltılmasındaki yararlı etkiyi de unutmamak gerekir.

Deneyimler ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, düşey rijitlikteki bir artış, taşıtların ray üzerinde oluşturacakları düşey gerilmeler üzerinde negatif bir etki yapmaktadır. Bununla birlikte, düşey rijitlikteki böyle bir değişim, hat içine gereksiz yere dağılan enerji miktarını da azaltır. Bu çelişki, düşey rijitlik için, hem hat geometrisinin bakım maliyetleri ve hem de enerji maliyetleri ile ilgili ekonomik maliyetleri minimize edecek bir optimum değer bulmak için çaba harcanmasını önerilir duruma getirir.

Yapılan araştırma, yüksek hızlı hatlarda hattın düşey rijitliği için optimum değerlerin $70 - 80 \times 10^6$ N/m olacağını göstermiştir. Bu sonucun elde edilmesinde kullanılan hipotezler, hattan hata değişebilir, ancak bütünsel olarak bu hipotezlerin etkisi elde edilen sonuçları fazla değiştirmez. Bu çalışmada ayrıca, yüksek hızlı hatlarda kullanılan ve 90 ile 500×10^6 N/m arasında değişen mesnet levhaları düşey rijitlikleri için önerilebilecek değerler de incelenmiş, sonuç olarak $30 - 50 \times 10^6$ N/m bulunmuştur. Bu konudaki optimizasyon, hem taşıtların yola ilettikleri düşey gerilmeleri, hem de balast tabakası içindeki titreşimleri azaltmak konularında yararlı olacaktır.

Almanya ve Fransa hatlarında dikkate değer olan, elastik ped rijitlikleri arasındaki farklar ray taşıyıcısının toplam rijitliğinde belirgin bir fark yaratmaktadır.

Çizelge 5.4: Fransa’da çeşitli tabakalar ve elastik ped için düşey rijitlik.

Balast + platform sisteminin düşey rijitliği ($\times 10^6$ N/m)	Taban plakası düşey rijitliği ($\times 10^6$ N/m)		Ray taşıyıcısının toplam düşey rijitliği ($\times 10^6$ N/m)	
	Konvansiyon el hatlarda	Yüksek hızlı hatlarda	Konvansiyonel hatlarda	Yüksek hızlı hatlarda
46	150	90	35,2	30,4
68	150	90	46,8	38,7
96	150	90	58,5	46,4
107	150	90	62,4	48,8

Çizelge 5.5: Almanya’da ray taşıyıcısı için düşey rijitlik.

C (N/mm^3)	Travers, Taban plakası	K_{bp} ($\times 10^6$ N/m)	Taban plakası düşey rijitliği ($\times 10^6$ N/m)	Ray taşıyıcısının toplam düşey rijitliği ($\times 10^6$ N/m)
0,35	B70; ZW 687a	99,7	500	82,6
0,35	B70;14 K 900	99,7	60	37,3
0,35	B75; Ioary 300	99,7	27	22,8

5.4 Optimum Hat Rijitliği

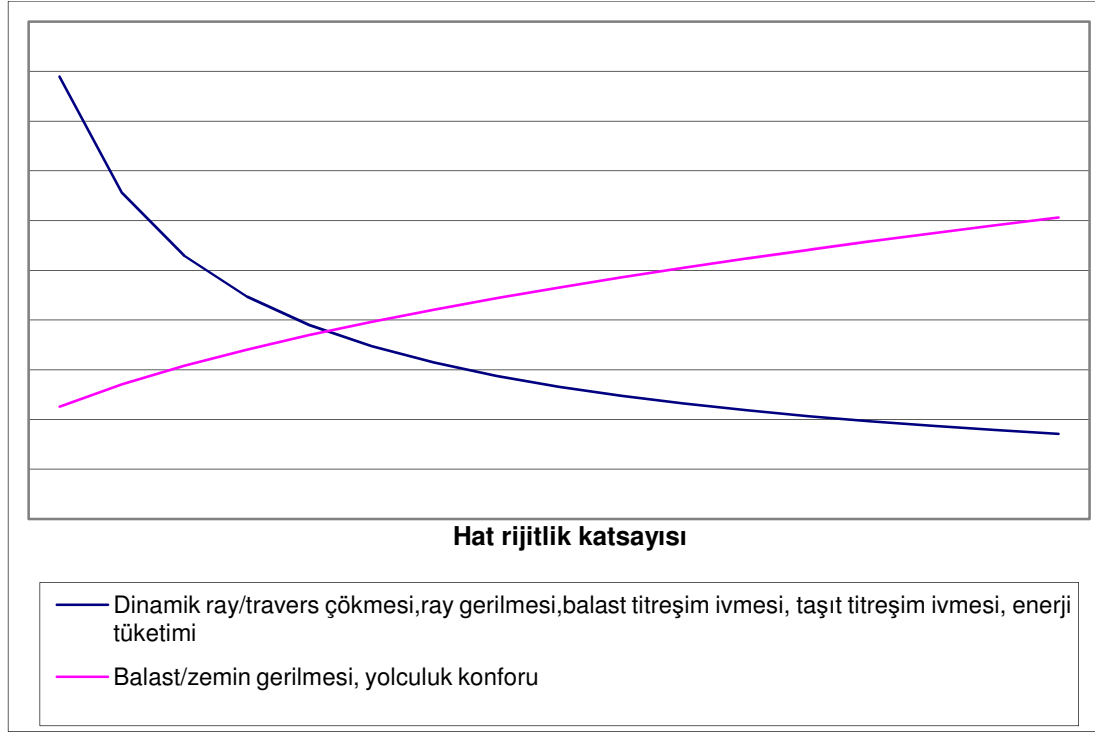
Alman demiryollarında yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi olarak 1.2-1.5 mm ve buna göre optimum hat rijitliği $50\text{-}100 \times 10^6$ N/m belirlenmiştir. Optimum hat rijitliği tren hızına bağlı olarak değişmektedir. 200 km/saat tren hızı için $k = 50 \times 10^6$ N/m ve 300 km/saat tren hızı için $k = 78 \times 10^6$ N/m olarak belirlenmiştir. EN 13146 göre mesnet rijitlikleri Çizelge 5.6’da sınıflandırılmıştır.

