

YAPAY ANAKAYA KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI TRENLERİN ALÜVYON ZEMİNLERDEKİ ÇEVRE YAPILARDA OLUŞTURDUĞU TİTREŞİM ETKİLERİNİN AZALTILMASI

Fatih GÖKTEPE¹, Erkan ÇELEBİ², Muharrem AKTAŞ²

¹Bartın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın

²Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

fgoktepe@bartin.edu.tr, eccelebi@sakarya.edu.tr, muharrema@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 03.09.2014; Kabul/Accepted: 06.04.2016)

ÖZET

Hızlı demiryolu hattına yakın yapıları yumuşak zemin koşullarında taşınan kuvvetli titreşimlerden korumak için dalga bariyeri olarak yapay anakaya modeli inşaat mühendisliğinin pratik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek hızlı tren trafiğinin meydana getirdiği titreşimlerin demiryolu ağının çevresindeki binalarda oluşturduğu etkilerin azaltılması için dalga engelleyici bariyerlerin yerleştirilmesi araştırılmıştır. Yapay anakayanın aktif ve pasif yalıtım durumlarına göre performansını değerlendirebilmek için ayrıntılı parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay anakaya, yüksek hızlı tren, alüvyon zeminlerde dalga yayılımı, sonlu elemanlar metodu, doğrusal olmayan malzeme davranışı

USING ARTIFICIAL BEDROCK IN MINIMIZING THE EFFECTS OF VIBRATION INDUCED BY HIGH SPEED TRAINS ON THE NEARBY STRUCTURES IN ALLUVIAL SOILS

ABSTRACT

An artificial bedrock as wave impeding barrier can be used in practical civil engineering applications as isolation measures to protect structures from strong vibrations transmitted through soft ground nearby high-speed railway track. This study focuses on mitigation of the effects of high speed trains induced vibrations on the structures which are located near the track lines by installing wave impeding barriers. Extensive parametric studies on the screening performance of wave impeding barrier have been done for both active and passive isolation cases.

Keywords: Artificial bedrock, high speed train, wave propagation in alluvial soils, finite element method, non-linear behaviour of soil

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tren setlerinin yüksek seyahat hızlarıyla (250-300 km/h) tekrarlı geçişleri sırasında ürettikleri yüksek frekanslı dinamik etkiler ile titreşen demiryolu üstyapısı, dinamik yükleri çevresindeki zeminlere iletirler ve zemin ortamındaki dalga yayılışıyla demiryolu ağına yakın bölgedeki yapılar etkilenir. Kuvvetli yer hareketleri binalara ve temellerine hasar verebileceği gibi bu binalarda yaşayan insanlara da konfor bozucu titreşimleriyle rahatsızlık verir. Bu nedenle demiryolu üstyapısını ve çevreyi titreşim kaynaklarının ürettiği kuvvetli yer hareketlerinden

korumak ihtiyacı ve bu kuvvetli titreşimlerin azaltılması için arazide en uygun yalıtım aracının bulunması çabaları zemin ortamında dalga yayılışı probleminin iyi anlaşılmasını gerektirir. Bu alanda kapsamlı ve yoğun araştırmaların gerekliliği, özellikle ülkemizin taşıma gücü zayıf, alüvyon zemin ortamlarından geçirilen yüksek hızlı modern demiryolu hatları (Ankara-İstanbul hızlı tren projesi) için, güncelliğini korumaktadır. Yumuşak zemin koşullarında 200 km/h değerlerine ulaşan Rayleigh yüzey dalgasının yayılma hızı, bu tür zayıf zemin koşullarında oluşabilecek rezonans durumuna bağlı olarak çevre yapılarda rahatsızlık verici titreşimlere

sebeptir. Bu durumda demiryolu üst yapısını balastlı oluşturmak yerine balastsız rijit yatak olarak inşa etmek, kritik hız değerinin artırılması için alınacak bir önlemdir. Bunun dışında, korunacak yapının etrafına, dalga geliş doğrultusuna dik veya korunacak yapının altına uygun derinlikte yatay olarak elastik veya rijit malzemelerden yapılmış çeşitli yalıtım araçlarının yerleştirilmesi inşaat mühendisliğinin bu tarz problemlerine çözüm olarak uygulanmaktadır. Çözüm önerisi olarak düşünülen dalga engelleyicilerin korunacak yapının yakınında olması durumuna literatürde pasif yalıtım, uzağında olması veya titreşim kaynağına yakın olması durumuna ise aktif yalıtım denilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen hesap modeli ile yalıtım performansı sayısal olarak değerlendirilecek olan dalga bariyer modeli yapay taban kaya uygulamasıdır. Bu yöntem mevcut zemin profilinin yapay olarak altı taban kaya ile sınırlandırılmış tabakalı zemine dönüştürme esasına dayanmaktadır. Zeminin öz frekansları ve buna bağlı titreşim modları yapay kayanın konumlandırılacağı derinlikle kontrol edilerek yönetilmektedir. Böylece dalgaların yayılma mekaniği değiştirilerek titreşimlerin etkileri azaltılmaktadır. Bu çözüm dış yükün zorlayıcı frekansının zemin tabakasının öz frekansından daha küçük olduğu durumlarda dalga yayılımının ve sonucunda titreşimlerin zemin tabakasında oluşmadığı olgusuna dayanarak geliştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, yalıtım uygulamasında kullanılacak olan yapay taban kaya modelinin ideal yerinin belirlenmesi (aktif veya pasif yalıtıma karar verilmesi), en uygun yapay kaya malzeme özelliklerinin seçilmesidir. Bununla birlikte, bariyer uygulamalarında dikkate alınan en önemli etkenlerden biri olan malzeme yoğunluğu da (empedans kontrastı) araştırılmıştır. Malzeme yoğunluğunun etkisi, nümerik analizlerde farklı malzemeleri temsil eden empedans kontrast değerleri ile dikkate alınmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ (REVIEW OF PUBLISHED STUDIES)

