



Makale / Research Paper

**Hafif Raylı Sistemlerde Köprü ve Balastsız Hat Geçiş Bölgelerinin
Örnek Bir Çalışma ile İncelenmesi**

Fahrettin Ersin ERBAŞ^{*1}, Zübeyde ÖZTÜRK²

¹İTÜ FBE, Ulaştırma Mühendisliği Programı, 34485, Ayazağa, İstanbul, erbasersin@gmail.com

²İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü-Ulaştırma, 34485, Ayazağa, İstanbul, ozturkzu@itu.edu.tr

Received/Geliş: 16.12.2017

Revised/Düzeltilme: 22.12.2017

Accepted/Kabul: 26.12.2017

Özet: Demiryollarında açık hat ile köprü/viyadük yapısı arasındaki geçiş bölgeleri; demiryolu yapısının aniden değiştiği bölgelerdir. Bu değişim sebebiyle zemin oturmaları, üstyapı ve altyapı bozulmaları ve yüksek maliyetli bakım ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır. Demiryolu köprüleri genellikle derin temellere sahip, minimum düzeyde oturma yapan, stabil ve rijit yapılardır. Ancak yaklaşım bölgeleri dolgu zeminde bulunur ve tekrarlayan tekerlek yükleri ile daha yüksek miktarda düşey seviye değişimine uğrarlar. Geçiş bölgesinde karşılaşılan en önemli problem bu ani seviye değişiminin yarattığı dinamik yüklemeye etkisidir. Demiryolu hatlarında rijitlik değişimlerinin mümkün olduğunca yavaş ve kademeli olması istenmektedir. Aksi durumda hem yolculuk konforu, hem de demiryolu alt ve üstyapısı olumsuz yönde etkilenecektir. Oluşan deformasyonlar zamanla ağır bakım maliyetlerine dönüşecektir. Geçiş bölgelerinde, özellikle doğal zeminin çok stabil olmadığı durumlarda, bu rijitlik değişimine sıklıkla rastlanmaktadır. Demiryolu geçiş bölgelerinde karşılaşılan sorunlar ile ilgili alınan önlemler iki ana kısımda incelenmektedir. Bunlardan birincisi altyapıda ve zemin elemanlarında alınan önlemlerdir. Bu makalede geçiş bölgesinde karşılaşılan sorunlar ve çözüm yöntemleri anlatılmıştır. Bununla beraber, kullanılan en yaygın iki yöntem (teknik blok ve yaklaşım plakası uygulaması) sonlu elemanları analizi ile irdelenerek sağladığı faydalar araştırılmıştır. Çalışmada, hiçbir iyileştirme yöntemi uygulanmayan durumlarda oluşan oturmalar belirlenmiştir ve iyileştirme yöntemleri uygulandıktan sonraki değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kullanılan yaklaşım plakası ve teknik blok yöntemlerin zemin oturma eğilimini engellemeye yönelik ciddi bir katkı yaptığı ve hattaki seviye değişimlerini istenen düzeyde tutmaya yardımcı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balastsız üstyapı, hafif raylı sistem, altyapı, demiryolu köprüsü, hat geçiş bölgesi

**Investigation of Transition Zones Between Bridge and Balastless Track for
Ligth Rail Transit Systems with a Case Study**

Abstract: Transition zones between open track and bridge structures in railway are affected by abrupt structural changes. According to these changes; settlements, rail structure deteriorations and high maintenance costs are occurred. Railway bridges have deep foundations and with this regards they have nearly rigid structure and have low settlements. Main problem in transition zones is increased dynamic load effects that is originated by abrupt level changes. The stiffness changes in these areas are demanded as slightly as possible to reduce effect of elastic track deflections which cause dynamic loads and localised degradation. Otherwise both drive comfort and safety are effected negatively. Deformations that sourced by different settlements in transition zones cause high cost of maintenance. Differential settlement of the backfill also affects dynamic loading in transation zones dramatically. In order to prevent these affects; there are two major types of solution. These methods can be categorised as “modifying substructure and subgrade elements” such as and “modifying superstructure elements”. In this paper, reasons of problem and remedial methods are listed in order to analyse their contrubituon to reduce effects. For this aim, two major effective methods (approach slab and technical block) are investigated by using finite element method with computer models and results are compared with open track situation with no any preventive improvement. According to study, open track without any improvement and transition track to bridge approach

Bu makaleye atıf yapmak için

Erbaş, F.E., Öztürk, Z., “Hafif Raylı Sistemlerde Köprü ve Balastsız Hat Geçiş Bölgelerinin Örnek Bir Çalışma ile İncelenmesi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(1); 126-135.

How to cite this article

Erbaş, F.E., Öztürk, Z., “Investigation of Transition Zones Between Bridge and Balastless Track for Ligth Rail Transit Systems with a Case Study” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2018, 5(1); 126-135.

models demonstrates settlements. However, it is observed that both used improvement methods (technical block and approach slab) have good performances in order to prevent different settlement of ballastless track.