Çizelge 5.6: Mesnet rijitlik sınıfları.

Mesnet sınıfı	Mesnet rijitliği ($\times 10^6$ N/m)
Yumuşak	< 30
Yumuşak-orta	30-50
Orta-sert	50-70
Sert	>70

Alman demiryolları standardına göre balastsız hatlarda 65 cm aralıklı mesnet rijitliği $20\text{-}25 \times 10^6$ N/m olması gerektiği için yumuşak mesnet sınıfına girmektedir. Balastlı hatlar genelde $20\text{-}40 \times 10^6$ N/m arasında olduğu için balastsız hatlara göre yumuşak mesnetli olarak kabul edilir [1].

Hat rijitlik katsayısının hat üstyapı elemanlarına ve taşıta etkisi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9: Rijitlik katsayısının hat üstyapı elemanlarına ve taşıta etkisi.

Buna göre hat rijitliğinin optimum bir değeri olmalıdır, çünkü

- Dinamik yüklerin azalması, daha iyi bir yük dağılımı ve balast titreşimlerinin azalması açısından yumuşak hat yani düşük hat rijitliği istenir
- Enerji tüketimini azaltmak, ray gerilmelerini düşürmek, balast çökmesini azaltmak ve buna bağlı olarak geometrik bakım ihtiyacını azaltmak için sert hat yani yüksek hat rijitliği istenir [12].

Bu nedenle, hat tasarım aşamasında optimum hat rijitliği belirlenerek uygun tasarım yapılmalıdır.

Tecrübeler ve deneysel sonuçlar, düşey rijitlikteki artışın, ray üzerinde araç tarafından oluşturulan düşey gerilmeler üzerinde negatif bir etkisinin olduğunu gösterir. Bununla beraber, düşey rijitlikteki değişim, enerji sarfiyatında oldukça önemli bir azalmaya sebep olur. Bu çelişki, hat düşey rijitlik seviyesinin, iki fiziksel durum (hat bakım maliyetleri ve enerji sarfiyatı) ile ekonomik maliyetleri azaltacak optimum seviyeye gelmesini gerektirir.

Bu optimum düşey rijitlik seviyesinin yüksek hızlı trenler için 70-80 kN/mm olduğu belirtilmiştir. Bu aralık değerini elde etmekte kullanılan hipotezler bir hattan diğerine

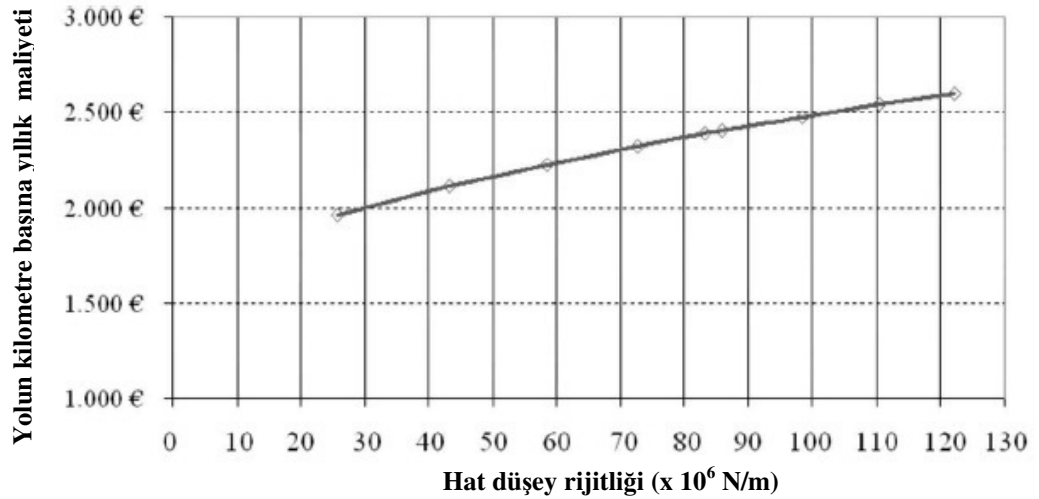
farklılık gösterebilir, fakat genel olarak elde edilen sonuçlarda önemli değişikliklere sebep olmayacaktır.