Yüksek frekansta tekrarlı dinamik yüklerden dolayı kuvvetli yüzey dalgalarının neden olduğu büyük genlikli titreşimlerin yakın çevresindeki etkilerini azaltabilmek için korunacak yapı ile titreşim kaynağı arasında malzeme yoğunlukları değişen farklı türlerde geliştirilmiş düşey dalga bariyer modelleri uygulanmaktadır [1-3]. Yatay dalga bariyeri uygulamasıyla da zeminin öz frekansları ve buna bağlı titreşim modları yapay kayanın konumlandırılacağı derinlikle değiştirilerek titreşim etkilerinin azaltılabileceği gösterilmiştir [4-6]. Durağan veya hareketli titreşim kaynaklarının ürettiği zemin dalgalarının davranışını ve yayılışını düşey yalıtım araçlarının performansı ile birlikte daha iyi anlayabilmek için son dönemlerde az sayıda da olsa sahada deneysel çalışmalar ve laboratuvar test düzeneklerinde bir dizi araştırmalar

gerçekleştirilmiştir [7-9]. Ayrıca zemine gömülü yatay bariyer modeli ile ilgili ilk arazi deneylerini Forchep ve Verbic [10] pasif ve aktif yalıtım durumları için gerçekleştirmişlerdir. Ana kaya özelliğini taşıyan frekans kontrollü bir yapay taban kaya modeli önermişlerdir. Saha deneyleri dışında dalga yayılım problemleriyle ilgili daha gerçekçi hesap modelleri için ileri analitik çözüm yaklaşımları yirminci yüzyılın sonlarında ortaya çıkmıştır [11-13]. Son yirmi yılda bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimiyle birlikte dalga yayılım mekaniğinin hareketli yüklere göre daha karmaşık problemlerini çözmek ve yalıtım sistemlerinin etkilerini daha iyi değerlendirebilmek için farklı sayısal çözüm yaklaşımları kullanılmıştır. Bu alanda yapılan önemli çalışmalarda, özellikle farklı zemin formasyonlarının ve gömülü yapı temellerinin modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi etkin olarak kullanılmıştır. Yarı sonsuz zeminin sonlu elemanlarla ayrıştırılmasında kesim noktaları için özel sınır koşulları kullanılarak geometrik sönüm hesaba katılmıştır [14, 15]. Tüm problemi temsil eden matematik modellerin dinamik çözümlemelerinde radyasyon sönümünü doğrudan hesaba katan sınır elemanlar yöntemi [16, 17] ya da bu tekniklerin sonlu elemanlarla ortak çözümlerine dayalı hibrit çözüm olarak isimlendirilen sayısal yaklaşımlar kullanılarak kalibrasyon hassasiyeti yüksek modeller geliştirilmiştir [18, 19]. Fakat gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar özellikle zeminin elastik yarı uzay olarak değerlendirilmesiyle sınırlı kalmıştır.

3. SONLU ELEMAN MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE DOĞRULANMASI (CONSTRUCTION AND VERIFICATION OF THE FINITE ELEMENT MODEL)

Yapay taban kaya bariyer modelinin aktif ve pasif yalıtım durumlarına göre performansını değerlendirebilmek için geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde sistematik bir program akışı içerisinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak demiryolu üst yapısının alt tabanı (B noktası) ve binanın çatı katı düzeyi (A noktası) seçilmiştir. İlk aşamada yapay taban kayanın konumlandırılacağı yerin dalga yayılımına etkisi tren seyahat hızları (V) da dikkate alınarak empedans kontrastı (IR) olarak tanımlanan bariyer malzemesinin yoğunluğuna göre incelenmiştir. Dalga bariyer modelinin analizlerde öngörülen optimum kesit boyutları, yazarların Göktepe vd. [20], daha önceki analitik çalışmalarına dayalı belirlendiğinden burada yapay kayanın geometrik özellikleri üzerinde tekrar bir araştırma yapılmamıştır. Sayısal hesaplarda aktif yalıtım durumu için belirlenen ideal model boyutları $H_a=1$ m, $B_a=1$ m ve $L_a=7$ m dikkate alınmıştır. Pasif yalıtım durumu için ise $H_a=2$ m, $B_a=1$ m ve $L_a=14$ m değerleri kullanılmıştır. Ayrıca farklı tren geçiş hızlarında demiryolu balast yatağı rijitliğinin (E)

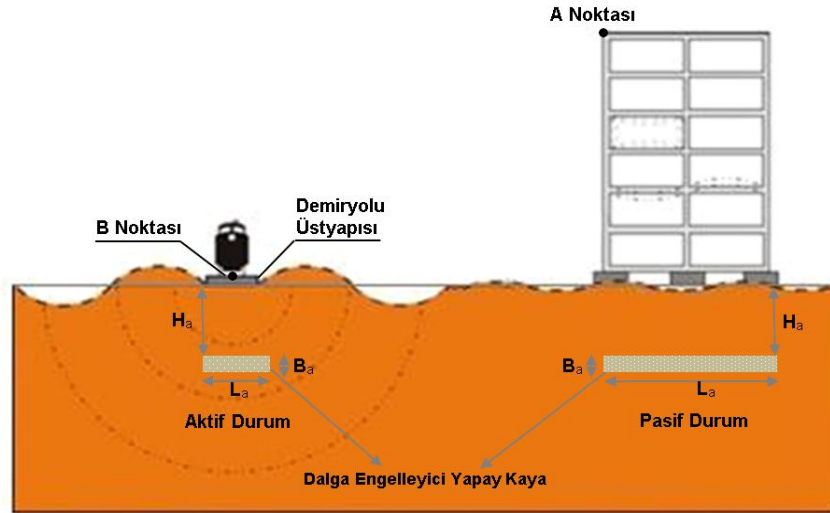
demiryolu üstyapısı titreşimine etkileri araştırılmıştır. Analizlerde dinamik davranışı incelenen yapı modeli, 1,5 m temel derinliğinde 6 katlı 3 açıklıklı betonarme düzlem bir çerçevedir. Binanın yüksekliği 18 m genişliği ise 12 m'dir. Yapının yük kaynağından uzaklığı 20 m olarak seçilmiştir. Demiryolu platformunun üst taban genişliği 6 m, alt taban genişliği 8 m ve zeminden yüksekliği 1,5 m olarak belirlenmiştir.