Keywords: Ballastless track, light rail transit, railway, railway bridge, infrastructure, track transition

1. Giriş

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

Hat alt ve üstyapısının yol boyunca benzer elastisiteye sahip olması hareket halindeki trenlerin hem konforu için hem de uzun vadede oluşacak bakım gereksinimlerini azaltabilmek için çok önemlidir. Bu sebeple uzun ömürlü bir demiryolu yapısı inşa edebilmek için hatta oluşacak bu ani yapısal değişimlerin olma ihtimali olan bölgeler tasarım aşamasında tespit edilmelidir. Gerekli iyileştirme uygulamalarının yapılmadığı durumlarda çok ağır bakım maliyetleri ve hat performansında düşüşler, üstyapı ve altyapı hasarlarının tekrarlayan tren yükleri ile beraber meydana gelir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırma sadece bu geçiş bölgelerinde yapılan bakım çalışmaları sebebiyle yıllık 200 Milyon \$ harcadığını belirlemiştir [1]. Bu yüksek bakım maliyetlerinin ve hattaki deformasyonların önüne geçmek için farklı iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir.

Bu makalede, hafif raylı sistemelerin köprü/viyadük yaklaşım bölgelerinde, uzun vadede karşılaşılan sorunlar, bunların nedenleri ve alınabilecek önlemler incelenecek ve hafif raylı sistem için köprü yaklaşım bölgesinde uygulanan iyileştirme yöntemleri ve bu yöntemlerin normal duruma göre sağladığı katkılar sayısal olarak irdelenecektir.

2. Demiryolu-Köprü Geçiş Bölgelerinde Karşılaşılan Sorunlar

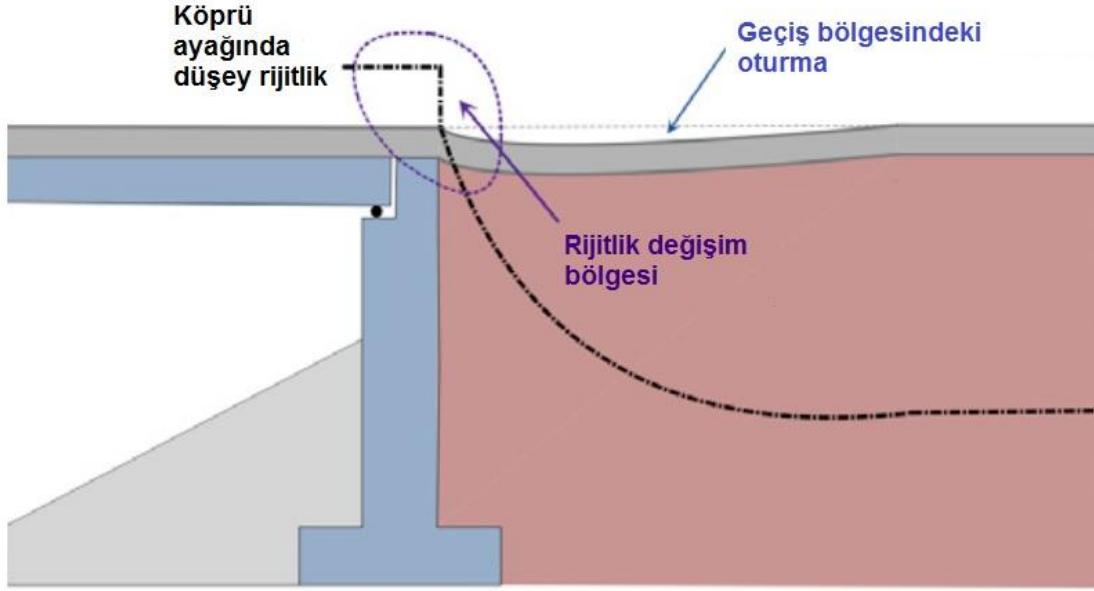
Geçiş bölgelerinde hattın servis ömrü boyunca farklı altyapıların farklı elastik davranışlarından kaynaklanan bazı sorunlar oluşmaktadır. Geçiş bölgesinde gözlemlenen bu sorunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

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

Bu sorunların ortaya çıkmasını engelleyecek önlemleri alabilmek için bu sorunların nedenlerini doğru tespit etmek gerekmektedir.

3. Demiryolu-Köprü Geçiş Bölgelerinde Karşılaşılan Sorunların Kaynakları

Bu sorunların kaynağını incelersek; köprüler ve viyadükler gibi sanat yapıları, derin temeller üzerine inşa edilen, zemin oturmalarına dayanıklı yapılardır. (Şekil 1’de görüldüğü gibi) köprü yaklaşım bölgeleri dolgulardan meydana gelmekte olup, genellikle yüklemeye ile beraber köprülere kıyasla büyük miktarda oturmaların olduğu bölgelerdir.



