

## Demiryolu Köprülerinde Yapı Zemin Etkileşimi

\*<sup>1</sup>Koray Şen ve <sup>2</sup>Hakan Güler

\*<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Sakarya, Türkiye

### Özet

Bu çalışmada, Almanya'nın Karlsruhe şehrinde bulunan Weiherfeld demiryolu köprüsünün yapı-zemin etkileşimi üzerine bir araştırma yapılmıştır. Weiherfeld köprüsünün üzerinden geçen hareketli tren yüklerinin etkisinde, köprü'nün belli bir zaman aralığında davranışı ile köprü'nün zemine aktarılan yükleri altında zeminde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmelerinin analizi yapılmıştır. Bu amaçla, köprü'nün yapısal modeli SAP 2000 sonlu elemanlar programı ile oluşturulmuş, yolcu ve yük trenlerinin dingil ağılıkları ve tren hızları dikkate alınarak yüklemeler hareketli yük olarak programda tanımlanmıştır. Bu yükleme senaryosunda köprü kiriş ve kolonlarında meydana gelen yükler ve deformasyonlar hesaplanmıştır. Daha sonra, PLAXIS programında killi zemin tipi dikkate alınarak köprü ayakları altında sürekli bir zemin ortamı modellenmiştir. SAP 2000 programından elde edilmiş dinamik yükler, PLAXIS programında oluşturulan zemin modeline aktarılarak yapı-zemin etkileşimi üzerine analizler yapılmış ve bu etkileşimin üstyapıya olan etkisinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Demiryolu köprüsü, Sonlu elemanlar yöntemi ve Yapı-zemin etkileşimi.

## Soil-Structure Interaction In Railway Bridges

### Abstract

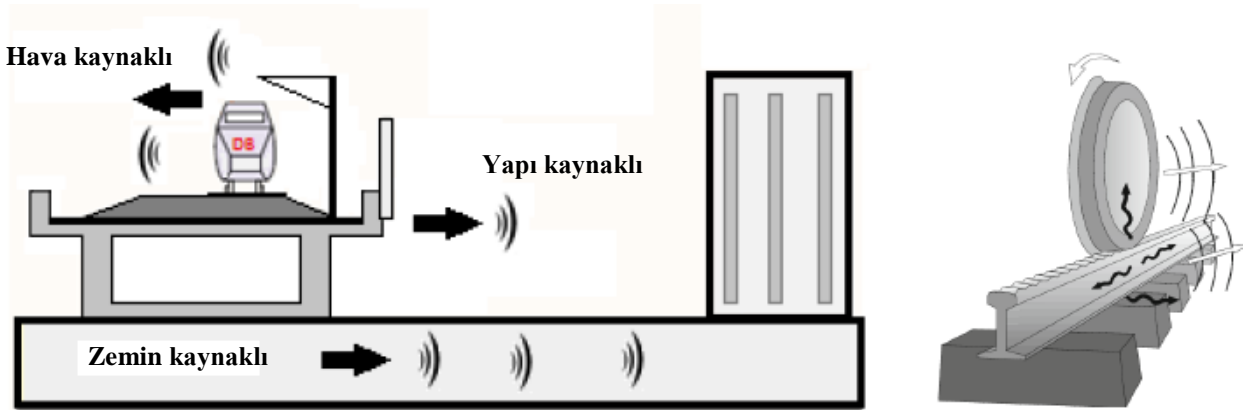
In this study, a research was made on the soil-structure interaction of the Weiherfeld railway bridge in Karlsruhe, Germany. The structural behavior of Weiherfeld bridge was analysed under freight and passenger trains for a while and in addition soil stress and strain analyses were performed considering the loads coming from the bridge structure. For this purpose, the structural model of the bridge was created with the SAP 2000 finite element program and the loads were defined in the program as the moving loads considering the axle loads and speeds of the passenger and freight trains. In this loading scenario, the loads and deformations occurring in the bridge beams and columns are calculated. Later on, a continuously soil structure was modeled in the PLAXIS program under the piers of bridges by taking into consideration a clayey soil structure type. The dynamic loads obtained from the SAP 2000 program were transferred to the soil model created in the PLAXIS program and various soil-structure analyses were performed. Finally the effects of soil-structure were evaluated considering the railway superstructure.