3.1 Tren Yükünün Simülasyonu (Simulation of Train Load)

Hızlı tren setinin zamana ve konuma bağlı yük dağılımının sayısal modele katılması analiz sürecinin en önemli aşamasını oluşturmaktadır. Bu çalışmada hareketli yük seti olarak sadece lokomotifin kendisi dikkate alınmıştır. Lokomotifin öz ağırlığı dingiller aracılığıyla raylara aktarılmaktadır. Vagon ağırlığının lokomotif ağırlığına kıyasla daha hafif olması ve zemin titreşimlerine olan etkisinin az olması sebebiyle vagon etkileri nümerik analizlerde dikkate

alınmamıştır. Demiryolu üstyapısı elastik yataklı kiriş olarak modellenirken, tekerlek yükü bu sürekli kiriş üzerinde sabit hızla noktasal hareket eden bir kuvvet olarak idealize edilmiştir [21]. Bu modelde hızlı tren dingil yükü, dingil açıklıkları ve hareket hızıyla; üstyapı ise belli bir eğilme rijitliği olan raylar ve traverslerin yatak katsayılarıyla karakterize edilmiştir [22]. Demiryolu üstyapısı ve taşıtına ait mekanik özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir. Almanya'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında (ICE) kullanılan ağırlığı 1200 kN ve altı dingilli olan lokomotifin (Lok. 103) geçişleri farklı hızlar ($V_1=180$ km/h, $V_2=360$ km/h) dikkate alınarak analizler yürütülmüştür.

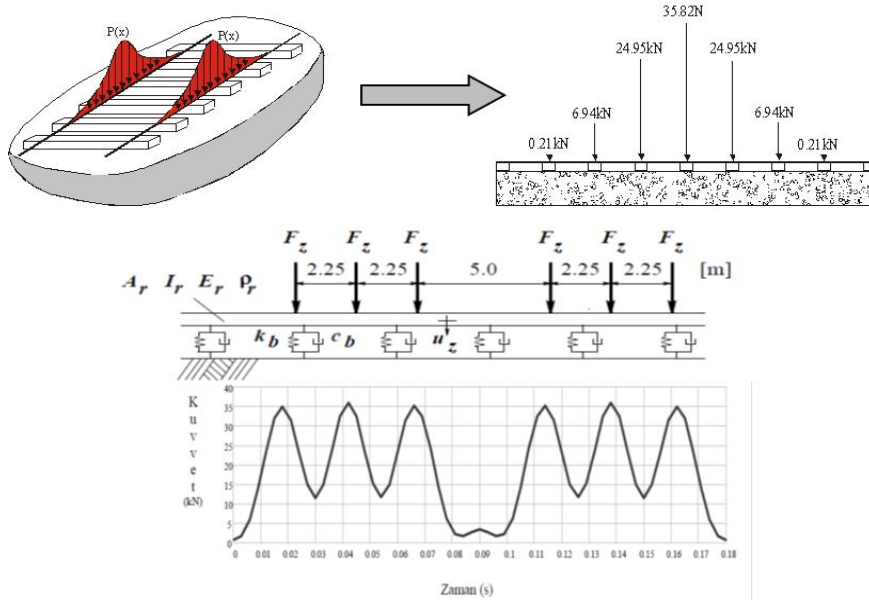
Şekil 2'de sadece seyahat hızı $V_1=180$ km/h olan lokomotif yükünün traverslerdeki zamana bağlı etkisi gösterilmiştir. Yüksek hız trenlerinin farklı geçiş hızlarına göre tekerlek yüklerinin elde edilmesi ve bunlara ait analitik çözümlerin teorik altyapısı daha önceki çalışmalarda detaylı verildiğinden dolayı burada tekrar bahsedilmemiştir [21-23].



Şekil 1. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için yapay anakaya modeli (Artificial bedrock model for vibration isolation of structures)

Tablo 1. Demiryolu taşıtı ve hattının mekanik özellikleri (Mechanical characteristics of the railway vehicle and the track)

| Bileşenler | Karakteristikler | Semboller | Büyükük | Birim |
|------------------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|----------|
| Lokomotif <i>Loc103</i> | Dingil yükü | F_z | 200 | kN |
| | Hareket hızları | V | 180, 360 | km/h |
| Demiryolu <i>2UIC 60</i> | | | | |
| | Kesit alanı | A_r | $1,54 \times 10^{-2}$ | m^2 |
| | Atalet momenti | I_z | $6,11 \times 10^{-5}$ | m^4 |
| | Elastisite modülü | E | $2,11 \times 10^8$ | kN/m^2 |
| | Birim hacim ağırlık | γ | 78 | kN/m^3 |
| Balast | | | | |
| <i>Yay-söndürücü sistem</i> | Rijitlik katsayısı | k_b | $1,26 \times 10^5$ | kN/m |
| | Sönüm katsayısı | c_b | $1,69 \times 10^2$ | $kNsn/m$ |



Şekil 2. Analitik model ve dingil yüklerinin zamana bağlı değişimi ($V_1=180$ km/h) ((Analytical model and time history of the axle loads for $V_1=180$ km/h))

3.2 Üstyapı ve Zemin için Malzeme Davranış Modelleri (Material Constitutive Models for Soil and Structure)

Hareketli yükün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D [24] bilgisayar programından yararlanılmıştır. Geliştirilen matematik modelde demiryolu altyapısını oluşturan zeminin öngörülen mekanik davranışı elasto-plastik Mohr Coulomb malzeme modeli ile benzeştirilerek dikkate alınmıştır. Zemin malzeme parametreleri ve analizlerde kullanılan değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Modelde demiryolu platformu ve bina türü yapının malzeme davranış özellikleri doğrusal elastik olarak ele alınmıştır. Üstyapıların mekanik özelliklerine ait bilgiler yazarların daha önceki çalışmalarında verilmiştir [20]. Sistemin üstyapı-zemin yatay arakesitinde ve dalga yalıtım bariyeri-zemin arakesitinde dinamik etkileşimi rasyonel bir yaklaşımla idealize edebilmek için arayüz dayanım azaltma katsayısı (R_{inter}) kullanılmıştır. Etkileşim yüzeyinde küçük deformasyonların oluşabileceği elastik ve kalıcı deformasyonların oluşabileceği plastik davranışı ayırt etmek için Coulomb kıstasından yararlanılmıştır. Plastik davranış için kayma gerilmesi (τ);

$$|\tau| = \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. Burada ϕ_i ve c_i sırasıyla ara yüzeyin içsel sürtünme açısını ve kohezyon değerinin göstermektedir. Ara kesit özellikleri kendisini çevreleyen malzeme özelliklerine ve ortak mukavemet azaltma faktörü bağlı aşağıda verilen kurallara göre hesaplanır:

$$\begin{aligned} c_i &= R_{inter} c_{zemin} \\ \tan \phi_i &= R_{inter} \tan \phi_{zemin} \leq \tan \phi_{zemin} \quad (2) \\ \omega_i &= 0^\circ \text{ için } R_{inter} < 1, \text{ aksi durumda } \omega_i = \omega_{zemin} \end{aligned}$$

Genelde, gerçek yapı-zemin dinamik davranışında ara yüzey kendini çevreleyen zemine göre daha zayıf ve daha elastik davranış gösterdiğinden mukavemet özellikleri kendilerini çevreleyen zemininkinden daha düşük değerde ($R_{inter} \leq 1$) olması gerekir. Bu çalışmada mukavemet değeri $R_{inter}=0.67$ alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapısal çözümlerinin hızlı ve öngörülen doğrulukta gerçekleşebilmesi için sistemin geometrik ve malzeme özelliklerinin tren yükünün hareketi doğrultusunda değişmediği kabulü altında düzlem şekil değiştirme problemi olarak 2D sonlu elemanlar modeli benimsenmiştir. belirlenmiştir.