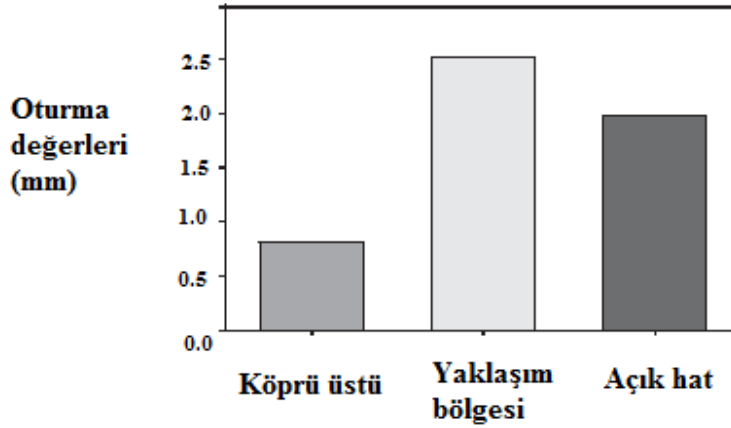
Şekil 1. Köprüde oluşan oturma bölgesi

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

Bazı durumlarda köprüdeki rijitlik değeri açık hattaki değer iki katına kadar çıkabilmektedir. Bundan dolayı hattaki sürüş konforu düşer, köprüye yaklaşım bölgesinde, demiryolu yapısındaki elemanlarda ek bir gerilim oluşur ve köprü üzerindeki dinamik yüklemeye artar [2]. Dinamik etkiler minimal düzeyde olsa bile geçiş bölgesinde zemin üzerine oturan hat, köprü üzerindeki hattan daha fazla oturma eğilimi gösterir. Bu durum özellikle derin temeller üzerine inşa edilmiş köprünün yüksek rijitliğe sahip olması nedeniyle oturma durumunun ihmal edilecek kadar küçük olduğu durumlarda gözlenir ve geçiş bölgesinin olduğu bölgedeki balast tabakası altında zamanla bir çukur oluşur. Oturmaların kaynağı sadece geçiş bölgelerindeki farklı rijitlikler yüzünden oluşan ray seviye değişimleri ile oluşan ani dinamik yük etkileri değildir. Bununla beraber iyi sıkıştırılmamış zeminler, yetersiz drenaj, erozyon, çevresel faktörler, donma-çözülme olayları ve doğru zeminler ile dolgu yapılmamasıdır.

Köprü ile açık hat arasındaki seviye değişiminin yarattığı ana problem, düşey tekerlek ivmelenmesini artırarak dinamik bir yüklemeye durumu oluşmasına neden olmaktadır. Bu etki tekrarlayan tekerlek yükleri ile hat alt ve üst yapısında büyük aşınmalara ve şekil bozukluklarına yol açar. Bu yüzden uzun süreli hat kullanımında birçok sorun ve ağır bakım maliyetleri oluşmaktadır. Şekil 2’de ise geçiş durumunda farklı bölgelerdeki oturmaların mm seviyesinde

karşılaştırmaları verilmiştir, [3]. Burada görüldüğü gibi yaklaşım bölgesindeki oturma değerleri köprü üzerindeki değerlerden 4 kat daha fazladır. Bu seviye farkı tekrarlayan tekerlek yükleri ile yıllar içinde artar ve ağır bakım yüklerine ve hat işletmesinde kesintilere neden olur. Bu sebeple alınabilecek önlemler hat inşasında alınmalıdır.



Şekil 2. Oluşan oturmaların farklı bölgeler için karşılaştırılması

4. Geçiş Bölgelerinde İyileştirme Çalışmaları

Geçiş bölgesinin başarıyla tasarlanması ve inşa edilmesi bu bölgeyi etkileyen birçok faktör yüzünden zorlaşmaktadır. Birçok mevcut demiryolunda yapılan yetersiz geçiş bölgesi çalışmaları ve inşa hataları, hattın servis ömrü boyunca tekrarlayan bakım yükleri, servisin yarım kalması, üstyapıda ortaya çıkan önemli bozulmalar gibi sonuçları doğurmaktadır. Yapım aşamasında alınmayan önlemlerin yerine telafisi zor durumlar oluşmaktadır. İdeal bir geçiş bölgesi, sorunların ana kaynağı olan rijitlik farkına sahip iki bölge arasındaki farklı oturmaları asgari düzeye indirmelidir. Bunun için alınabilecek önlemler ve değişik uygulamalar araştırılmıştır. Başarılı sonuç veren iyileştirme yöntemleri iki ana başlıkta aşağıdaki gibi sıralanabilir [4];

Çizelge 1: Geçiş bölgesinde iyileştirme uygulamaları

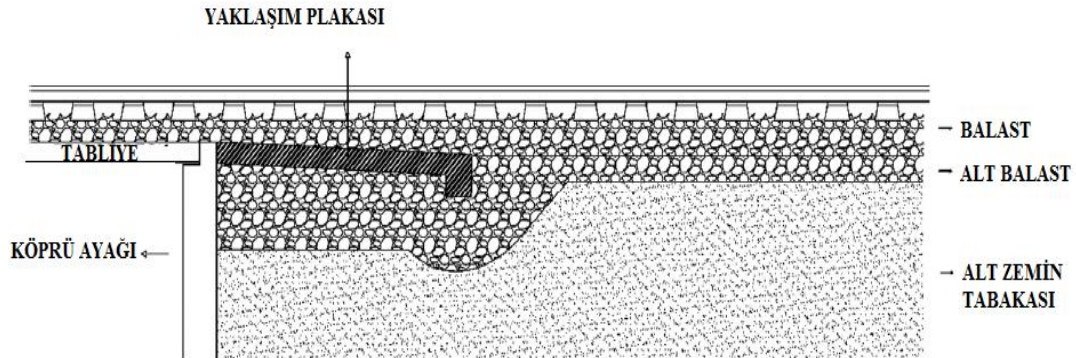
Raylı Sistemlerde Geçiş Bölgesi İyileştirme Uygulamaları	
Altyapı ve zemin elemanları üzerinden yapılan uygulamalar	Üstyapı elemanları üzerinden yapılan uygulamalar
Balast altında asfalt tabakası (HMA) kullanılması	Ek ray uygulaması
Taş kolon ve kazık uygulamaları	Farklı rijitlikte pedlerin köprü üstyapısında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