**Key words:** Railway bridges, Finite element methods and Soil-structure interaction.

## 1. Giriş

1820 yıllarında ilk modern demiryolu köprüsünün yapımından sonra demiryolu köprü mühendisleri demiryolu köprüleri konusunda çok önemli ilerlemeler kaydettiler. Buharlı lokomotifler yerlerini elektrikli ve dizel lokomotiflere bırakmış ve yük vagonlarının tonajı ve donanımları değişmiştir. Demiryolu altyapısının taşıma gücü sınırları, bakım ve yenileme gibi ekonomik sebeplerinden dolayı demiryolu araçlarının yükleme kapasitelerinin sınırlandırılmasına rağmen dingil yükleri zaman içinde artmaktadır. Çalışan ilk buharlı lokomotif John Fitch tarafından Amerika'da 1794 yılında tasarlanmış ve yapılmıştır. Devamında İngiltere'de 1804 yılında buharlı bir lokomotif daha yapılmıştır. İngiltere'de Stocton ve Darlington arasında ilk demiryolu hattı işletmeciliği 1825 ve 1863 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta demiryolu mühendisleri demiryolu trafiğini demiryolu köprülerine aktarmakta zorluklar yaşamışlardır. Başlangıçta demiryolu köprülerini çoğunlukla demirden imal edilmiş ve bağlantılarda perçin kullanılmıştır.

Demiryolu köprüleri demiryolu altyapısının önemli bileşenleridir. Demiryolu köprüleri yapım ve bakım aşamalarında çok büyük yatırımlar gerektirirler ve demiryolu ulaşım sisteminin en kritik kesimleri yani şişe boynu olarak dikkate alınırlar. Köprülerde ciddi hasarların meydana gelmesi durumunda tüm demiryolu trafiği işletmeye kapatılır. Demiryolu köprüleri üzerindeki hareketli yükler zaman içinde demiryolu üstyapısında ve köprülerin yapısal formunda bozulmalara sebep olur. Yapısal bozukluğu olan demiryolu köprülerinde aşırı derece gürültü ve titreşimin meydana gelir. Demiryolu köprülerinde gürültü ve titreşim hava kaynaklı gürültü, yapı kaynaklı gürültü ve zemin kaynaklı gürültü olmak üzere üç ana başlık altında incelenir. Aşağıdaki Şekil 1'de gürültü ve titreşim kaynakları gösterilmiştir [1 ve 2].



Şekil 1. Demiryolu köprülerinde gürültü ve titreşimin kaynağı

Demiryolu köprülerinin yapısal özelliğinin belirlenmesindeki iki ana faktör köprü açıklığı ve geçilen engelin tipidir (Örneğin nehir, demiryolu, karayolu vb.). Aynı uzunluğa sahip açıklıklarda farklı alternatifler tercih edilebilir. Köprünün fonksiyonu, yapımı ve ekonomik sebepler nihai kararın verilmesinde etkili parametrelerdir. Köprülerin ana yapısal biçimleri aşağıdaki gibi sınıflandırılır [3]:

- Plak kirişli veya kutu profil kirişli köprüler (0-250 m)
- Makas kirişli köprüler (400 m'ye kadar)
- Konsol köprüler (600 m'ye kadar)
- Halatlı köprüler (1200 m'ye kadar)
- Asma köprüler (1900 m'ye kadar).

Demiryolu köprülerinin yapımında kullanılan malzeme özellikleri Eurocode gibi özel ulusal kodlarla belirlenir. Bunun dışında Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) gibi kuruluşların ya da diğer bilimsel çalışmaların sonuçları da kullanılabilir. Yapım, kontrol, değiştirme gibi kolaylıklardan ve hafif olmalarından dolayı çelik ve kompozit malzemeler köprü yapımında tercih edilirler. Genellikle yüksek mukavemetli malzemeler tercih edilirler ancak ekonomi de köprü yapımında dikkate alınır. Avrupa'da genel olarak S355 karbon derecesine sahip bulunu veya kaynaklı çelik köprüler tercih edilir. Bazı özel durumlarda daha yüksek dereceli çelik malzemeler kullanılabilir. Metal yapıların genel özellikleri EN 1993-1-1'de tanımlanmıştır. Betonarme köprülerde ise EN 1992-1-1 standardı dikkate alınır. ABD ise köprülerde kullanılan malzemeler Amerikan Test ve Malzeme Kurumu'nun (ASTM) standartlarına uygun olmalıdır [3].