3.3 Sonlu Eleman Analizinde Sayısal Doğruluk ve Stabilité (Numerical Accuracy and Stability in the Finite Element Analysis)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi için geliştirilen matematik simülasyonun doğruluk düzeyini iki temel parametre; kullanılan sonlu eleman boyutu ve çözümde dikkate alınan zaman adım aralığı belirlemektedir. Nümerik modellerde kullanılan sonlu eleman boyutunun (Δh) üst değeri en kısa dalga boyuna (λ_{min}) göre sınırlandırılmıştır [25]. En kısa dalga boyu hesaplanırken, dış yükün titreşim frekansı yüksek hızlı trenler için 0-20 Hz olarak dikkate alınmıştır. Yapısal davranışın birinci dereceden önem kazandığı plastik şekil değiştirmenin beklendiği zemin parçası ($H_1=10$ m, $B_1=50$ m) küçük boyutlu sonlu elemanlarla ($\Delta h=0.75$ m) modellenmiştir. Yakın bölgeden uzaklaştıkça kullanılan sonlu eleman boyutları büyütülerek sırasıyla $H_2=30$ m, $B_2=110$ m

Tablo 2. Zemin ortamının mekanik özellikleri (Mechanical properties of the soil medium)

| Parametre | Sembol | Büyüklik | Birim |
|--------------------------------|-------------|----------|----------------------|
| <i>Zemin türü: Kum</i> | | | |
| Birim hacim ağırlık | γ | 20 | (kN/m ³) |
| Elastisite modülü | E | 53100 | (kN/m ²) |
| Kayma modülü | G | 20420 | (kN/m ²) |
| Poisson oranı | ν | 0,30 | - |
| Basınç dalgası | V_p | 187 | m/s |
| Kayma dalgası | V_s | 100 | m/s |
| Boşluk oranı | e | 0.80 | - |
| Kohezyon | c | 0 | (kN/m ²) |
| Kayma mukavemeti açısı | ϕ | 28 | (°) |
| Kabarma açısı | ψ | 0 | (°) |
| Arayüz dayanım azaltma faktörü | R_{inter} | 0,67 | - |

için $\Delta h=2$ m; $H_3=50$ m, $B_3=200$ m için $\Delta h=4,5$ m olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Hesaplama yükü ve buna bağlı olarak analiz süreci dengelenmiştir. Sayısal çözümlerinde kullanılan zaman artımının (Δt) en büyük değeri Courant ölçütü ($c \leq 1$) olarak tanımlanan kararlılık koşulunun göz önünde bulundurulmasıyla belirlenmiştir [26].

$$\frac{v_j \Delta t}{\Delta h} = c \quad (3)$$

Burada v_j problemde dikkate alınan dalganın yayılma hızını göstermektedir. Farklı dalga türlerini hesaba katıldığı zemin titreşim problemlerinin analizinde zaman artımı (Δt), ortamdaki dalganın en büyük yayılma hızıyla belirlenirken, kullanılacak sonlu eleman boyutunun en küçük dalga hızına bağlı olduğuna dikkat etmek gerekir. Yönetici denklemlerin sayısal integrasyonunda zaman adımı $\Delta t=0,0103$ sn alınarak analizler yürütülmüştür.

3.4 Viskoz Sönümleyici Sınırlar ve Histeretik Sönüm (Viscous Absorbing Boundaries and Hysteretic Damping)

Dalga yayılım probleminin sonlu eleman simülasyonunda titreşim dalgalarını model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için literatürde viskoz sönümleyici elemanlar [27] ve sonsuz elemanlar [28, 29] ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan sınır şartlarına ait bilgiler yazarların daha önceki çalışmasında [3] detaylı olarak verilmiştir. Eğer ayrıklaştırılan bölgenin sınırları yeterli derecede uzakta seçilmemişse, bölgenin kesim noktalarında geçiren (soğurgan) sınırlar kullanılsa bile, tam geçirimsizlik sağlanamadığından dolayı uzaklaşan ve yansıyan dalgaların çakışmasından analiz sonuçlarında beklenmedik sayısal belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir. Yapılan çalışmalar sınır yerlerinin temel taban genişliğinin 8-10 katı kadar uzaklıkta düzenlenmesi ile oluşabilecek sayısal belirsizliklerin giderilebileceğini göstermektedir [28]. Kullanılan sayısal modelin sınırlarında oluşabilecek yansımaların etkisini yok etmek için yapay sönümleyiciler yapının sağ tarafından 102 m, sol