Geçiş bölgelerindeki iyileştirme yöntemlerinin iki temel amacı bulunmaktadır. Bunlar; iki farklı bölge arasındaki oturma farklılıklarını azaltmak ve farklı rijitlik seviyeleri arasındaki ani geçişi en aza indirmektedir. Altyapı ve zeminde yapılan uygulamalar genellikle bu amaca sahiptir ve zemini güçlendirerek oturmaları azaltmaya yarar. Üstyapı elemanları üzerinden yapılan uygulamalar ise rijitlik seviyesindeki farkları azaltarak üstyapı elemanlarındaki deformasyonların azaltılmasını ve dolaylı olarak dinamik yükleme etkisini düşürmeyi amaçlar.

Yaklaşım plakası uygulaması

Betonarme yaklaşım plakaları bir ucu köprü kenarına oturan ve zemine doğru eğimle yukarıdan aşağıya doğru veya zemine paralel olarak alt zemin tabakasını destekleyen ve rijitliği arttırmaya yarayan mesnet yapılarıdır. Bununla beraber yaklaşım plakaları zemindeki serbest suyun alt zemin ve dolgu tabakalarına geçişini önlemede görev alır ki, bu plastik oturma durumunun önüne geçmek için çok önemlidir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, yaklaşım plakası kullanılan geçiş bölgesinde, açık hatta göre %40'a yakın daha az oturma gözlemlenmiştir. Zeminde biriken sıvı dolgudaki mukavemeti düşürecek ve zamanla oturmaları yol açacaktır. Ayrıca yaklaşım plakaları toprak hareketlerinin ve erozyonun önlenmesinde de kontrole yardımcı olmaktadır.

Tasarıma ve inşa edilecek yerdeki koşullara bağlı olarak değişmek ile beraber AREMA Standardında 6m uzunluk, minimum tavsiye edilen uzunluktur. Ancak yaklaşım mesafesine göre ve kullanılan diğer önlemler ile beraber bu uzunluk kısalabilir. Bu yöntem sayısal örnek çalışmada incelenecek yöntemlerden biridir ve yöntemin uygulanması ile oluşacak oturma miktarları sayısal olarak irdelenecektir.



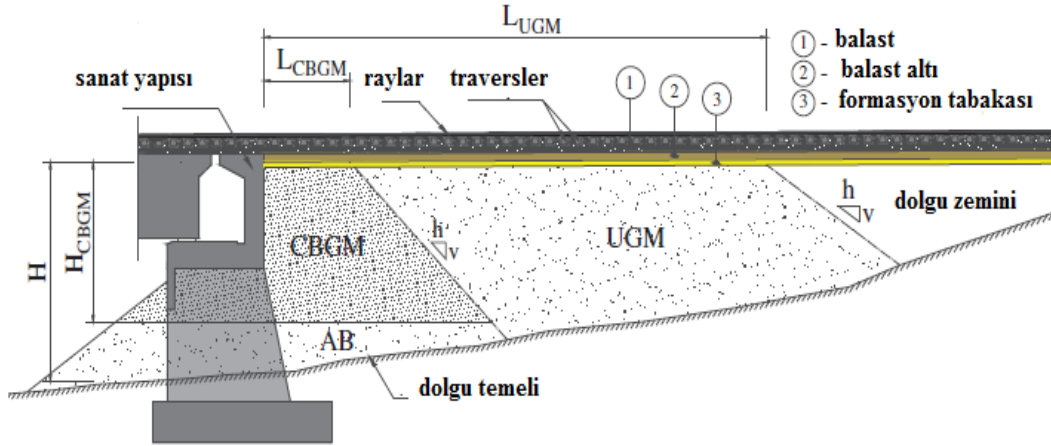
Şekil 3. Köprü geçiş bölgesinde yaklaşım plakası ve altyapı elemanları [4]

Geçiş bölgesindeki dolgu zeminini iyileştirme teknikleri (Teknik Blok uygulaması)

Köprü yaklaşım bölgesinde karşılaşılan sorunları (oturmalar, rijitlik farklılığı ve dinamik yükleme durumu vb.) önlemek, bakım süresini uzatmak ve bakım maliyetini düşürmek için en verimli yöntemlerden biri geçiş bölgesinde yapılacak zemin iyileştirme çalışmalarıdır. Bu çalışmalar farklı demiryollarına göre değişkenlik göstermektedir. Dolgu uygulama bölgesi birçok projede en az 15-20 m veya köprü ayağının 4 katı uzunluğunda alınmaktadır. Güçlendirilen özel dolgu tabakaları farklı oturmaları engellediği gibi aynı zamanda rijitlik değişimleri arasında yumuşak bir geçiş sağlamaya da yardımcı olmaktadır. Bu amaçla kullanılan dolgu malzemeleri yüksek elastisite modülüne sahip ve plastik deformasyonlara karşı dayanıklı olanlar arasında seçilmektedir. Genellikle geçiş bölgesindeki dolgularda kullanılan malzemeler bu özelliklere sahip olan; bağlanmamış granüllü malzemeli (UBM) ve çimento ile bağlanmış granüler

malzemeli (CBGM) zeminlerdir. Ülkeden ülkeye bu uygulamanın ismi “teknik blok” veya “geçiş kamalı zemin” olarak değişmektedir.

