

YÜKSEK HIZ TRENLERİNİN ÇEVRE BİNALARDAKİ TİTREŞİM ETKİLERİNİN AZALTI LMASI

Erkan ÇELEBİ, Osman KIRTEL, Muharrem AKTAŞ

Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

ecelebi@sakarya.edu.tr, okirtel@sakarya.edu.tr, muharrema@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 04.06.2012; Kabul/Accepted: 04.04.2013)

ÖZET

Bu çalışmanın öncelikli hedefi hızlı tren trafiğinin ürettiği zemin titreşimlerini, yapı-zemin etkileşiminin de hesaba katıldığı bir dalga yayılım problemi olarak değerlendirip, ayrık sayısal çözüm yöntemlerinden yararlanarak sistemin matematik modelini geliştirerek incelemek ve dalga bariyerlerinin yerleştirilmesi ile çevre yapılarıdaki etkilerinin azaltılmasına ilişkin çözümler sunmaktır. Dalga bariyerinin yalıtım performansı tesis edileceği yere ve iç dolgu malzemesine göre kapsamlı parametrik çalışmalar yürütülerek araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Düşey dalga bariyeri, sonlu elemanlar, enerji yutucu sınırlar, Mohr-Coulomb davranış modeli

MITIGATION OF THE EFFECTS OF VIBRATIONS INDUCED BY HIGH SPEED TRAINS ON SURROUNDING BUILDINGS

ABSTRACT

In this paper, the goal is to primarily deal with the modeling of the railway traffic induced vibrations by using discrete computer models for analyzing related wave propagation problems with soil-structure interaction effects and mitigation of building responses by installation of wave barriers. Comprehensive parametric studies including the effects of localization and backfill material of trench barrier on the screening performance have been executed.

Keywords: Trench barrier, finite elements, absorbent boundaries, Mohr-Coulomb constitutive model

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizde hızlı demiryolu yolcu taşımacılığındaki trafik akış hızları 250–300 km/h değerlerine ulaşacak şekilde planlanmış, yük ve yolcu taşımacılığındaki dingil yükleri 22,5 tona kadar çıkarılmıştır. Yüksek-hızlı demiryolu hatlarında tren geçişlerinin, demiryolu üst yapısında, altyapısında ve çevre yapılarında oluşturduğu kuvvetli yer titreşimlerinin incelenmesi, yapı temellerinde hasar yapıcı ve insanlarda rahatsızlık verici etkilerinin azaltılması ve en uygun demiryolu üst yapı tasarımının gerçekleştirilmesi günümüzde inşaat mühendisliğinin önemli bir konusu olmalıdır. Titreşim enerjisinin büyük bir bölümü Rayleigh yüzey dalgaları tarafından taşınmaktadır. Bazı yumuşak zemin koşullarında ölçülen kayma dalgası yayılma hızlarının 200 km/h değerlerine kadar

düştüğü düşünülündüğünde, bu zayıf zeminlerden geçen yüksek-hızlı demiryolu hatlarındaki tren hızlarının bu değerlere ulaşması demiryolu ve çevresinde kuvvetli yer hareketleri ve bunun sonucunda hasar yapıcı titreşimler oluşturacaktır. Kritik hız olarak tanımlanan ve demiryolu alt yapısında en büyük yer değiştirmelere neden olan hareketli yük hızının, Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılma hızına özdeş olduğu durumlarda rezonansla karşılaşılacak ve bu durumda dinamik gerilmeler ve yerdeğıştirmeler çok fazla artacaktır.

Büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için korunacak yapının etrafına, dalga geliş doğrultusuna veya korunacak yapının altına uygun derinliklerde çeşitli yalıtım araçlarının yerleştirilmesi etkili bir çözüm olarak sunulabilir. Böylece dinamik yüklerin

neden olduğu kuvvetli yer titreşimlerinin zemin ortamında yayılmasında, dalgaların soğurulmasını, yansımaları veya kırılmasını sağlayarak etkilerini azaltmak ve geciktirmek mümkün olabilmektedir. Dalga bariyerlerinin titreşim kaynağının yakınına yerleştirilmesi aktif yalıtım, titreşim kaynağının uzağında, korunacak yapının yakınında yer alması ise pasif yalıtım olarak tanımlanır.

Düşey dalga bariyerinin aktif veya pasif yalıtım olma durumu, en uygun bariyer iç dolgu malzemesinin seçimi, bu çalışmanın içeriğini oluşturmaktadır. Bu tür çalışmalarda en önemli etken malzeme yoğunluğudur (empedans kontrastı). Farklı malzemelerin göstermiş olduğu yalıtım etkisini araştırmak için arazi deneyleri yapmak yerine geliştirilen matematik model üzerinden sayısal analizler yürütmek rasyonel bir yaklaşım olacaktır.