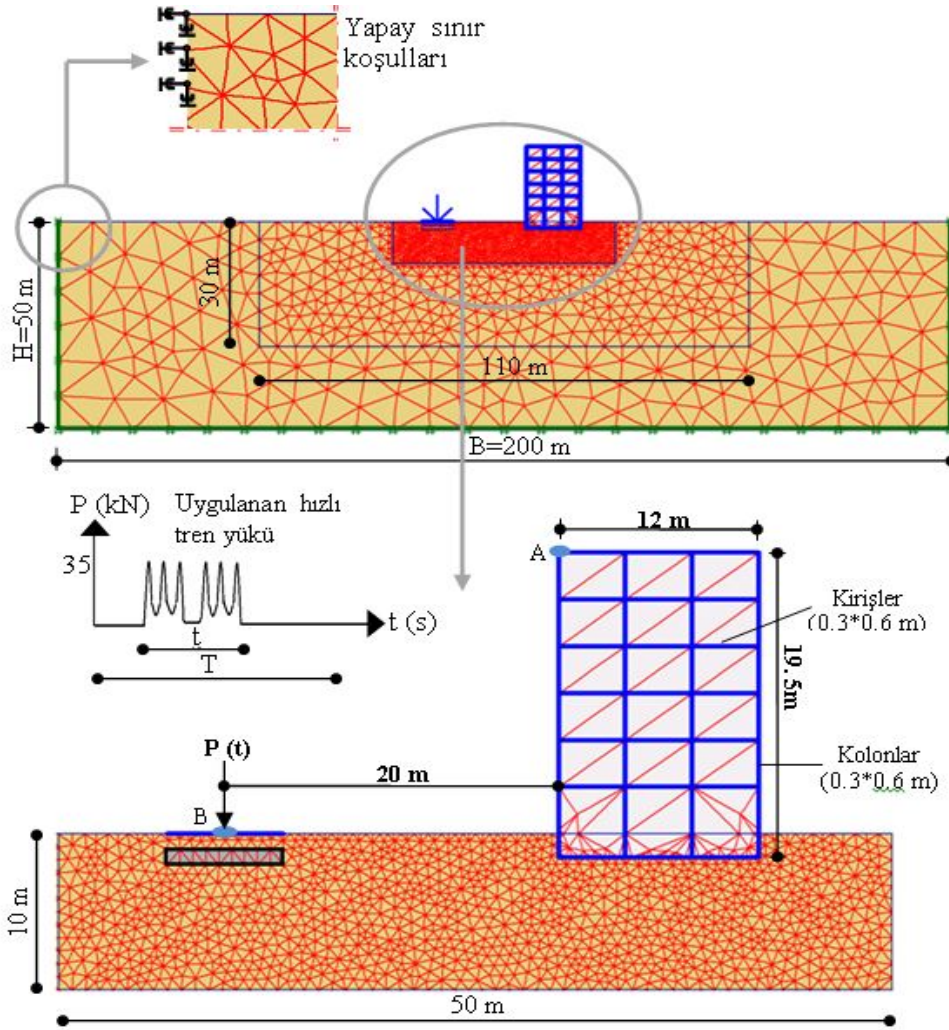
tarafından 88 m sınırlara uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Geliştirilen çözüm yönteminde sistemden dışarıya doğru yayılan ve zeminin sonsuzluğu nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için bölgenin sınırlarında eşdeğer anlamda kullanılan, radyasyon sönümü adı verilen ve malzeme sönümü ile ilgisi bulunmayan bir sönüm mekanizması kullanılmıştır (Şekil 3).

3.5 Modelin Doğrulanması (Model Verification)

Dalga yayılımının incelendiği sürekli ortam mekaniğinde sistemin sonlu eleman ağ yapısının sıklığı hassas bir yaklaşımla düzenlenirken problemin sınır özelliklerinin de aynı hassasiyetle doğru tanımlanması hem öngörülen doğruluk düzeyine erişebilme hem de çözüm sürecinin hesap yüküne bağlı olarak dengelenmesi açısından son derece önemlidir. Modelin doğrulanması işlemi iki şamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yazarların daha önceki çalışmaları ile kullanılan sayısal model, zeminin serbest yüzeyindeki düşey yerdeğiştirmelerin (u_y) zamana bağlı değişimleri incelenerek karşılaştırılmış [30] ve nümerik analizlerde kullanılacak sonlu eleman modelinin genişliği $B=200$ m ve derinliği ise $H=50$ m olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca, Modelin doğrulanması işlemi Amick ve Gendreau [31] tarafından geliştirilen Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu teorik formülasyon kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Bu teoriye göre, geometrik ve malzeme sönümünün yerdeğiştirme genliklerinde neden olduğu azalım aşağıdaki formülasyon kullanılarak ifade edilmektedir. Buna göre, yük kaynağından r_b mesafesindeki yerdeğiştirme genliği u_b ile, r_a mesafesindeki yerdeğiştirme genliği ise u_a ile ifade edilmektedir.

$$u_b = u_a \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (4)$$

Formülasyondaki, γ geometrik azalım katsayısı olup, dış yükün neden olduğu sismik dalga yayılım mekanizmasına ve dış yükün pozisyonuna bağlı olarak Tablo 3'den seçilmektedir [32].



Şekil 3. Yapı-zemin etkileşim problemi için sonlu eleman modeli (Finite element model for the soil-structure interaction problem)

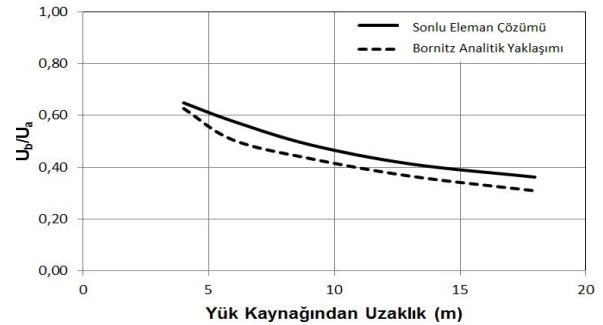
Tablo 3. Dalga tipine bağlı olarak teorik geometrik azalım katsayıları (Summary of theoretical geometric attenuation coefficients based on wave type)

| Yük Kaynağı | Dalga Tipi | Ölçüm Noktası | γ |
|-------------|------------|---------------|----------|
| Yüzeysel | Rayleigh | Yüzeysel | 0,5 |
| Yüzeysel | Rayleigh | Yüzeysel | 1 |
| Derin | Body | Yüzeysel | 1 |
| Derin | Body | Derin | 1 |

α ile gösterilen malzeme azalım katsayısı ise, zeminin tipine ve dış yükün frekans içeriğine bağlı olarak aşağıdaki formülasyon kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\alpha = \frac{2\pi f D}{V_R} \quad (5)$$