Şekil 4’de şematik bir zemin güçlendirmesi uygulaması görülmektedir. Buradaki dolgu yüksekliğine (H) göre, dolgunun sanat yapısından önce veya sonra yapılmasına göre veya sanat yapısının türüne göre geçiş bölgesi geometrisinde değişimler olabilir [5].



Şekil 4. Geçiş bölgesinde dolgu ile iyileştirmenin şematik gösterimi [2]

Çeşitli geçiş bölgesi uygulamaları incelendiğinde aşağıdaki bazı özellikler benzerlik gösterir;

- Dolgu tabakaları sanat yapısından geriye doğru 20 m uzunlukta bir alana yayılır,
- Kademeli geçişi sağlayabilmek için köprüye doğru eğim artırılır (3:2, 2:1 gibi eğimlerde).
- CBGM tabakası 1:1 eğimle ve yüzde %3 ile %5 arası bağlayıcı malzeme (çimento, kireç vb.) oluşturulur.
- Geçiş bölgesi boyunca dolgu ve CBGM tabakası arasında iyi sıkıştırılmış bir UGM tabakası yerleştirilir.
- Köprü ve CBGM tabakası arasında drenajı sağlayabilmek için bir ayırıcı tabaka tasarımı yapılır.
- Toprak işleri uygulamasının doğru şekilde uygulanması için; zemin tabakaların uygun geometrelerinin belirlenmesi gerekir, tabakalara yeterli sıkıştırma uygulanmalıdır,
- Düzgün bir rijitlik geçişi sağlanması için tren hızları göz önüne alınarak, uygun dayanıma sahip malzeme özellikleri belirlenmelidir,
- Uzun vadede oluşacak oturmalar asgari seviyeye indirilmelidir,
- Zemin malzemeleri homojon dağılıma sahip olmalı, eşdeğer zemin yoğunluğu sağlanmalıdır,
- İnşaat aşamasındaki uygulamaların kalite kontrolü tasarıma uygun olarak yapılmalıdır ve sahada titizlikle takip edilmelidir.

5. Örnek Bir Hafif Raylı Sistem Geçiş Bölgesi İçin Sayısal İrdelemeler

Tasarım prensipleri

Yapılan model çalışmasında, balastsız bir hat üzerinde dinamik tekerlek yükü 115 kN olan bir hafif raylı sistem aracı için 16 m uzunluğunda bir model kesitinde statik yükleme durumu incelenmiştir. Hafif raylı sistem taşıtının tekerlek yükü 65 kN, dingil yükü ise 130 kN'dur. Ancak daha belirgin sonuçlar alınması için, seçilen tekerlek yükü normalden %75 daha fazla alınmıştır. Bunun nedeni hız ile beraber tekerleklerin yaratacağı dinamik yükleme durumunun tasarımda etkin olmasıdır. 2 dingilin (4 tekerlek) etkidiği durum ve oturma limitleri 2mm olarak alınmıştır.

Aracın tasarım hızı 80 km/saat'tir. "HyperWorks" programı kullanılarak, sonlu elemanlar analizi yöntemi yardımıyla oturma analizleri yapılmıştır.

Örnek çalışmadaki hattın üstyapı özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Balastsız beton üstyapıdır ve altında ince temel beton taşıyıcı tabakası vardır,
- Sıkıştırılmış alt zemin tabakasının elastisite modülü $E = 50 \text{ Mpa}$,
- Doğal zeminin elastisite modülü $E = 100 \text{ MPa}$ 'dır,
- Hat Açıklığı 1435 mm,
- Balastsız üstyapı taşıyıcı döşemesi 2400mm genişlikte, 5250mm uzunlukta, 200mm kalınlıkta betonarme, 3 arda arda döşeme olarak tanımlanmıştır. Üstyapı beton sınıfı C35/45'tir.
- Alt taşıyıcı tabaka 2600mm genişlik ve 150mm kalınlıkta taşıyıcı döşeme altında sürekli bir alt tabaka oluşturur, malzemesi C20/25 betondur.
- Bağlantı elemanı aralığı 750mm'dir.
- Ray 54G2 oluklu ray eşdeğeri.
- Yaklaşım plakası ebatları; uzunluk:5.15m, genişlik:3.0m ve yükseklik:0.40m'dir. Malzeme C35/45 donatılı betondur.

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

Oturma limitleri

Oturma limitleri örnek çalışmadaki model için altyapı ve üstyapıda 2 mm olarak alınmıştır. Seçilen zeminin nispeten sağlam bir kireç taşı malzemesinden oluştuğu düşünülerek, gerçekçi limitler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu değerlerin içinde elastik üstyapı elemanlarının esnemeleri de bulunmaktadır.

İrdelenecek durumlar

Örnek çalışmada 4 ana durum için sayısal inceleme yapılmıştır. Bunlar;

- **Durum 1:** Açık demiryolu hattında sadece sıkıştırılmış dolgu altında doğal zeminin tekerlek yükleri altında zemin davranışı,
- **Durum 2:** Köprü yaklaşımında herhangi bir iyileştirme uygulanmadığı durumdaki davranış,
- **Durum 3:** Köprüye geçişte betonarme yaklaşım plakası uygulandığı durumdaki zemin davranışı,
- **Durum 4:** Geçiş bölgesindeki dolgu zeminini iyileştirme teknikleri (Teknik Blok uygulaması) uygulandığındaki zemin davranışı.