Yüksek-hız tren teknolojisi araştırmalarının önemli bir bölümü yalnızca yolcuların güvenliğini ve rahatını sağlamak için değil, aynı zamanda demiryolu çevresinde yaşayanları konfor bozucu ve binalarda hasar yapıcı titreşimlerden korumak ve bu titreşimlerin azaltılması çalışmalarını da kapsamaktadır [1]. Yalıtım potansiyeli yüksek olmalarına karşın maliyetleri düşük olduklarından dolayı içi boş yalıtım hendekleri veya içi viskoz sıvı ile doldurulmuş ya da farklı katı malzemelerden imal edilmiş rijit ya da yarı-rijit bariyerler kullanılmaktadır [2]. Bu konuda az sayıda da olsa sahada deneysel çalışmalar ve laboratuvar test düzeneklerinde bir dizi araştırmalar son dönemlerde gerçekleştirilmiştir [3, 4]. Ayrıca zemine gömülü yatay bariyer modeli ile ilgili ilk arazi deneylerini Forchap ve Verbic [5] pasif ve aktif yalıtım durumları için gerçekleştirmişlerdir. Daha önce yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçları da özel durumlar için yönetmeliklerde yer almış ve faaliyet alanı dar kapsamda tutulmuştur [6]. Bu konuyla ilgili ilk analitik çalışmaların kapalı çözümleri basit geometri ve idealleştirilmiş koşullarla sınırlandırılmış mekanik modeller için elde edilmiştir [7]. Bazı özel problemlerde impuls yük kaynağından üretilen titreşim dalgalarının etkilerinin azaltılmasında sonlu farklar formülasyonu kullanılmıştır [8]. Dalga yayılım problemleriyle ilgili daha gerçekçi matematik modeller için ileri analitik çözüm yaklaşımları yirminci yüzyılın başlarında ortaya çıkmıştır [9]. Son yirmi yılda bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimiyle birlikte hızlı tren trafiğinin ürettiği zemin titreşimlerinin çevre yapılarındaki dinamik etkileri, yapı-zemin etkileşiminin de doğrudan çözüme katıldığı bir dalga yayılım problemi olarak incelenmiştir.

Bu alanda yapılan önemli çalışmalarda, yarı sonsuz zeminin sonlu elemanlarla ayrıştırılmasında kesim noktaları için özel sınır koşulları kullanılarak geometrik sönüm hesaba katılmıştır [10]. Bu yöntemde sınırlarda gerilme dalgalarının geri

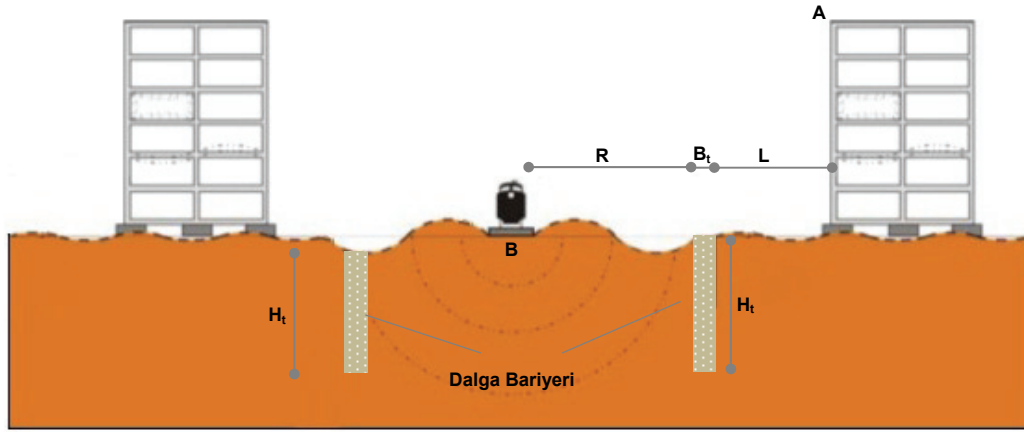
yansımalarının etkisini yok etmek için özel önlemlerin alınmasına ihtiyaç duyulmuştur. Tüm problemi temsil eden matematik modellerin dinamik çözümlerinde radyasyon sönümünü doğrudan hesaba katan sınır elemanlar yöntemi [11] ya da bu tekniklerin sonlu elemanlarla ortak çözümlerine dayalı hibrit çözüm olarak isimlendirilen sayısal yaklaşımlar kullanılarak bu konuyla ilgili araştırma sonuçları yayınlanmıştır [12]. Fakat gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar özellikle zeminin elastik yarı uzay olarak değerlendirilmesiyle sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmanın öncelikli hedefi, hızlı tren trafiğinin ürettiği zemin titreşimlerini, yapı-zemin etkileşiminin de hesaba katıldığı bir dalga yayılım problemi olarak değerlendirip, dalga bariyerlerinin yerleştirilmesi ile çevre yapılarındaki etkilerinin azaltılmasını incelemek üzere sayısal model geliştirmektir. Bu modelde, kesim sınırları için geometrik sönümü dikkate alan yapay sınır şartlarının kullanılması ve zeminin elasto-plastik davranışının Mohr Coulomb yenilme kriteri altında dikkate alacak şekilde tanımlanması bu çalışmanın en önemli yönlerindedir. Dalga bariyerinin yalıtım performansı, tesis edileceği yere, içerisinde kullanılan malzeme türüne göre ve tren setinin farklı geçiş hızlarına bağlı olarak araştırılmıştır.

2. YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN DALGA YAYILIM PROBLEMİ İÇİN ÖNERİLEN SONLU ELEMAN ÇÖZÜMÜ (FINITE ELEMENT MODEL PROPOSED FOR WAVE PROPAGATION PROBLEM OF SOIL-STRUCTURE SYSTEM)

Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak demiryolu üst yapısının alt tabanı (B noktası) ve binanın çatı katı düzeyi (A noktası) seçilmiştir. İlk aşamada dalga bariyerinin binaya olan uzaklığının (L) etkisi tren seyahat hızları (V) da dikkate alınarak empedans kontrastı (IR) olarak tanımlanan iç dolgu malzemesinin yoğunluğuna göre incelenmiştir (Şekil 1). Yalıtım aracının analizlerde öngörülen optimum kesit boyutları, $H_1=4,5$ m ve $B_1=0,5$ m olarak alınmıştır [4, 13].

Daha sonra demiryolu platformunun farklı malzeme rijitliklerine göre (E), hareketli yükün üst yapı ve bina titreşimine olan etkileri yalıtımsız zemin durumu için değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı tren geçiş hızlarının balastsız rijit üst yapıdaki titreşim 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. Söz konusu 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.



Şekil 1. Titreşimlerin yalıtımı için kullanılan düşey dalga bariyer modeli (The model of trench-type barrier used as a vibration reduction measure)

2.1. Tren Yükünün Simülasyonu (Simulation of Train Load)

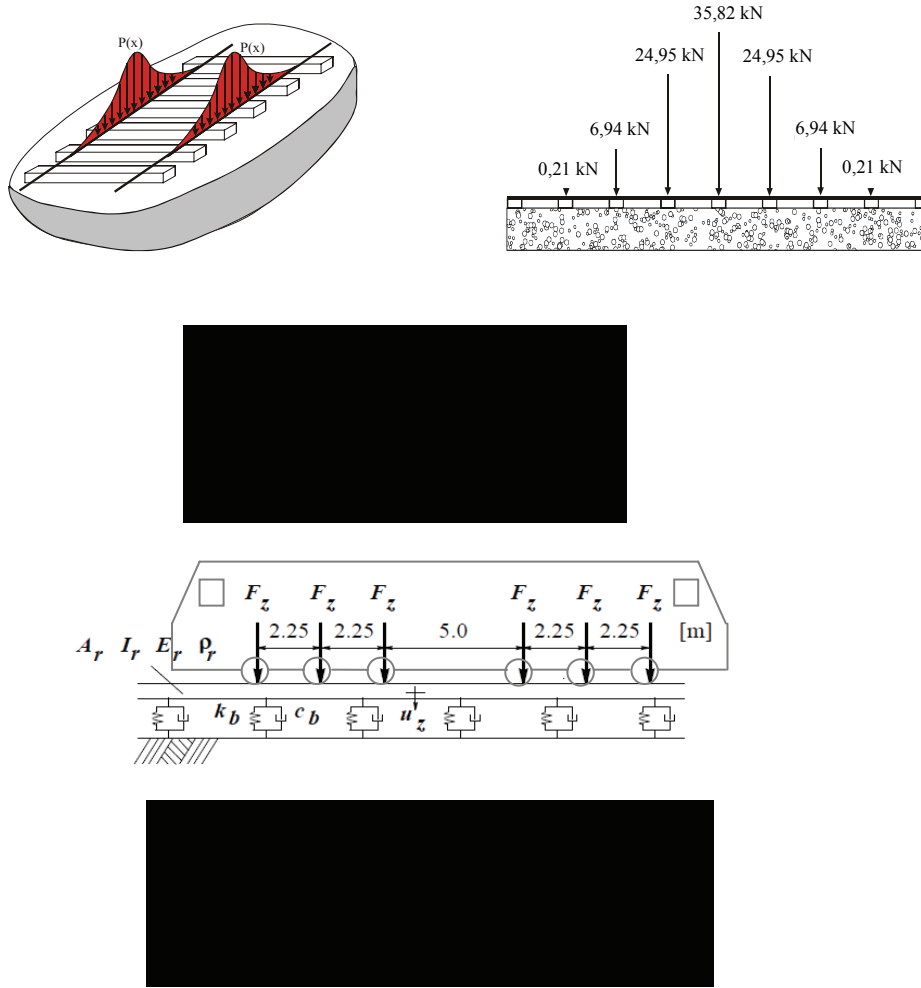
Yüksek hız trenlerinin oluşturdukları titreşimlerin zamana ve konuma bağlı yük dağılımının sayısal modele dâhil edilmesi gerekmektedir. Vagon ağırlıklarının lokomotif ağırlığına göre daha küçük değerlerde kalması nedeniyle katar yükü olarak sadece lokomotifin kendisi dikkate alınmıştır. En büyük gerilmeler tekerlekler ile raylar arasında oluşurken, raylar ile traversler arasındaki gerilmelerin etkisi ikinci mertebeden kaldığından, traversler ile altındaki balast yatağı arasındaki gerilmeler ihmal edilmiştir [14]. Trenin dinamik etkisi zemin yüzeyine oturan sürekli bir kirişin üzerinde sabit hızla hareket eden bir yük olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan bu