Şu anda yüksek hızlı hatlarda 90 ile 500×10^6 N/m arasında değişiklik gösteren elastik ped düşey rijitlik değerini de ele almıştır. Yaklaşık rijitliklerin $30\text{-}50 \times 10^6$ N/m olması önerilmiştir.

Hat ve elastik ped düşey rijitliğinin sadece araçlar tarafından yolda oluşturulan düşey gerilmelerin azaltılmasında değil, aynı zamanda balast tabakasında oluşan vibrasyon seviyesinde de azalma sağlayacağı vurgulanmıştır.

Önceki kısımlarda değinilen noktalar şöyle özetlenebilir; hattın bir optimum düşey rijitlik değerinin bulunması tavsiye edilir. Bu optimum değer iki farklı bakış açısına göre belirlenmelidir; ilki, fazla esnek bir hattın neden olduğu yüksek enerji maliyetleri, ikincisi yüksek düşey rijitliğe sahip bir yolda geometrik kalitenin korunması için bakım maliyetlerinin artmasıdır [14].

Eğer hattın geometrik kalitesindeki bozulma düzeyi ile, bu bozulmanın oluşturacağı bakım maliyetleri arasındaki direkt ilişkinin varlığı geçerli kabul edilebilirse, bakım maliyetlerinin Şekil 5.10'daki gibi çizgiyi izleyeceği kabul edilebilir.



Şekil 5.10: Bakım maliyetlerinin düşey rijitlikle değişimi.

Bu evrimi ekonomik terimlerle ölçülendirmek için olası yaklaşımlardan birisi, bir hattın ilgili bakım maliyetlerini bilinen bir düşey rijitlikle ilişkilendirilmesine bağlıdır. Bu yöntemde, bakım maliyetlerinin diğer farklı düşey rijitlik değerleri için ekstrapolasyonu mümkün olabilir [9].

Bu konuda Paris ve Lyon arasındaki hızlı demiryolu hattından referanslar elde edilebilir. Aslında bu hatta, hattın düşey rijitliği, Alias and Prud'Homme tarafından 80×10^6 N/m olarak belirtilmiştir. Hat geometrisi bakım maliyetleri ile ilişkili olarak, SNCF tarafından yayınlanan sonuçlar, yaklaşık ortalama yıllık maliyet, hattın Km'si başına 2400 Euro/km'dir. Şu konunun açıklanması önemlidir; bu ekonomik değer sadece, direkt olarak geometrik kalite bozulması ile ilişkili olan, buraj ve yol doğrultulması işlemleri ile ilişkilidir. Ray taşlanması, yol aygıtlarının iyileştirilmesi, yönetim personeli ve malzemelerin temini vb. bu değere katılmamıştır.

Hat üzerine dağılarak boşa harcanan enerjinin ekonomik etkisi ise şöyle değerlendirilebilir. Sauvage and Fortin tarafından elde edilen sonuçlar esas alınarak, UIC 60 rayının kullanıldığı bir hızlı demiryolu hattında dağılan enerjinin miktarını değerlendirebilmek için, bu yazarlar tarafından yayınlanan sonuçlar Şekil 5.11'de görülmektedir [9]. Bu yolla, 300 km/saat sabit hızla seyreden bir tren için, 8,15 ton'luk bir tekerlek tarafından kilometre başına basitleştirilmiş yaklaşık E_i enerji dağılımı değerlendirilebilir (TGV ve AVE trenleri için).

Aşağıda bu konuda bir örnek yapılmıştır. Burada P ve E hat rijitliğine bağlı olarak sırasıyla harcanan güç ve enerjiyi göstermektedir.