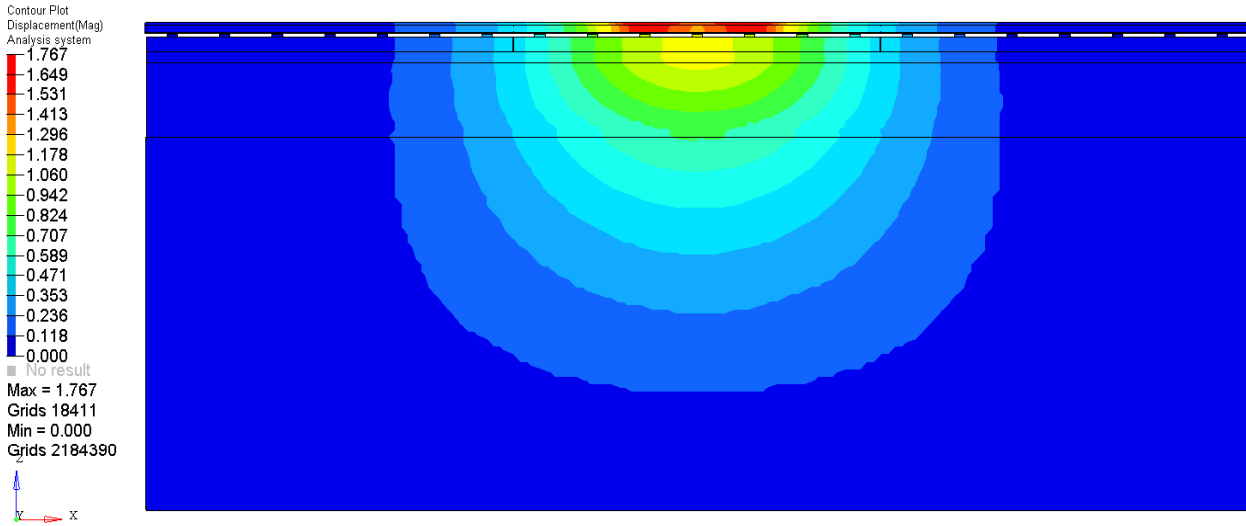
Malzeme özellikleri

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

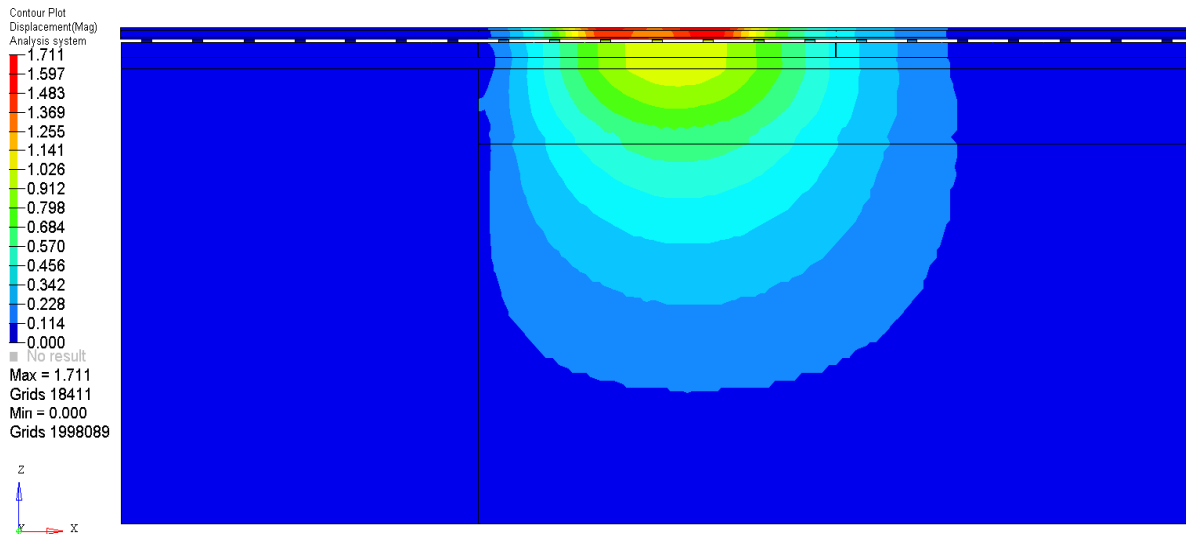
Çizelge 2: Örnek çalışmada kullanılan malzeme özellikleri