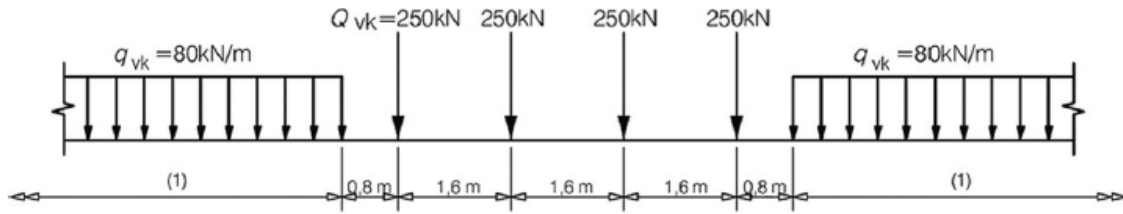
## 2. Demiryolu köprülerinde yapı-zemin etkileşimi

Özellikle demiryolu köprülerinde sığ temeller tercih edilmez ve köprü derin kazıklar üzerine oturtulur. Köprü gövdesini taşıyan yapı kenar ayaklar, diğer ayaklar ve bir temelden oluşur. Bu yapı köprü'nün ölü yükünü, hareketli yükünü, rüzgar ve su kuvvetlerini alarak zemine iletir. Köprü altyapısı genellikle kazık temeller, yayılı temeller, ayaklar ve çerçeve ya da bunların kombinasyonundan oluşur. Köprü yapılmadan önce mutlaka ayrıntılı bir zemin araştırmasının yapılması gerekmektedir. Köprü kazıklarının taşıma kapasiteleri ile ilgili olarak Amerikan Demiryolu Mühendisleri ve Bakım Birliğinin standardında ve Eurocode 7-1-7 numaralı standartta ayrıntılı bilgiler bulunmaktadır.

Demiryolu köprülerinin yükleme koşulları ile ilgili ayrıntılar EN 1990 numaralı standartta verilmiştir. Demiryolu köprülerine etki eden yükler; Ölü yükler, Hareketli yükler, Dinamik yükler, Yatay yükler, Tren geçişlerinden kaynaklanan aerodinamik kuvvetler ve Trenlerin köprülerde raydan çıkmaları sonucu oluşan kuvvetler gibi ana başlıklarda incelenir [4].

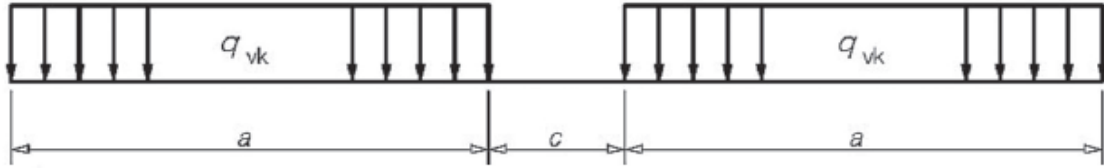
Demiryolu köprüleri üzerindeki hareketli yük modelleri EN 1991-2'de tanımlanmıştır. Analizlerde önemli olan beş yükleme modeli aşağıda sıralanmış ve her bir modelde dikkate alınan yüklemeler şekillerle gösterilmiştir [4-11]:

- Yük Modeli 71 (Sürekli köprülerde Yük Modeli SW/0): Ana demiryolu hatlarında normal demiryolu trafiğini tarif eder (Şekil 2).
- Yük Modeli SW/2: Ağır yüklerin taşındığı demiryolu hatlarını ifade eder (Şekil 3).
- Yük Modeli HSLM: 200 km/sa hızı aşan yolcu trenlerin yükleme koşullarını ifade eder (Şekil 4 ve Şekil 5).
- Yüzsüz tren yük modeli: Yüklenmemiş trenlerin etkisini ifade eder. Düşey yönde 10 kN/m değere sahip yayılı yük hesaplarında dikkate alınır.



(1): Sınırlandırma bulunmamaktadır.