matematik modele ait özellikler Çizelge 1’de özetlenmiştir [15].

Tekerleklerden raylara aktarılan dinamik yük etkileri, Almanya’nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında (ICE) kullanılan altı dingilli ve ağırlığı yaklaşık olarak 1200 kN olan lokomotifin (Lok. 103) farklı hızlarda geçişleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Şekil 2’de sadece seyahat hızı $V_1=180$ km/h olan lokomotif yükünün traverslerdeki zamana bağlı etkisi gösterilmiştir. Yüksek hız trenlerinin balastsız üst yapı düzlemine uyguladıkları darbe türündeki yük fonksiyonlarının değişimi farklı geçiş hızlarına göre elde edilmiştir [14, 16].

Çizelge 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, 540	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	$1,69 \times 10^2$	kNs/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)

2.2. Sayısal Modelleme (Numerical Modelling)

Yapı-zemin etkileşimini dikkate alan, doğrusal olmayan çözüm yapabilen sonlu eleman programı Plaxis 2D kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir [17].

Zemin Mohr Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme davranış modeli ile Çizelge 2’de verilen parametrelerle tanımlanmıştır. Öngörülen sistemin üstyapı-zemin yatay ara kesitinde ve dalga yalıtım bariyeri-zemin düşey arakesitinde dinamik etkileşimini rasyonel bir yaklaşımla idealize edebilmek için arayüz dayanım azaltma katsayısı (R_{inter}) tanımlanmıştır. Etkileşim oluşabilecek elastik ve plastik davranışı ayırt etmek için Coulomb

kıstasından yararlanılmıştır. Demiryolu platformu ve bina türü yapının malzeme davranış özellikleri doğrusal elastik olarak ele alınmış olup mekanik özellikleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Sistemin geometrik ve malzeme özelliklerinin tren yükünün hareketi doğrultusunda değişmediği kabulü altında düzlem şekil değiştirme problemi olarak 2D sonlu elemanlar modeli benimsenmiştir. Zemin bölgesinin ayrıştırılmasında 12 gerilme noktasına sahip 15 düğüm noktalı üçgen sonlu eleman tipi kullanılmıştır. Demiryolunun balastsız üstyapısı ve binanın çerçeve taşıyıcı sistemi 5 düğüm noktalı çubuk elemanlarla modellenmiştir.