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

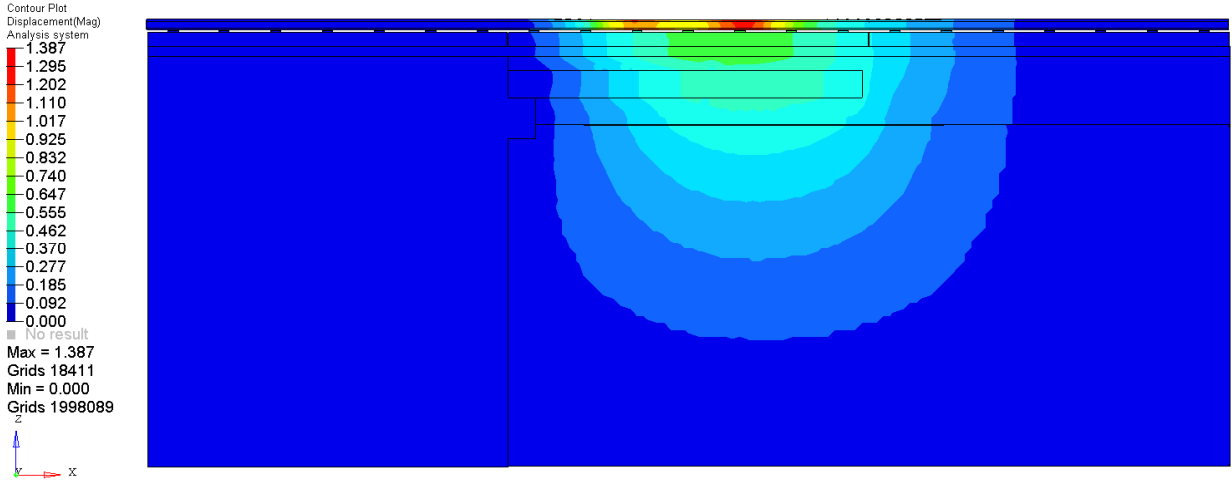
Model ve çözüm çalışmaları



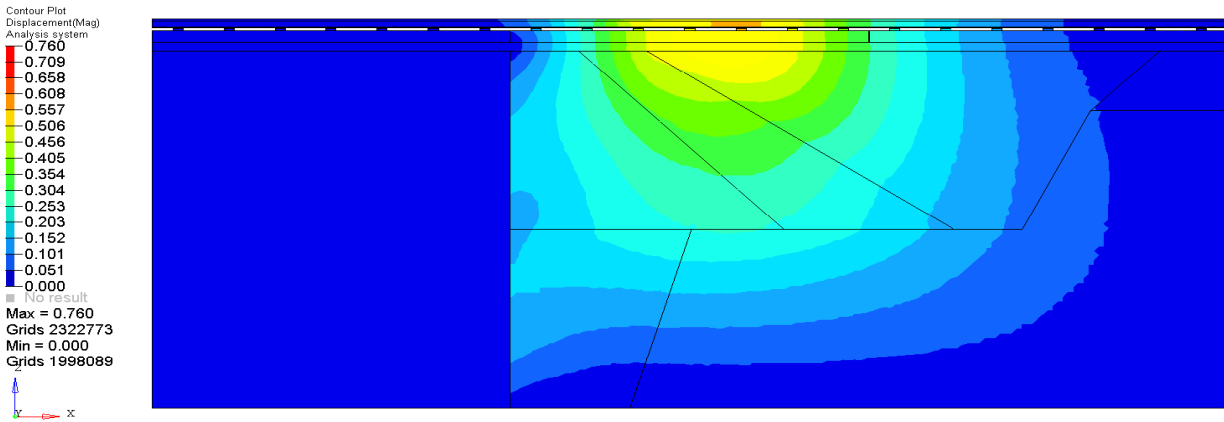
Şekil 5. Serbest zemin durumu oturma analizi



Şekil 6. Köprü yaklaşımlı serbest zemin durumu oturma analizi



Şekil 7. Köprü ile balastsız hat geçişinde yaklaşım plakası uygulaması durumunda oturma analizi



Şekil 8. Köprü balastsız hat geçiş bölgesinde teknik blok uygulanması durumunda oturma analizi

Örnek çalışmada 4 farklı durum için "HyperWorks" programı kullanılarak, sonlu elemanlar analizi yöntemi yardımıyla yapılan oturma analizlerinin sonuçları Şekil 5-8 de görülmektedir. Serbest zemin ve köprü yaklaşımındaki açık hat durumlarında analizi yapılan oturma değerlerinin belirlenen limit değerlere çok yaklaştığı saptanmıştır. Ayrıca tekerleğin temas içinde olduğu bölümler incelendiğinde, oturma bölgelerinin bu bölgelerde, ray üstünde toplandığı görülmüştür. Bu bölgelerdeki sorun zaman içinde istenmeyen ray seviye değişimleri ve üstyapı bozulmalarına neden olabilir. İyileştirme uygulanmayan serbest zemin durumu ve köprü yaklaşımında serbest zemin durumunda oturma sırasıyla; 1.77mm ve 1.71 mm olarak dingil bölgelerinin alt tarafında yoğunlaşarak oluşmuştur.