1. Çok esnek bir hat için K (düşey rijitlik) = 26 kN/mm

$$E_1 = P_1 \Delta t \quad (5.7)$$

$$= 11.2 \text{ kW} \frac{1 \text{ Km}}{300 \text{ Km} / h}$$

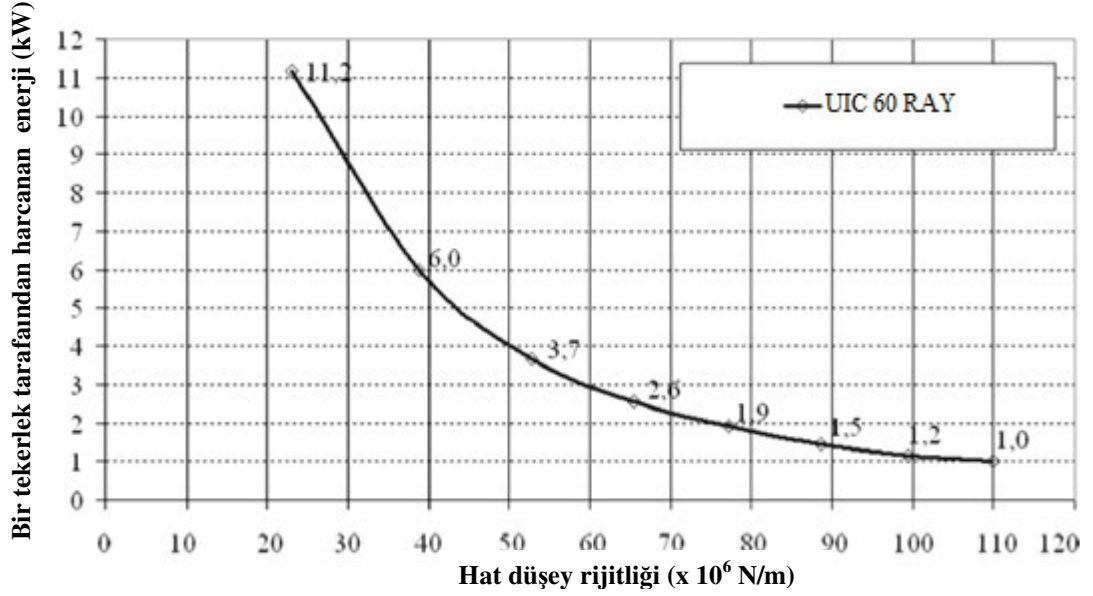
$$= 0.0373 \text{ kWh}$$

2. Çok rijit bir hat için K (düşey rijitlik) = 122 kN/mm

$$E_2 = P_2 \Delta t \quad (5.8)$$

$$= 1.0 \text{ kW} \frac{1 \text{ Km}}{300 \text{ Km} / h}$$

$$= 0.0033 \text{ kWh}$$



Şekil 5.11: Hattın rijitliğinin, 300 Km/saat hızda, bir tekerlek tarafından harcanan enerjide hat rijitliğinin etkisinin yaklaşık değerleri.

Buradan bir tekerlek için kilometre başına harcanan yıllık enerji maliyetine geçilebilir. Madrid-Seville arasındaki İspanya hızlı tren hattı için trafik 23 AVE treni/gün-yön'dür. Bu trenlerin ağırlığı 421.5 ton'dur.

1. Çok esnek bir hat için K (düşey rijitlik) = 26 kN/mm

$$E_1 = 0.0373 kWh \frac{421.5t}{8.15t} \frac{23tren}{gün} \frac{365gün}{yıl}$$

$$= 16137 kWh/km yıl$$

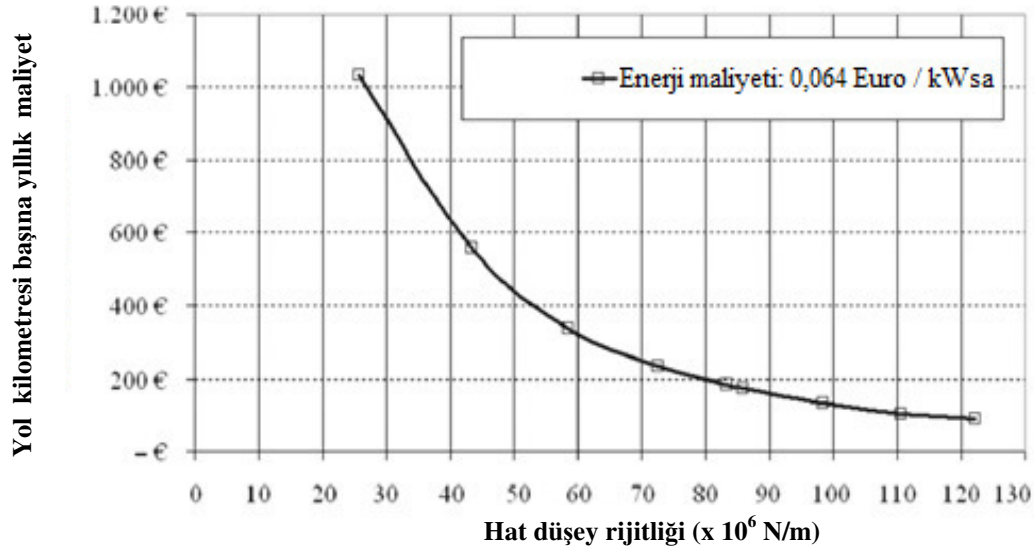
2. Çok rijit bir hat için K (düşey rijitlik) = 122 kN/mm

$$E_1 = 0.0033 kWh \frac{421.5t}{8.15t} \frac{23tren}{gün} \frac{365gün}{yıl}$$

$$= 1447 kWh/km yıl$$

İspanya için enerji maliyeti 0.064 €/kWh'dir ve Şekil 5.12'deki grafiği çizmek mümkündür.