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

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Zemin türü: Kum			
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	-

Çizelge 3. Üstyapıların mekanik özellikleri (Mechanical properties of structures)

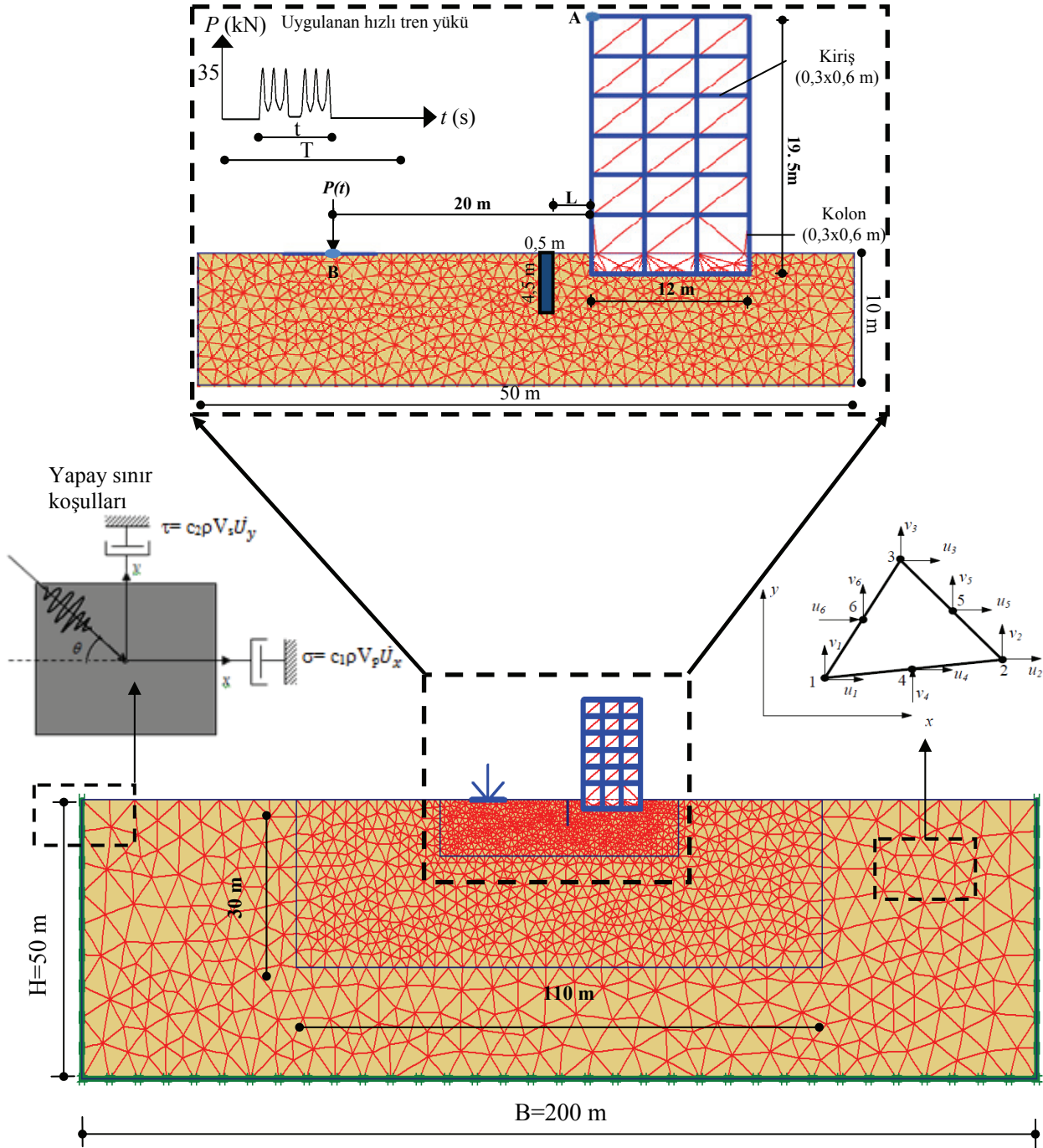
Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Demiryolu üstyapısı			
Eksenel rijitlik	EA	3,49x10 ⁶	(kN)
Eğilme rijitliği	EI	6,55x10 ⁵	(kNm ²)
Ağırlık	w	29,43	(kNm ²)
Poisson oranı	ν	0,33	-
Betonarme yapı	ν	0,20	-
Kolonlar	Eksenel rijitlik	EA	6,22x10 ⁶
	Eğilme rijitliği	EI	4,67x10 ⁴
	Ağırlık	w	7,5
	Poisson oranı	ν	0,33
Kirişler	Eksenel rijitlik	EA	6,22x10 ⁶
	Eğilme rijitliği	EI	1,87x10 ⁵
	Ağırlık	w	15