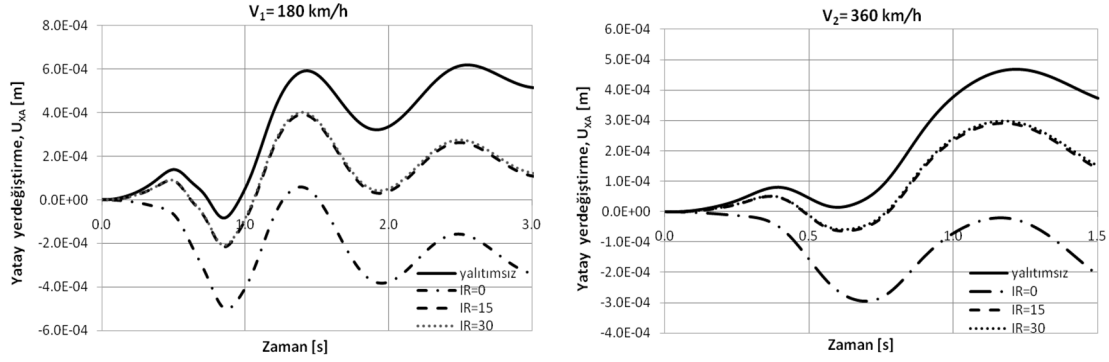
Yerdeğiştirme genliklerinde elde edilen azaltma oranları, yapı-zemin ortak sisteminin dalga yayılım problemi için önerilen sonlu eleman çözümü ile Bornitz analitik yaklaşımı için Şekil 4'de verilmiştir. Elde edilen grafiklerin uyum içerisinde olması önerilen modelin doğruluğunu bir kez daha kanıtlamıştır.



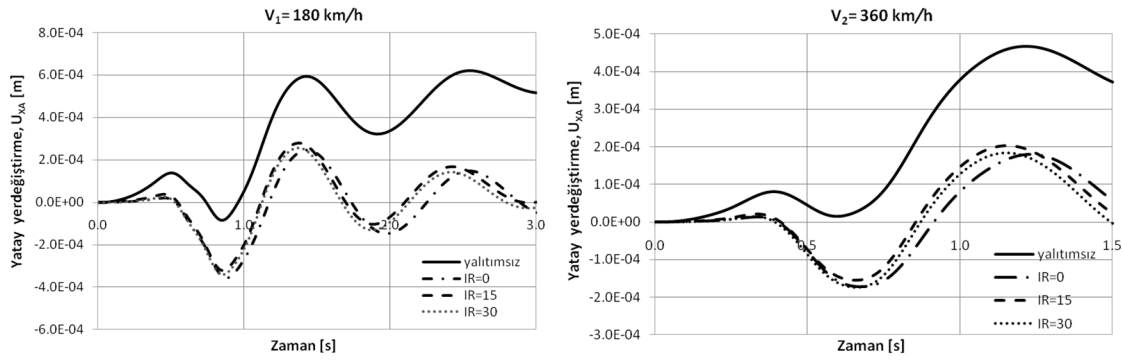
Şekil 4. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Comparative study of obtained results)

4. SAYISAL UYGULAMA VE ANALİZ SONUÇLARI (NUMERICAL APPLICATION AND ANALYSIS RESULTS)

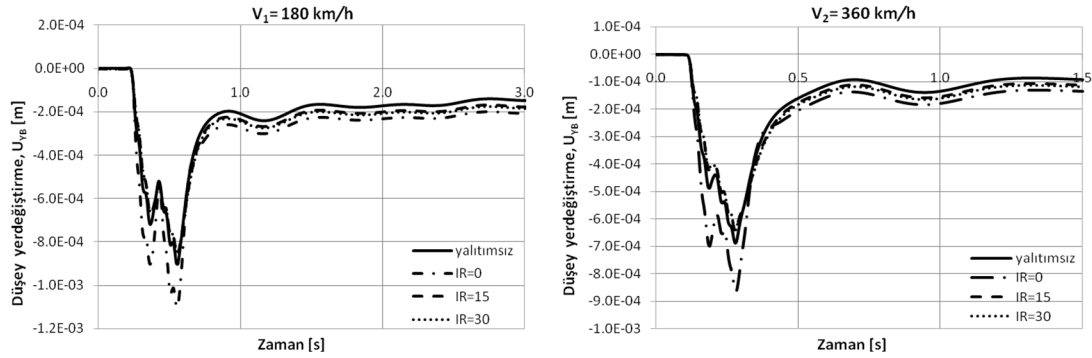
Yapay taban kaya bariyer modelinin aktif ve pasif yalıtım performansı değerlendirilerek, seçilen ölçüm noktalarındaki dinamik etkileri çeşitli kontrol parametrelerine bağlı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 5-8). Düzlem şekil değiştirme problemi için 30125 düğüm noktasına atanan bilinmeyenleri kapsayan denklemlerin çözümü yapılmıştır.



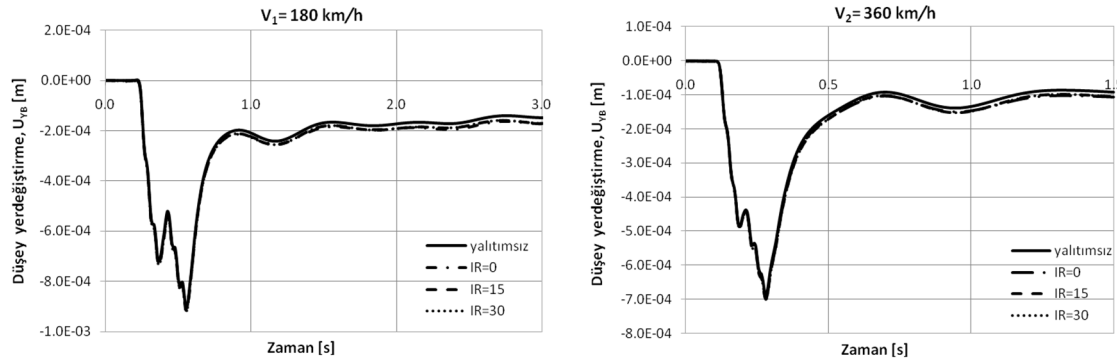
Şekil 5. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi (aktif yalıtım) (Time history of the horizontal roof displacement of the building for active isolation)



Şekil 6. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi (pasif yalıtım) (Time history of the horizontal roof displacement of the building for passive isolation)



Şekil 7. Demiryolu üstyapısında oluşan düşey yerdeğiştirmenin zaman geçmişi (aktif yalıtım) (Time history of the vertical displacement on the railway embankment for active isolation)



Şekil 8. Demiryolu üstyapısında oluşan düşey yerdeğiştirmenin zaman geçmişi (pasif yalıtım) (Time history of the vertical displacement on the railway embankment for passive isolation)

4.1 Yapay Taban Empedans Kontrastının ve Konumunun Yapısal Davranışa Etkisi (Effect of the Impedance and the Location of the Artificial Base on the Structural Response)