Şekil 2. Yük Modeli 71 ve düşey yükler [4-11]

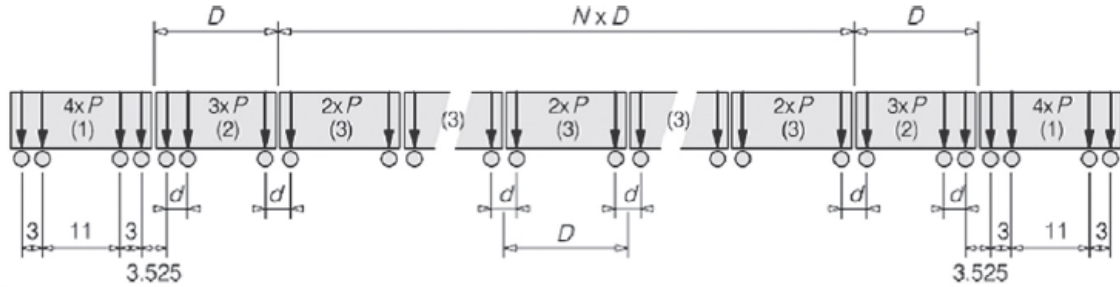


Şekil 3. Yük Modeli SW/0 ve SW/2 [4-11]

Yük Modeli SW/0 ve SW/2'de dikkate alınan yük ve açıklık değerleri aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yük Modeli SW/0 ve SW/2 yükleme değerleri

Yük Modeli	$q_{vk}$ (kN/m)	a (m)	c (m)
SW/0	133	15.0	5.3
SW/2	150	25.0	7.0



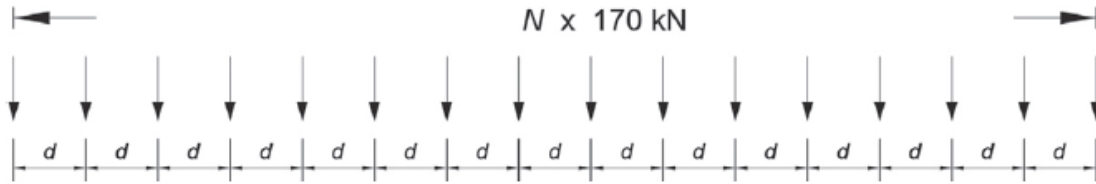
- (1) Lokomotif (Çeken ve çekilen araçlar benzerdir)  
 (2) Son vagon (Çeken ve çekilen araçlar benzerdir)  
 (3) Orta vagonlar

Şekil 4. Yük Modeli HSLM-A [4-11]

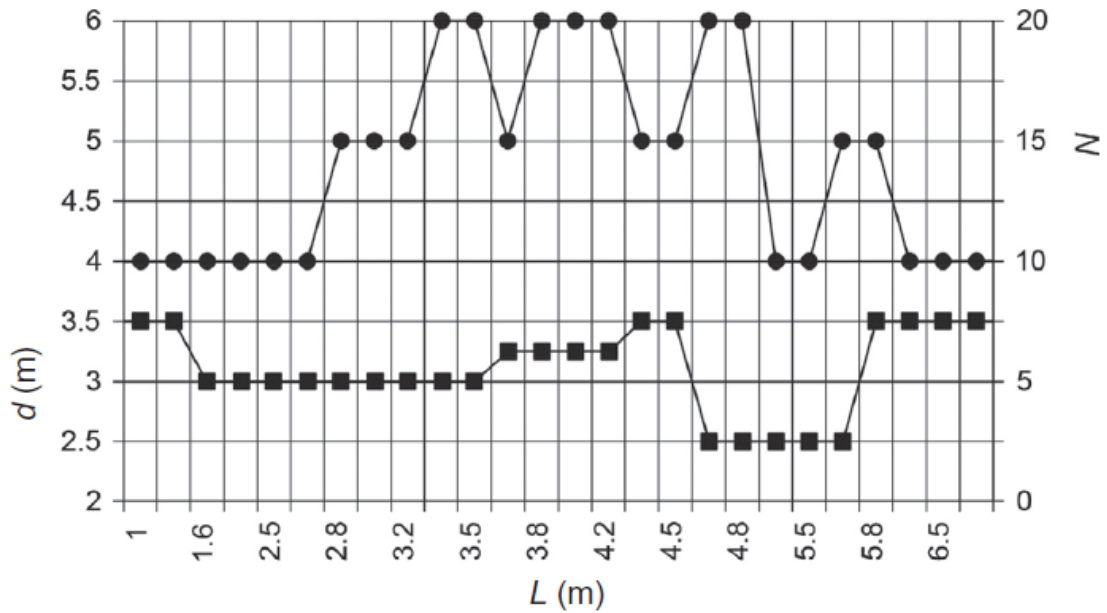
Yük Modeli HSLM-A'da dikkate alınan yük ve açıklık değerleri aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yük Modeli SW/0 ve SW/2 yükleme değerleri [4-11]