Hem hattın düşey rijitliğinin, geometrik bakım maliyetlerinin, hem de dağılarak boşa harcanan enerji maliyetlerinin etkileri ile ilgili öncelikli düşünceler temel alınarak, optimum düşey rijitlik için bir eşik tanımlamak mümkün olur.

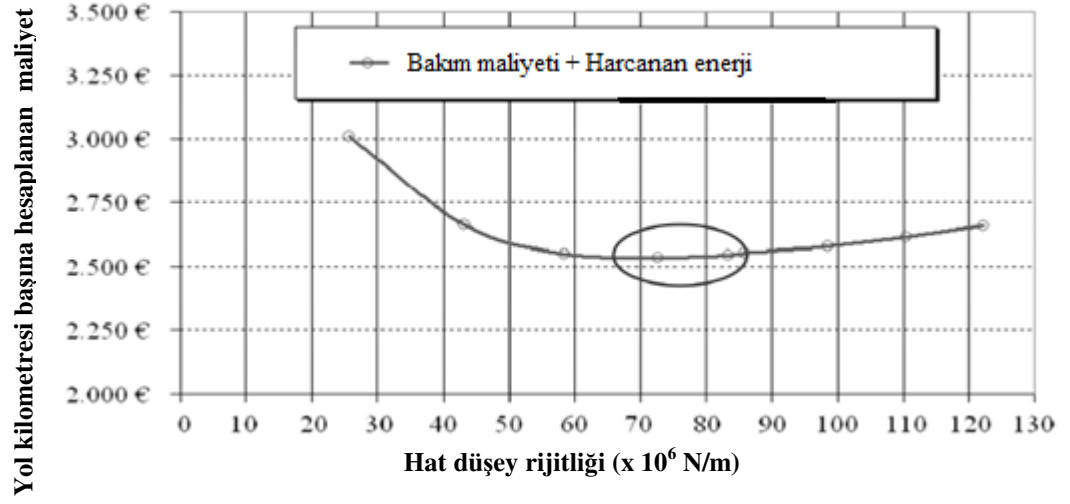


Şekil 5.12: Yüksek hızlı demiryolunun (Km) başına harcanan enerjinin tahmini yıllık maliyetleri (günde bir yönde 23 TGV yolcu treninin çalıştığı demiryolu için).

Şekil 5.13'deki grafik, optimum düşey rijitlik eşiğinin 70 ile 80 $\times 10^6$ N/m arasında olacağını gösterir. Buradaki büyüklükler bunları elde etmek için kullanılan şu hipotezlere dayanır;

- Kilowatt-saat başına kabul edilen maliyet,
- Referans olarak alınan düşey rijitlik,
- Dikkate alınan hat geometrisi bakım maliyeti.

Bununla birlikte, sözü edilen büyüklüklerdeki makul değişimler esas alınarak gerçekleştirilen simülasyonlar, yukarıdaki aralıkta optimum düşey rijitlik için bulunan değerlerin uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca belirtilmesi gereken konu, yapılan araştırmanın kesin bir değer bulma amacı gütmemesi, yüksek hızlı demiryollarında hat düşey rijitliği için arzu edilen değerlerle ilgili yaklaşımın doğrulanmasını sağlamak amacını gütmesidir [9].



Şekil 5.13: Hat rijitliği ile toplam maliyet arasındaki ilişki [14].

6. SONUÇLAR

Çalışmada, balastlı ve balastsız demiryolu üstyapılarında yapım, bakım ve işletme maliyetleri ve hat rijitliğinin farklı açılardan etkileri incelenerek başlıca şu sonuçlara varılmaktadır:

Balastlı üstyapıda balastsıza göre bakım maliyetleri, enerji sarfiyatı vb. giderler daha fazla olmaktadır. Yenibosna-Havaalanı hafif metro hattının balastsız yerine balastlı yapılması durumunda yapım maliyeti daha düşük olmasına rağmen aradaki fark, bakım maliyetleri arasındaki fark ile 8 yılda kapanmaktadır.

Hat rijitliğinin bakım işleri, enerji tüketimi, bakım maliyetleri ve yolculuk konforuna etkisi bulunmaktadır.

Hat rijitliği artınca, ray / travers çökmesi, ray gerilmesi, balast titreşimi ve enerji tüketimi azalırken, balast - zemin gerilmesi ve yolculuk konforu artmaktadır.

Hat rijitliğinin, ray contalarına gelen darbe kuvveti ile doğru orantılı bir ilişkisi olup, dingil yükünün daha fazla olduğu ağır yük hatlarında darbe kuvvetini düşük değerlerde tutabilmek için daha esnek bir hat düşünülmelidir. Aynı değişim traverse gelen tekerlek yük oranı için de söz konusudur. Ancak bu ilişkilerin aksine balast çökme miktarı hat rijitliği ile ters orantılı değişmektedir.