Yapay taban kayanın yerleşim yerinin dalga yayılışına olan etkisi malzeme yoğunluk kontrastına (IR) bağlı incelenmiştir:

$$IR = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (6)$$

Burada verilen yoğunluk kontrastı (IR) dalga engelleyici bariyerin empedans kontrast değerinin ($\rho_b V_b$), zemin bölgesinin empedans değerine ($\rho_s V_s$) oranı olarak tanımlanmaktadır. Yapılan sayısal analizler sonucunda bina tepe noktası yatay deplasmanlarının empedans oranına (IR=0, 15 ve 30) bağlı zaman geçmişleri, trenin $V_1=180$ km/h ve $V_2=360$ km/h geçiş hızlarına göre aktif ve pasif yalıtım durumları için elde edilmiştir (Şekil 5-6). İçi boş kutu kesitli yatay dalga bariyerinin (IR=0) duvar stabilitesini sağlamak için 0,15 m genişliğinde betonarme cidar düşünülmüştür. Hızlı tren geçişlerinin demiryolu üst yapısında oluşturduğu düşey deplasmanların zamanla değişimleri taban kayanın aktif ve pasif yalıtım durumları için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir (Şekil 7-8). Şekil 5-8'un pratiğe dönük sonuçları ve önemli karakteristikleri aşağıda özetlenmiştir:

Aktif yalıtım durumunda göz önünde bulundurulmuş tüm dalga bariyer örnekleri ($0 \leq IR \leq 30$) binanın yatay titreşim genliklerini önemli derecede azaltılmıştır. Trenin $V_1=180$ km/h geçiş hızında $t=1,4$ s'deki yer değiştirme genliklerinde içi boş bariyer modeli yalıtımsız duruma göre %90 civarında bina titreşimlerini azaltırken, diğer yalıtım modellerinde bu değer % 60'a kadar çıkmaktadır. Trenin $V_1=360$ km/h geçiş hızında ortalama yalıtım performansı (IR>0 durumu için) % 55 değerine kadar yükselmektedir. Yüksek frekanslarda dalgalar daha sık ortamdan yayılımına devam ettiği için bütün yalıtım malzemelerinde yaklaşık olarak birbirine benzer davranış şekli gözlemlenmiştir. Pasif yalıtım uygulamasında hareketli yükün ele alınan geçiş hızları için farklı malzeme yoğunluğuna sahip tüm taban kaya yalıtım modellerinin binanın yatay titreşim genliklerinin azaltılmasında önemli derecede etkili olduğu görülmektedir. İçi boş betonarme kutu kesitli (IR=0), rijit (IR=30) ve yarı-rijit (IR=15) taban kaya uygulamaları, trenin $V_1=180$ km/h ve $V_2=360$ km/h geçiş hızları için binanın tepe noktasında meydana gelen yatay titreşim genliklerinin en büyük değerlerini yalıtımsız duruma göre ortalama olarak 1/3 oranında azaltmıştır. Pasif yalıtım için gerçekleştirilen tüm sayısal uygulamalar dalga bariyerlerinin varlığının demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede etkilemediğini göstermiştir. Ancak aktif yalıtım durumunda taban kaya uygulaması titreşimlerin genliklerini 0,83 mm'den 1,03 mm'ye artırmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek hızlı trenlerin geçişi sırasında oluşturduğu büyük genlikli dalgaların yapılarda meydana getirdiği titreşim etkilerini azaltabilmek amacıyla, farklı tipteki yapay anakaya bariyer modelleri için kapsamlı parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar doğrultusunda elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Dalga engelleyici yapay taban kayanın aktif yalıtım durumu için optimum boyutlar kullanılarak oluşturulan tüm bariyer modellerinin farklı geçiş hızlarında etkili olduğu ve içi boş bariyerin yalıtımsız duruma göre binalarda meydana gelen titreşim etkilerini önemli oranda azalttığı görülmüştür.

Yapay taban kaya modelinin pasif yalıtım uygulamalarında en uygun bariyer boyutları kullanılarak imal edilen içi boş, rijit ve yarı-rijit bariyer modellerinin, binanın en üst katı düzeyinde oluşabilecek titreşim etkilerinin azaltılmasında etkili olduğu tespit edilmiştir.

Yapay anakaya bariyer modelleri ile gerçekleştirilen pasif yalıtım tedbirleri, demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede değiştirmemiştir. Ancak aktif yalıtım durumunda taban kaya uygulaması titreşimlerin genliklerini ortalama olarak yalıtımsız duruma göre yaklaşık % 25 civarında artırmaktadır.

Tren setlerinin yüksek seyahat hızlarıyla tekrarlı geçişleri sırasında zeminlerde ürettikleri yüksek frekanslı titreşimlerin çevre üst yapılarındaki dinamik etkilerinin araştırılması ve azaltılması konusunda, ülkemizde yapı geoteknik ve ulaştırma mühendisliği disiplinlerinin planladığı detaylı bir ortak çalışma henüz yapılmamıştır. Mevcut araştırmaların sadece demiryolu üstyapı titreşimlerinin azaltılmasına yoğunlaşmış olması problemin geniş açıdan ve derinlemesine bakılmasına engel olmaktadır. Yüksek hız trenlerinin yerleşim bölgelerinden geçişi esnasında rahatsızlık verici titreşimlerin azaltılmasıyla ilgili uygun çözümlerin üretilmesi ve geliştirilen sayısal modellerin sunulması, bu özgün araştırmanın ulusal düzeyde uygulamaya dönük sonuçlarının katma değerini artıracaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ahmad, S., Al-Hussaini, T. M. ve Fishman, K. L., "An Investigation on Active Isolation of Machine Foundations by Open Trenches", **J. Geotech. Eng.**, Cilt 122, No 6, 454-461, 1996.
2. Andersen, L. ve Nielsen, S. R. K., "Reduction of Ground Vibration by Means of Barriers or Soil Improvement along a Railway Track", **Soil Dyn. Earthq. Eng.**, Cilt 25, No 7-10, 701-716, 2005.