Tren Tipi	Orta vagon sayısı	Vagon uzunluğu	Boji aks aralığı	Tekil yük
	N	D (m)	d (m)	P (kN)
A1	18	18	2.0	170
A2	17	19	3.5	200
A3	16	20	2.0	180
A4	15	21	3.0	190
A5	14	22	2.0	170
A6	13	23	2.0	180
A7	13	24	2.0	190
A8	12	25	2.5	190
A9	11	26	2.0	210
A10	11	27	2.0	210

**Şekil 5.** Yük Modeli HSLM-B [4-11]

Yük Modeli HSLM-B’de Boji aks aralığı (d), köprü uzunluğu (L) ve tekil yük (N) arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [4-11].

**Şekil 6.** Yük Modeli HSLM-B’de dikkate alınan yük ve açıklık değerleri [4-11]

### 3. Weiherfeld demiryolu körüsü için uygulama

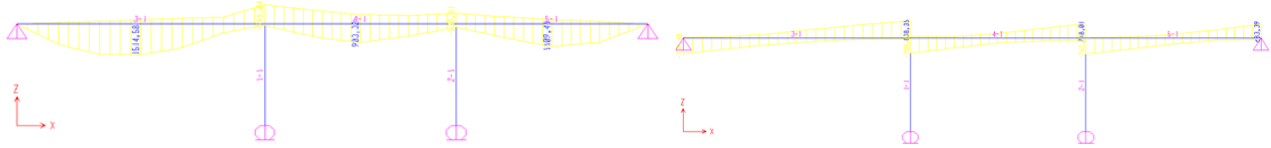
Weiherfeld köprüsü Almanya'nın Karlsruhe şehrinde bulunan çelikten imal edilmiş perçin bağlantılı bir demiryolu köprüsüdür. Köprü, 1908 yılında inşaa edilmiş olup 27 m genişliğinde, 5 m yüksekliğinde ve 54.90 m uzunluğundadır. Köprü üzerinde her iki yönde demiryolu trafiği olup dokuz hat bulunmaktadır. Dokuz hat üzerinde Almanya'nın Kuzey ve Güney yönüne doğru günde yaklaşık 560 yolcu ve yük treni ve ayrıca manevra trenleri hareket etmektedir. 2013 yılında köprü'nün rehabilitasyonu için proje çalışmaları başlatılmış ve çalışmalar 2014 yılının Ağustos ayında başlamıştır. Köprü'nün altyapısında ve üstyapısında yapılan rehabilitasyon çalışmaları tren trafiği altında yapılmış ve çalışmalar 2016 yılında tamamlanmıştır (Şekil 7) [1].



Şekil 7. Weiherfeld köprüsü enkesit, plan ve köprü yenileme çalışmaları

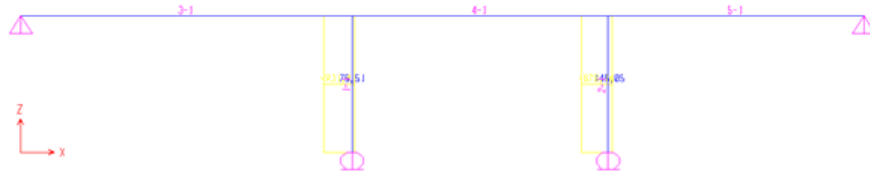
Bu çalışmada Weiherfeld demiryolu köprüsünün yapı-zemin etkileşimini incelemek için EN 1991-2 standardında belirtilen yükleme modellerine uygun olarak analizler yapılmıştır. Bu amaçla, köprü'nün yapısal modeli Yük Modeli 71 dikkate alınarak SAP 2000 sonlu elemanlar programı ile oluşturulmuş, yolcu ve yük trenlerinin dingil ağılıkları ve tren hızları dikkate alınarak yüklemeler hareketli yük olarak programda tanımlanmıştır. 1.6 m aralıklı 250 kN'luk yük dizisi köprüye etki ettirilmiştir. Köprü çelik kolonları "I" profil ve boyutları 300/700 olarak programda tanımlanmıştır. Köprü tablası ise uç noktalarda 1.3 m kalınlığındaki istinat duvarları üzerine oturtulmuştur. Yapılan yükleme sonucu köprü kiriş ve kolonlarında elde edilen yükler ve momentler Şekil 8'de gösterilmiştir. Yük Modeli 71 yüklemesinde dingil yükleri SAP 2000 programında hareketli yük olarak tanımlanmıştır. Köprü üzerinde maksimum 1,514 kNm moment ve 762 kN kesme kuvveti oluşmuştur. Kolonlarda ise maksimum 980 kN normal kuvvet