Balastsız üstyapıda, hat rijitliğinde en etkin üstyapı elemanı elastik tabakadır. Çalışmada farklı ülkelerde kullanılan pedlerin özellikleri ortaya konmuş, bunların toplam hat rijitliği üzerine etkileri incelenmiştir. Balastsız üstyapıda özellikle ray pedlerinin ve travers altı pedlerin rijitliğine karar verilmesi önemlidir.

Balastlı hat için, statik ray çökmesini en çok etkileyen hat parametresi zemin-balast rijitliğidir. Hat rijitliği, yola ve taşıta gelen dinamik gerilme ve titreşimleri belirleyen en önemli parametre olduğu için analiz yapılarak en uygun değer belirlenmelidir. Hat yatağının rijitliği zemin tipine (zayıf zemin, iyi zemin, kaya ve beton zemin), balast malzemesine, balast tabaka yüksekliğine ve balastın temizliğine bağlı olarak değişmektedir.

Düşük hat rijitliği balast ve zemin tabakasına gelen eğilme momenti ve gerilmeyi azaltmaktadır. Genel olarak bir tabakanın rijitlik katsayısı azaldıkça, üzerine gelen gerilmeler de azalmaktadır. Balast tabakasına gelen gerilme 3 kg/cm^2 'nin altında kalmalıdır.

Deneyimler ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, düşey rijitlikteki bir artış, taşıtların ray üzerinde oluşturacakları düşey gerilmeler üzerinde negatif bir etki yapmaktadır. Bununla birlikte, düşey rijitlikteki böyle bir değişim, hat içine gereksiz yere dağılan enerji miktarını da azaltır. Bu çelişki, düşey rijitlik için, hem hat geometrisinin bakım maliyetleri ve hem de enerji maliyetleri ile ilgili ekonomik maliyetleri minimize edecek optimum değer bulmak için çaba harcanmasını gerekli kılar. Ancak her hattın işletme şartları, geometrisi, malzeme karakteristiği, atmosfer şartları, taşıt özellikleri farklı olduğu için, kendine özgü bir davranışı vardır.

KAYNAKLAR

- [1] **Öztürk, Z.**, 1999. Yüksek Hızlı Demiryollarının Gelişimi ve Türkiye'nin Durumu. II. Ulaşım ve Trafik Kongresi – Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara, 29 Eylül – 2 Ekim.
- [2] **Öztürk, Z., ve Arlı, V.**, 2009. Demiryolu Mühendisliği. ATM Dijital Baskı, İstanbul.
- [3] **Öztürk, Z., ve Arlı, V.**, 2006. Kentiçi Raylı Sistemlerde Balastlı ve Balastsız Üstyapıların Uygulama, Bakım ve Maliyet Açılarından Karşılaştırılması, Uluslararası Demiryolu Sempozyumu, 13-15 Aralık.
- [4] **Öztürk, Z., ve Öztürk, T.**, 2005. Kentiçi Demiryolunda Balastsız Üstyapı Tasarımları ve Uygulama Esasları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-24 Eylül, Antalya, 372-383.
- [5] **Esvel, C.**, 2001. Modern Railway Track. MRT-Productions, Duisburg, Germany, ISBN 90-800324-3-3 (2nd Edition 2001).
- [6] **Eisenmann, J.**, 1995. Ballastless Track As An Alternative To Ballasted Track. Rail International, November, 19-27.
- [7] **Tuna, H.**, 2000. TCDD'de Yol Üstyapı Bakım Onarım Çalışmalarının Etkin ve Ekonomik Hale Getirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] **RTR, Slab Track**, 2006. Druckhaus Darmstadt GmbH, Germany. September, 32-36.
- [9] **Yalçın, N. S., ve Erel, A.**, 2007. Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapının Önemi ve Tasarım İlkeleri. 7. Ulaştırma Kongresi, 19-21 Eylül, İstanbul.
- [10] **Öztürk, Z., ve Arlı, V.**, 2010. Demiryolunda Gürültü ve Titreşim Sorunu. Marmara Yayıncılık, İstanbul.
- [11] **Hunt, G. A.**, 2005. Review of the Effect of Track Stiffness on Track Performance. A Report Produced for Rail Safety & Standards Board.
- [12] **Arlı, V.**, 2009. Demiryolu Titreşimlerinin Model Hat Üzerinde Çok Yönlü Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **RTR, Slab Track**, 2006. Druckhaus Darmstadt GmbH, Germany. September, 40-44.
- [14] **Pita, A. L., Teixeira, P. F., Robuste, F.**, 2004. High Speed and Track Deterioration: The Role of Vertical Stiffness of the Track. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part F: J. Rail and Rapid Transit.