2.3. Sonlu Eleman Ağ Yapısı (Finite Element Mesh)

Kullanılacak sonlu elemanların maksimum boyutları diğer bir ifadeyle düğüm noktası aralıkları, yayılan dalga türünün boyu (λ) ile kontrol edilmektedir. Dalga yayılma hızı ve yük kaynağının frekans aralığı kullanılacak eleman boyutunu belirlediğinden, elemanların sayısının azaltılması genellikle ayrıklaştırılan bölgenin büyüklüğünü sınırlamaktadır. Ayrıklaştırılan bölgenin boyutunun küçültülmesi, sınır şartlarının model üzerindeki etkisini artırır. Ancak, uygun yapay sınır şartlarının oluşturulmasıyla sonsuza uzanan zemin sonlu bir bölgeye hapsedilerek modellenebilir. Ayrıca kısa dalga boylu frekans bileşenleri, geniş aralıklı düğümlerle modellendiğinde, yüksek frekans bileşenleri filtrelenebilir. Bu çalışmada sonlu eleman boyutunun (Δh) üst değeri en kısa dalga boyuna (λ_{min}) göre sınırlandırılmıştır [18].

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{min}}{k} = \frac{v_j}{kf_{maks}} \quad (1)$$

Burada, k çarpan sabiti sonlu eleman tipine ve kullanılan şekil fonksiyonuna bağlı $5 \leq k \leq 10$ aralığında değişmektedir. Dinamik yüke ait Fourier spektrumunun önemli bileşenlerini veren en büyük frekans değeri f_{maks} ile gösterilmiştir. Özellikle $V_1=180$ km/h hızla ilerleyen lokomotifin demiryolu platformuna uyguladığı yük fonksiyonunun Fourier spektrumundaki önemli katkıları $0 \leq f \leq 20$ Hz frekans aralığında görülmektedir. Yüklemeden dolayı hızlı değişimlerin görülebileceği yakın bölgelerde doğrusal olmayan şekil değiştirmeyi de daha iyi inceleyebilmek için sıkı bir ağ yapısı kullanılmıştır. Yapısal davranışın birinci dereceden önem kazandığı ve plastik şekil değiştirmenin beklendiği zemin parçası ($H_1=10$ m, $B_1=50$ m) küçük boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir (Şekil 3). Zemin bölgesinde kullanılan sonlu eleman boyutları yapıya ve yük kaynağına yakın bölge için Rayleigh tipi yüzeysel dalga boyunun ($\lambda_R=0,9\lambda_s$) altıda birinden küçük kalacak şekilde seçilmiştir ($\Delta h=0,75$ m). Uzak bölgenin ayrıklaştırılmasında sonlu eleman ağ yapısının sıklığı kademeli olarak genişletilmiştir ($H_2=30$ m, $B_2=110$ m; $\Delta h=2$ m \rightarrow $H_2=50$ m, $B_2=200$ m; $\Delta h=4,5$ m).



Sekil 3. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli (Schematic diagram of FE model developed for soil-structure interaction problem)

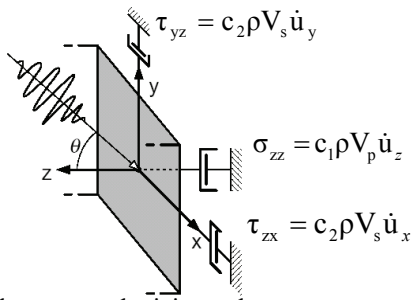
Bu çalışmada problemi yöneten hareket denklemlerinin zaman tanım aralığında çözümü Newmark'ın sabit ortalama ivme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Sayısal uygulamaların çözüm adımlarında kullanılacak zaman artımının en büyük değeri, dış yükün karakteri ve ortalama sonlu eleman boyutu göz önünde bulundurularak Courant ölçütü ($c \leq 1$) olarak tanımlanan kararlılık koşulunun göz önünde bulundurulmasıyla belirlenmiştir [19]. Dalgaların en yüksek ve en düşük yayılma hızları arasındaki farkın büyük olmasından dolayı öngörülen model için küçük sonlu eleman kullanımına ve kısa

zaman artımıyla sayısal çözümün gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Hareket denkleminin sayısal integrasyonunda zaman adımı $\Delta t = 0,0124$ s alınarak analizler yürütülmüştür.