oluşturmuştur. Weiherfeld köprüsünde yapı-zemin etkileşimini analizleri için PLAXIS programında killi zemin dikkate alınarak köprü ayakları altında sürekli bir zemin ortamı modellenmiştir. Yapılan analizler Şekil 9'de gösterilmiştir.



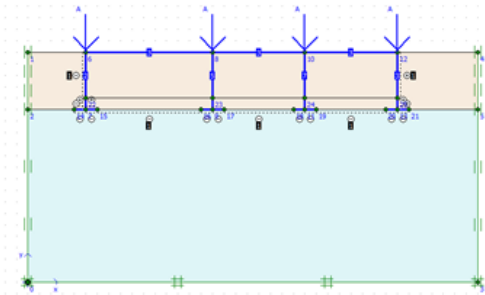
a) Köprüde oluşan moment diyagramı

b) Köprü kesme kuvvetleri

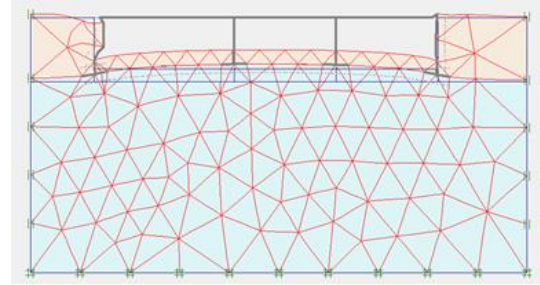


c) Köprü kolonlarında oluşan normal kuvvetler

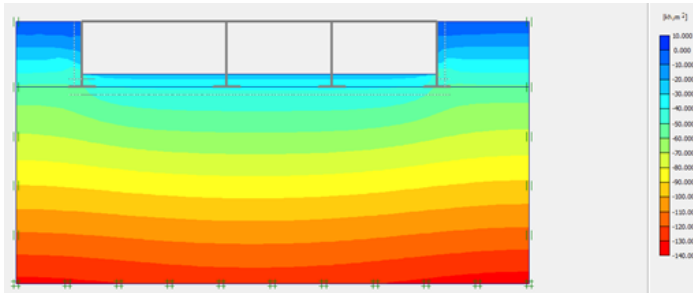
Şekil 8. Yük Modeli 71 ile yapılan yüklemeler sonucu köprüde oluşan tesir kuvvetleri



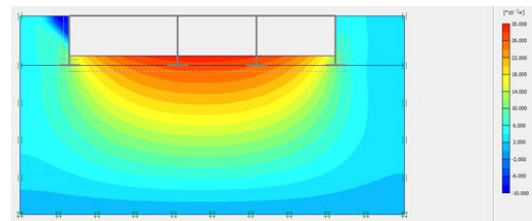
a) Plaxis programında yapı-zemin modeli



b) Zeminde oluşan deformasyonlar



c) Efektif gerilmeler



d) Yerdeğiştirmeler

Şekil 9. Killi zeminde demiryolu köprüsü-zemin etkileşimi

PLAXIS programında oluşturulan zemin modeline aktarılarak yapı-zemin etkileşimi üzerine analizler yapılmış ve sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Weiherfeld demiryolu köprüsünün killi bir zemine oturması durumunda köprü ayakları altında meydana gelen deformasyonlar, kuvvetler ve gerilmeler Şekil 9'de gösterilmiştir. Yapı-zemin modeli Şekil 9a'da gösterilen sistemin yükler altında deformasyonu Şekil 9b'de görülmektedir. Weiherfeld köprü ayakları altında maksimum  $70 \text{ kN/m}^2$  gerilme olacağı tespit edilmiştir (Şekil 9c). Köprü ayaklarının düşey yönde maksimum 30 mm yerdeğiştirme yapabileceği tespit edilmiştir (Şekil 9d). Killi zeminde mevcut yüklemelerde köprü ayakları altında plastik deformasyon gösterecek bölgeler Şekil 8e'de gösterilmiştir.