EKLER

EK A.1 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastsız Üstyapı Malzeme Keşif
Özeti

EK A.2 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif
Özeti

EK A.3 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastlı Üstyapı Malzeme Keşif
Özeti

EK A.4 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastlı Üstyapı İşçilik Keşif
Özeti

EK A.1 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastsız Üstyapı Malzeme Keşif Özeti

Yenibosna – Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastsız Üstyapı Malzeme Keşif Özeti					
S.N.	Yapılacak İşin Cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	S.49.430. kg/m’lik 18.00 m boyda Ray normal 154 adet 2740.8 m	ton	137,02	550	75.361,00
2	S.49.430. kg/m’lik 18.00 m boyda Ray (Mantarı sertleştirilmiş) 248 adet 4427,64 m	ton	225,203	550	123.861,65
3	Cebire (804 adet)	ton	7,767	1065	8.271,86
4	Cebire bulonu (1608 adet)	ton	0,852	1160	988,32
5	Tek katlı rondela (1608 adet)	ton	0,106	3000	318,00
6	Basit makas 2 sağ, 2 sol, 1/9’luk R= 300 m 33,23 m boyunda	adet	4	34000	136.000,00
7	Ray kontray için (mevcut) 33,4 kg/m’lik 3740 m	ton	125	550	68.750,00
8	Ray kaynağı normal 160 / sert 250	adet	410	44	18.040,00
9	İzole cebire (kupon raylı) 4m’lik	adet	22	685	15.070,00
10	İşaretleme	ton	0,2	5400	1.080,00
11	Satın alınan ve beton pompasıyla basılan beton (BS 25 betonu)	m	3000	42,09	126.270,00
12	Düz yüzeyli beton ve betonarme kalıbı	m	3500	3.584	12.544,00
13	Çelik hasır (nervürlü)	ton	29	313,68	9.096,72
14	Çapı 8-12 mm’lik ince beton çelik çubuğunun (nervürlü) projesine göre bükülmesi	ton	40	216,89	8.675,68
15	Çapı 14-26 mm’lik kalın beton çelik çubuğunun (nervürlü) projesine göre bükülmesi	ton	60	213,95	12.836,76
16	Çeşitli demir işleri yapılması (hassas ayar ayakları) 100 adet	kg	4000	0,258	1.032,00
17	Vossloh sistem 336 elastik bağlantı malzemesi seti	adet	12200	50	610.000,00
	Genel Toplam				1.228.195,99

EK A.2 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif Özeti

Yenibosna – Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif Özeti					
S.N.	Yapılacak İşin Cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	Aplikasyon	m	3584	0,461	1.652,22
2	Yol malzemesinin depolara taşınması, boşaltılması, istifi ve muhafazası	ton	690	12,43	8.576,70
3	Depodaki yol malzemesinin poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	ton	690	5,825	4.019,25
4	Poz mahalline getirilen yol malzemesinin hat kenarına taşınması ve rayların markalanması	m	3584	1,861	6.669,82
5	UIC S.49 kg/m’lik ray ile doğrudan tespitli yol döşenmesi	m	3584	5,52	19.783,68
6	UIC S.49 kg/m’lik raydan yapılmış ahşap traversli makasın depoda indirilmesi istifi ve muhafazası	adet	4	194,443	777,77
7	Depodaki S.49 kg/m’lik raydan yapılmış makasın poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	adet	4	326,406	1.305,62
8	UIC S.49 kg/m’lik raydan yapılmış makasın doğrudan tespitli olarak montajı	adet	4	1078,283	4.313,13
9	Alimino termit ray ek kaynağı yapılması	adet	410	24,216	9.928,56
10	İzole kupon raylı cebire montajı	adet	22	9,436	207,592
11	Kontrayların bağlanması	m	1870	2,246	4.200,02
12	Rayların taşlanması	m	3584	4,6	16.486,40
13	İşaretlerin konması	m	3584	0,533	1.910,27
14	Yolun bir tarafa kaydırılması	m	375	2,555	958,13
15	Satın alınan ve beton pompası ile basılan BS 25 betonunun dökülmesi	m ³	2940	0,626	1.840,44
16	Düz yüzeyli beton ve betonarme kalıbı yapılması	m ²	3500	1,988	6.958,00
17	Çelik hasırın (nervürlü) yerine konulması	ton	29	94,77	2.748,33
18	Çapı 8-12 mm’lik çelik çubuğun yerine konulması	ton	40	141,062	5.642,48
19	Çapı 14-26 mm’lik çelik çubuğun yerine konulması	ton	60	116,464	6.987,84
20	Çeşitli demiri işleri yapılması	kg	3920	0,875	3.430,00
21	Poz bölgesinin inşaat atıklarından temizlenmesi	m	3584	0,362	1.297,41
	Genel Toplam				109.693,67

EK A.3 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastlı Üstyapı Malzeme Keşif Özeti