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

Yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için

oluşturulan yapay sınırlarda viskoz sönümleyici elemanlar [20] ve sonsuz elemanlar [21] yaygın olarak kullanılmaktadır. Dinamik analizlerde viskoz yapay sınırların geçirimsizliğinin tanımlanmasındaki belirsizliklerden dolayı sınırlarda olası dalga yansımalarının yapısal davranışın kararlılığını bozmasına yol açmadan kalıcı titreşimi elde etmek için bölge sınırlarını statik çözümlere göre daha uzakta oluşturmak güvenli bir çözüm yoludur. Yapılan araştırmalardan bu sınır yerlerinin üstyapıdan en az temel taban genişliğinin 8–10 katı kadar uzakta olacak şekilde düzenlenmesi gerektiği önerilmektedir [22]. Bu çalışmada yapay sönümleyicilerin yapının sağ tarafından 102 m, sol tarafından 88 m sınırlara uzakta olacak şekilde yerleştirilmesiyle özel önlem alınmıştır. Eşdeğer viskoz sönümleyiciler tarafından sınırlarda soğurulan normal ve kayma gerilmeleri basınç ve kayma dalga hızlarına bağlı olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan sınır şartlarının soğurulma karakteristikleri dalgaların frekansına bağlı olmadığı için bu yapay sınırlar hem harmonik hem de harmonik olmayan dalgaları sönümleyebilmektedir.

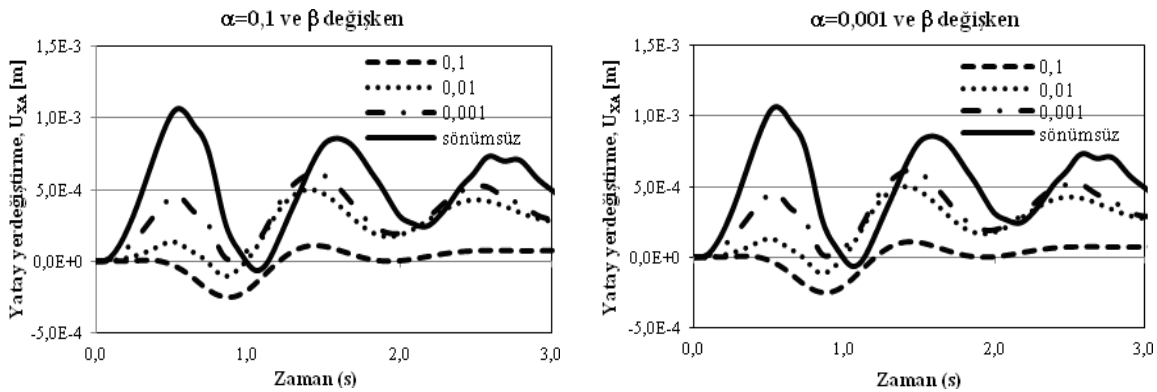


Şekil 4. Visköz sönümleyici sınırlar (Viscous absorbing boundaries)

Viskoz sönümleyicinin soğurgan etkisini düzenlemek için boyutsuz iyileştirme katsayıları (c_1 ve c_2) kullanılmaktadır. Mühendislikte pratik uygulamalar açısından gelen dalgalarının sınırlara dik veya küçük açıyla ($\theta \leq 30$) etki ettiği varsayıldığından bu katsayılar birim değerinde hesaplara katılmaktadır. Bu çalışmada basınç dalgası için $c_1=1$ alınmıştır. Kayma dalgasının sınırlarda rasyonel ölçüde geçirimsizliğini sağlamak

için tavsiye edilen değeri $c_2=0,2$ olarak alınmıştır [17].