Yaklaşım plakası kullanımının balastsız üstyapı köprü geçiş bölgesinde oturmaları engellemek için ciddi bir katkı yaptığı analiz sonuçlarından görülmektedir. Oluşan en büyük oturma değeri 1.38 mm civarında olmuştur (Şekil 7) ve zemin altındaki oturmalarda daha geniş bir bölgeye, daha az seviyelerde iletilmiştir. Arka tekerde 1.38 mm olan maksimum oturma değeri ön tekerde daha da azalarak 1.11 mm civarına kadar düşmüştür. Ayrıca zemin altında kullanılan bu rijit mesnet tekerleklerden iletilen yükü ön ve arka tekerlek bölgelerinde normal zemin durumuna göre daha iyi sönmülmüş ve bu bölgedeki oturmalarda azaltmıştır. Bununla beraber balastsız üstyapıyı desteklemiş ve bölgenin rijitliğini arttırmıştır. Teknik blok iyileştirmesinde, köprü ayağına yakın taraftaki dolgu zeminde %3 civarında çimento bazlı karışım kullanılacağı varsayılmış ve köprü ile olan düşey sürtünme katsayısı 0.5 olarak alınmıştır. Zemin iyileştirmelerini irdeleyen bu modelin analizi, en iyi geçiş bölgesi performansını teknik blok uygulamasının verdiğini göstermiştir. En yüksek oturma değeri 0.65 mm olarak bulunmuş ve belirlenen oturma limitlerinden çok daha düşük çıkmıştır (Şekil

8). Daha önemlisi herhangi bir bölgede, tekerlek temas bölgesi dahil yüksek bir oturma görülmemiş ve zemin katmanları içinde derinlere yayılan düşük oturma değerleri oluşmuştur.

6. Sonuçlar

Demiryolu yapısı birbiri ile iç içe geçen birçok katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar demiryolu taşıtının temas kurduğu raylar ile başlar ve altyapının en altındaki doğal zemin tabakasına kadar uzanır. Demiryolu yatırımlarının güvenli, konforlu, uzun ömürlü ve çevreye duyarlı olması beklenmektedir. Bu beklentilerin karşılanması için yapısal tasarım kritik öneme sahiptir. Demiryolu üst ve altyapısının amacı taşıta elastik bir destek görevi görmektedir. Hattaki ani rijitlik değişimleri hem üstyapı hem de altyapı elemanlarına büyük zararlar vermekte ve zaman içinde bakım maliyetlerini fazlasıyla artırmaktadır. Raylı sistemlerde açık hattan köprü/viyadük bölgesine geçişlerde, bu ani rijitlik değişimleri sıklıkla görülmektedir. Bunun temel sebebi, derin temeller üzerinde duran çok yüksek rijitliğe sahip sanat yapısı ile elastik davranış gösteren zemin tabakasının farklı rijitlik değerlerine sahip olmasıdır. Tekerlek yükleri bu geçiş üzerinde seyrederken, iki bölgede oluşan farklı zemin oturmaları, seviye farklılıklarına neden olmaktadır. Zaman içinde bu seviye farklılığı demiryolu yapısına gelen düşey yöndeki dinamik etkiyi artırır ve hem üstyapı hem de altyapıyı hasara uğratar. Traverslerde kırılma, ray çatlakları, şekil bozuklukları ve zemindeki oturmalar bu hasarlardan en önemlileridir. İyileştirmelerde genel amaç zemin stabilitesinin artırılmasıdır. Bu amaçla teknik blok, beton yaklaşım plakası, balast altında asfalt tabaka kullanılması, taş kolon-kazık uygulamaları ve geotekstil kullanımı en başarılı sonuç veren yöntemlerdir. Yöntemler mevcut zemin durumuna göre farklılık gösterebilir.

Üstyapı elemanlarında ise; geçiş bölgesinde ek ray uygulaması, balastın stabilitesinin özel yapışkanlar yardımı ile artırılması, genişleyen travers bölgesi yapılması ve köprünün rijitliğini azaltmaya yönelik ped ilaveleri alınabilecek önlemlerden bazılarıdır.

Örnek bir balastsız üstyapı ile köprü geçiş bölgesi çalışmasında, sonlu elemanlar analizi kullanılarak, HyperWorks yazılımı yardımıyla, belirlenen 16 m'lik geçiş bölgesi için, 2 mm seviyesindeki oturma limitlerini sağlanıp sağlanamadığı, 4 farklı durum için incelenmiştir. Örnek çalışma sonucunda görüldüğü gibi geçiş bölgesinin performansı, altyapının stabilitesinin artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Zemin analizleri sonucunda görülmüştür ki, eğer bölgedeki mevcut zemin oturmaya elverişli bir zemin ise, bu bölgeye teknik blok uygulaması yapılması hattın uzun ömürlü ve konforlu olması için faydalıdır. Bununla beraber yaklaşım plakası da uygulanabilecek bir başka alternatif metot olarak ele alınabilir [5].

Kaynaklar

- [1] Sasaoka, C., Davis, D., Guilen D., Damping Pads and Track Designs for Reducing Impacts at Special Trackwork, *Transposrtation Tech. Center, Inc.* Pueblo, Colorado, ABD, 2004
- [2] Paixao, A., Fortunato E., Calçada R. Design and construction of backfills for railway track transition zones, *Instituiton Mechanical Engineers, Journal of Rail and Rapid Transit*, 2013,
- [3] Banimahd, M. Woodward, P., Kennedy, J., Medero G. Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions, *Institution of Civil Engineers, ICE Proceedings, Transport*, 2010, Volume 165, Issue TR3.
- [4] Sanudo, R., Casado, J. A. Track transitions in railways: A review, *Construction and Building Material Journal*, 2016, Volume 112, Sayfa 140-157., İstanbul.
- [5] Erbaş, F.E., Hafif Raylı Sistemlerde Köprü ile Balastsız Üstyapı Geçiş Bölgelerinin İrdelenmesi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.