Yenibosna – Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastlı Üstyapı Malzeme Keşif Özeti					
S.N.	Yapılacak İşin Cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	S.49.430. kg/m’lik 18.00 m boyda Ray normal 154 adet 2740.8 m	ton	137,02	550	75.361,00
2	S.49.430. kg/m’lik 18.00 m boyda Ray (Mantarı sertleştirilmiş) 248 adet 4427,64 m	ton	225,203	550	123.861,65
3	Cebire (804 adet)	ton	7,767	1065	8.271,86
4	Cebire bulonu (1608 adet)	ton	0,852	1160	988,32
5	Tek katlı rondela (1608 adet)	ton	0,106	3000	318,00
6	Beton travers	adet	2900	45	130.500,00
7	Beton traversler için Vossloh W14 bağlantı sistemi malzeme seti	adet	2900	16	46.400,00
8	Ahşap travers (2 adet nervürlü seletli)	adet	3200	62	198.400,00
9	Ahşap traversler için Vossloh KS bağlantı sistemi malzeme seti	adet	3200	12	38.400,00
10	Basit makas 2 sağ, 2 sol, 1/9’luk R= 300 m 33,23 m boyunda	adet	4	34000	136.000,00
11	Ray kontray için (mevcut) 33,4 kg/m’lik 3740 m	ton	125	550	68.750,00
12	Ray kaynağı normal 160 / sert 250	adet	410	44,000	18.040,00
13	İzole cebire (kupon raylı) 4m’lik	adet	22	685,000	15.070,00
14	Balast	m ³	7900	4,50	35.550,00
15	İşaretleme	ton	0,2	5.400	1.080,00
	Genel Toplam				896.990,83

EK A.4 Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastlı Üstyapı İşçilik Keşif**Özeti**

Yenibosna – Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Balastlı Üstyapı İşçilik Keşif Özeti					
S.N.	Yapılacak İşin Cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	Aplikasyon	m	3584	0,461	1.652,22
2	Yol malzemesinin depolara taşınması, boşaltılması, istifi ve muhafazası	ton	1528	12,430	18.993,04
3	Depodaki yol malzemesinin poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	ton	1528	5,825	8.900,60
4	Poz mahalline getirilen yol malzemesinin hat kenarına taşınması ve rayların markalanması	m	3584	1,382	4.953,09
5	UIC S.49 kg/m’lik raydan yapılmış ahşap traversli makasın depoda indirilmesi istifi ve muhafazası	adet	4	194,443	777,77
6	Depodaki S.49 kg/m’lik raydan yapılmış makasın poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	adet	4	326,406	1.305,62
7	UIC S.49 kg/m’lik raydan imal edilmiş 34.2 m’lik makasın montajı	adet	4	2776,281	11.105,12
8	Delinmemiş, sabotesiz makas traverslerinin sabote edilmesi ve delinmesi	takım	4	245,649	982,60
9	Depolardaki 1. tabaka balastın platform üzerine taşınması	m ³	3950	3,580	14.141,00
10	Platform üstündeki balastın kordon halinde figure edilmesi	m ³	3950	6,152	24.300,40
11	Kordon halindeki balastın profile göre platforma serilmesi ve sıkıştırılması	m ³	3950	3,445	13.607,75
12	2. tabaka balastın vagonlara yüklenmesi, iş yerine nakli, boşaltılması ve hatta döşenmesi	m ³	3950	10,254	40.503,30
13	2. tabaka balast üzerinde rölevaj, dresaj, buraj (en az iki defa) yapılması	m	3584	7,414	26.571,78
14	UIC S.49 kg/m’lik rayla poz yapılması	m	3584	15,216	55.534,14
15	Delinmemiş, sabotesiz normal hat traverslerinin sabote edilmesi ve delinmesi	adet	2950	2,851	8.410,45
16	Yapılacak poz ve balastın tacili zamları	m	3584	2,796	10.020,86
17	İşletmeye açılmış yolda 1. ay bakımı	m	3584	1,930	6.917,12

18	İşletmeye açılmış yolda 2. ay bakımı	m	3584	1,839	6.590,98
19	İşletmeye açılmış yolda 3. ay bakımı	m	3584	1,484	5.318,66
20	İşletmeye açılmış makasta 1. ay bakımı	m	4	305,506	1.222,02
21	İşletmeye açılmış makasta 2. ay bakımı	m	4	305,506	1.222,02
22	İşletmeye açılmış makasta 3. ay bakımı	m	4	305,506	1.222,02
23	Alimino termit ray ek kaynağı yapılması	adet	410	24,216	9.928,56
24	Izole kupon raylı cebire montajı	adet	22	9,436	207,59
25	Kontrayların bağlanması	m	1870	2,246	4.200,02
26	Rayların taşlanması	m	3584	4,600	16.486,40
27	İşaretlerin konması	m	3584	0,533	1.910,27
28	Yolun bir tarafa kaydırılması (ripajı), yeniden dresaj ve burajının yapılması	m	375	12,173	4.564,88
29	Poz bölgesinin inşaat atıklarından temizlenmesi	m	3584	0,362	1.297,41
	Genel Toplam				301.847,70

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Osman ŞAHİN

Doğum Yeri ve Tarihi : Kırıkkale-04.11.1982

Lisans Üniversitesi : İstanbul Teknik Üniversitesi