#### 4. Sonuç ve değerlendirmeler

Bu çalışmada demiryolu köprüleri için yapı-zemin etkileşimi incelemesi yapılmış ve demiryolu köprülerinin boyutlandırılmasına katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Demiryolu köprüsü yapısal analiz programları (SAP 2000) ile statik ve dinamik olarak analiz edilmiştir. Köprü giriş ve kolonlarında oluşabilecek kuvvet ve momentler tespit edilmiştir. Yapı-zemin etkileşimi analizi için zemin analiz programları (PLAXIS) kullanılmıştır. Bu çalışmada Zemin cinsi kil olarak alınmıştır. Zemin oluşan gerilmeler ve çökmeler tespit edilmiştir. Özetle bu çalışmada Weiherfeld köprüsünün yapısal modeli SAP 2000 sonlu elemanlar programı ile oluşturulmuş, yolcu ve yük trenlerinin dingil ağırlıkları ve tren hızları dikkate alınarak Yük Modeli 71'e uygun olarak yüklemeler hareketli yük olarak programda tanımlanmıştır. Bu yükleme senaryosunda köprü girişlerinde  $1,514 \text{ kNm}$  moment ve  $762 \text{ kN}$  kesme kuvveti oluşmuştur. Hareketli yük tanımlaması yapıldığında köprü ayaklarında maksimum  $980 \text{ kN}$  normal kuvvet oluşmuştur. Yapı-zemin etkileşim modeli PLAXIS programında incelenmiştir. Zemin, kil karışımı bir zemin olarak dikkate alınmıştır. Köprü kolonlarına  $1,000 \text{ kN}$  yükleme yapıldığında, köprü temellerinin altında maksimum  $70 \text{ kN/m}^2$  gerilme tespit edilmiştir. Kolonlarda oturmanın ise maksimum 30 mm olacağı görülmektedir. Zemin cinsleri değiştirilerek ya da zemin iyileştirmeleri yaparak demiryolu köprüsü-zemin etkileşimi analizlerini çeşitlendirmek mümkündür. Benzer şekilde demiryolu köprüsü yükleme modellerinin tümünü analiz ederek karşılaştırmalar yapmak da mümkündür. Bu analizler demiryolu köprülerinin yapısal elemanlarının boyutlandırılmasında önemli katkılar sağlayarak en ekonomik ve emniyetli boyutlandırma yapmaya imkan verecektir.

#### Kaynaklar

- [1] Guler, H., Fath, B. and Akyol, T. P. "Acoustic Performance of Railways: A Case Study in Germany", Railways 2014: The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 2014, Ajaccio, Corsica, France.
- [2] Fath, B., Guler, H. and Akyol, T. P. "A Non-Contact And Non-Destructive Railway Bridge Monitoring System: A Case Study In Germany" ,Railways 2014, The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 2014, Ajaccio, Corsica, France.
- [3] Pipinato, A. and Patton, R. "Innovative Bridge Design Handbook", Construction, Rehabilitation and Maintenance, Elsevier Publication, Waltham, USA, 2016, Chapter 19, pp. 509–527.



EN 1993-1-2, 2003. Design of steel structures. Part 1–2: General Rules—Structural Fire Design. CEN, Bruxelles.

[4] EN 1990, 2006. Basis of structural design. CEN, Bruxelles.

[5] EN 1991-2, 2005. Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges. CEN, Bruxelles.

[6] EN 1992-1-1, 2004. Eurocode 3: Design of concrete structures—Part 1-1: General Rules. CEN, Bruxelles.

[7] EN 1993-1-1, 2003. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-1: General Rules. CEN, Bruxelles.

[8] EN 1993-1-10, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-10: Material Toughness and Through-Thickness Properties. CEN, Bruxelles.

[9] EN 1993-1-9, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-9: Fatigue. CEN, Bruxelles.

[10] EN 1993-2, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 2: Steel Bridges. CEN, Bruxelles.

[11] EN 1997-2, 2007. Eurocode 7—Geotechnical design—Part 2: Ground investigation and testing. CEN, Bruxelles.