3. Çelebi, E., Kirtel, O. ve Aktaş, M., "Mitigation of The Effects of Vibrations Induced by High Speed Trains on Surrounding Buildings", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 28, No 2, 321-332, 2013.
4. Yang, Y. ve Hung, H. "A Parametric Study of Wave Barriers for Reduction of Train-Induced Vibrations", **Int. J. Numer. Meth. Eng.**, Cilt 40, No 20, 3729-3747, 1997.
5. Chouw, N., Le, R. ve Schmid, G., "Propagation of Vibration in a Soil Layer over Bedrock", **Engineering Analysis with Boundary Elements**, Cilt 8, No 3, 125-131, 1991.
6. Adam, M., Schmid, G. ve Chouw, N., "Investigation of Ground Motions and Structural Responses in Near Field due to Incident Waves", **Proc. of 12th World Conference on Earthq. Eng.**, Auckland, New Zealand, 2000.
7. Ahmad, S. ve Al-Hussaini, T. M., "Simplified Design for Vibration Screening by Open and Infilled Trenches", **J. Geotech. Eng.**, Cilt 117, No 1, 67-88, 1991.
8. Shen-H. J. ve Hung-Ta L., "Experimentally Investigating Finite Element Accuracy for Ground Vibration Induced by High-Speed Trains", **Eng. Struct.**, Cilt 30, No 3, 733-746, 2008.
9. Celebi, E., Firat, S., Beyhan, G., Cankaya, I., Vural, I. ve Kirtel, O., "Field Experiments on Wave Propagations and Vibration Isolation by Using Wave Barriers", **Soil Dyn. Earthq. Eng.**, Cilt 29, No 5, 824-833, 2009.
10. Forchapp, E. ve Verbic, B., Wave Propagation and Reduction of Foundation Vibrations, **Berg-Verlag GmbH**, Bochum, 165-178, 1994.
11. Fuyuki, M. ve Matsumoto, Y., "Finite Difference Analysis of Rayleigh Wave Scattering at a Trench", **Bull. Seism. Soc. America**, Cilt 70, No 6, 2051-69, 1980.
12. Kausel, E., "Thin-Layer Method: Formulation in the Time Domain", **Int. J. Numer. Meth. Eng.**, 37, 927-941, 1994.
13. Barber, J. R., "Surface Displacements due to a Steadily Moving Point Force", **J. Appl. Mech.**, Cilt 63, No 2, 245-251, 1996.
14. Haupt, W. A., "Surface Waves in Non-Homogeneous Half-Space", **In Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics**, Balkema, Rotterdam, 335-367, 1978.
15. Yang, B. Y. ve Hung, H. H., "A 2.5D Finite/Infinite Element Approach for Modelling Visco-Elastic Bodies Subjected to Moving Loads", **Int. J. Numer. Meth. Eng.**, Cilt 240, No 1317-1336, 2001.
16. Leung, K. L. ve Beskos, D. E., Vardoulakis, I. G., "Vibration Isolation Using Open or Filled Trenches, Part 3: 2-D Non-Homg Soil", **Comput. Mech.**, Cilt 7, No 2, 137-48. 1990.
17. Celebi, E. ve Schmid, G., "Investigation of Ground Vibrations Induced by Moving Loads", **Eng. Struct.**, Cilt 27, No 14, 1981-1998, 2005.
18. Adam, M. ve Estorff, O. V., "Reduction of Train-Induced Building Vibrations by Using Open and Filled Trenches", **Comput. Struct.**, 83, 11-24. 2005.
19. Karlström, A. ve Boström, A., "Efficiency of Trenches along Railways for Trains Moving at Sub- or Supersonic Speeds", **Soil Dyn. Earthq. Eng.**, Cilt 27, No 7, 625-641, 2007.
20. Göktepe, F., Kirtel, O. ve Çelebi, E., "WIB for mitigation of structural responses to train induced vibrations", **9th Int. Cong on Adv in Civil Eng.**, KTU, Turkey, 2010.
21. Verbic, B., **Über die rechnerische Untersuchung des Spannungs und Verformungszustandes im Oberbau und Unterbau der festen Fahrbahn infolge einer realen bewegter Last.**, Bericht, Ruhr Universität Bochum, 1996.
22. Huber, G., **Erschütterungsausbreitung beim Rad/Schiene-system, Veröffentlichungen 115**, Inst. für Bodenmechanik, Karlsruhe Universität, 1988.
23. Tosecky, A., **Nümerische Untersuchung der Erschütterungsausbreitung infolge bewegter Lasten auf einem Feste Fahrbahn-System mittels der Methode der dünnen Schichten/Methode der flexiblen Volumen**, Diploma thesis, Ruhr Universität, Bochum, 2001.
24. Brinkgreve, R. B. J., Al-Khoury, R., Bakker, K. J., Bonnier, P. G., Brand, P. J. W., Broere, W., Burd, H. J., Soltys, G., Vermeer, P. A. ve Haag, D. D., **Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses**, Published and Distributed by A.A. Balkema Publisher, The Netherlands, 2002.
25. Kuhlemeyer, R. L. ve Lysmer, J., "FEM Accuracy for Wave Propagation Problems", **J. of Soil Mech. Found. Div.**, ASCE, Cilt 99, No SM5, 421-427, 1973.
26. Courant, R., Friedrichs, K. ve Lewy, H., "On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics", **IBM J.**, Cilt 11, No 2, 215-234, 1967.
27. Lysmer, J. ve Kuhlemeyer, R. L., "Finite Dynamic Model for Infinite Media", **J. of the Eng. Mech. Div.**, Cilt 95, No 4, 859-875, 1969.
28. Dasgupta, G., "A Finite Element Formulation for Unbounded Homogeneous Continua", **J. Appl. Mech.**, Cilt 49, No 1, 136-140, 1982.
29. Wolf, J. P. ve Song, C., "Dynamic Stiffness Matrix of Unbounded Soil by Finite Element Multi-Cell Cloning", **Earthq. Eng. Struct. Dyn.**, 23, 233-250, 1994.
30. Göktepe, F. ve Çelebi, E., "Non-linear 2-D FE analysis for the assessment of isolation performance of wave impeding barrier in reduction of railway-induced surface waves", **Constr. Build. Mat.**, Cilt 36, No 2012, 1-13, 2012.

31. Amick, H. ve Gendreau, M., "Construction vibrations and their impact on vibrationsensitive facilities", **ASCE Construction Congress 6**, Orlando, Florida USA, 2000.
32. Kim, D-S. ve Lee, J-S., "Source and attenuation characteristics of various ground vibrations", **Geotech. Earthq. Eng., Soil Dyn. III., Geotech. Spec. Pub. ASCE**, Cilt 75, No 2, 1507-1517, 1998.