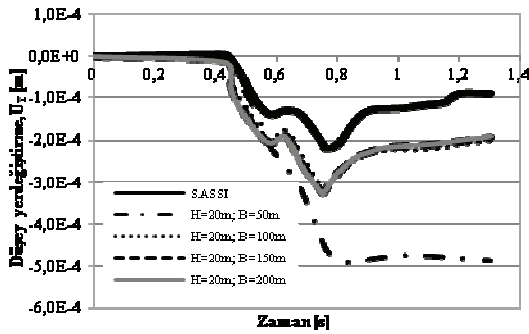
Viskoz etkilerden dolayı malzeme sönüm etkisi Rayleigh sönümü C ile dikkate alınmaktadır. Zeminlerde ele alınan sönüm, kayma şekil değiştirme genliğiyle birlikte orantılı olarak artmakta olup ikincil derecede kaldığı ve belli kurallar çerçevesinde sayısal hesaplarda göz ardı edilebileceği söylenebilir. Bundan dolayı, yapı-zemin birlikteliği dikkate alınarak yapılan sonlu eleman analizlerinde, baskın karakterdeki frekanslara ve modal sönüm oranlarına bağlı belirlenmesi gereken Rayleigh sönümü yerine, bu zemin sönümü için kullanılacak en uygun orantı sabitleri (α ve β) sına-yanılma ölçümleme yöntemiyle belirlenmiştir. Sayısal uygulamalarda malzeme sönümünün göz ardı edilmesi durumunda bile dalgaların geometrik sönüme bağlı tükendiği görülmektedir (Şekil 5). Bu çalışmanın ilk aşamasında öngörülen modelde zemin ortamı için kullanılacak Rayleigh sönüm katsayılarının sistem üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yalıtımsız zemin durumu için seyahat hızı 180 km/h olan trenin geçişi esnasında demiryolu güzergâhına yakın binada meydana getirdiği yatay titreşimler dikkate alınarak Rayleigh sönümünün farklı orantı sabitleri için elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bina tepe noktasına ait yatay yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimi α ve β katsayılarına göre Şekil 5'de gösterilmiştir. Kütle katılım katsayısının (α) etkisi sayısal sonuçları değiştirmezken, rijitlik katılım katsayısının (β) değişimi sonuçlarda etkili olmuştur. Bundan sonraki yapısal çözümlerde Rayleigh orantı sabitleri $\alpha=0,01$ ve $\beta=0,01$ alınmıştır. Burada α katsayısının sonuçlar üzerinde etkili olmaması, dış yük frekansının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sayısal hesaplarda $\beta=0,01$ seçilmesiyle yaklaşık olarak 10 Hz üzerindeki frekansların sönümlenmesi beklenmektedir.



Şekil 5. Rayleigh sönümü katsayılarının bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesine etkisi (The effect of Rayleigh damping coefficient on the structural response)

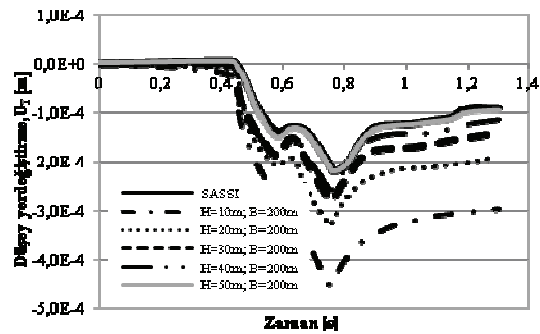
2.5. Matematik Modelin Kalibrasyonu (Verification of Mathematical Modelling)

Bu çalışmada yarı sonsuz zemin ortamının idealleştirilmesi için geliştirilen sonlu eleman modelinin doğruluk düzeyi ve yöntemin geçerliliği, zeminin sınırlarına dalga yayılma şartlarını sağlayan yapay sönümleyiciler yerleştirilerek incelenmiştir. Ayrıca ele alınan problem yakın ve uzak bölgeler için farklı ağ sıklıklarında analiz edilerek en uygun ağ yapısı belirlenmiştir. Demiryolu üst yapısından belli uzaklıkta ($L=14,2$ m) serbest yüzeyde seçilen gözlem noktalarındaki düşey yerdeğiştirmelerin (u_y) zamana bağlı değişimleri tren hızına bağlı elde edilmiştir (Şekil 6). Sayısal sonuçların kontrolü, deprem yer hareketinin neden olduğu yapı-zemin etkileşim problemini çözmek amacıyla geliştirilen SASSI [23]



Şekil 6. Model büyüklüğünün literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması (Comparison of model dimensions with those obtained from literature)

programının ilgili modüllerini hareketli yüklerin ürettiği yüzey titreşimlerini incelemek için dalga yayılış problemlerine uyarlayan Tosecky'nin çalışmalarına göre yapılmıştır [16]. Probleme ele alınacak zemin bölgesinin yatay açılım uzunluğunun $B=200$ m alınması yeterli görülmüştür. Her iki taraftan zemin sınırı yapı taban genişliğinin yaklaşık olarak 8 katı kadar uzakta oluşturulmuştur. Derinlik $H=50$ m olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 6'de verilen grafikler incelendiğinde, elde edilen sonuçların ince tabakalar/esnek hacim yöntemiyle uyum içersinde olması önerilen modelin yeterliliğini göstermektedir. Bu problemin çözümü için farklı boyutlarda toplam 3700 sonlu eleman kullanılmıştır. Yük kaynağı ve yapının yakın çevresinde sonlu eleman boyutu 0,75 m olarak seçilmiştir.



3. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI (RESULTS OF NUMERICAL ANALYSIS)

3.1. Bariyerin Malzeme Yoğunluğunun ve Binaya Uzaklığının Yapının Dinamik Davranışına Etkisi (The Effect of Wave Impedance Ratio and Distance to the Building on Dynamic Response of Structure)

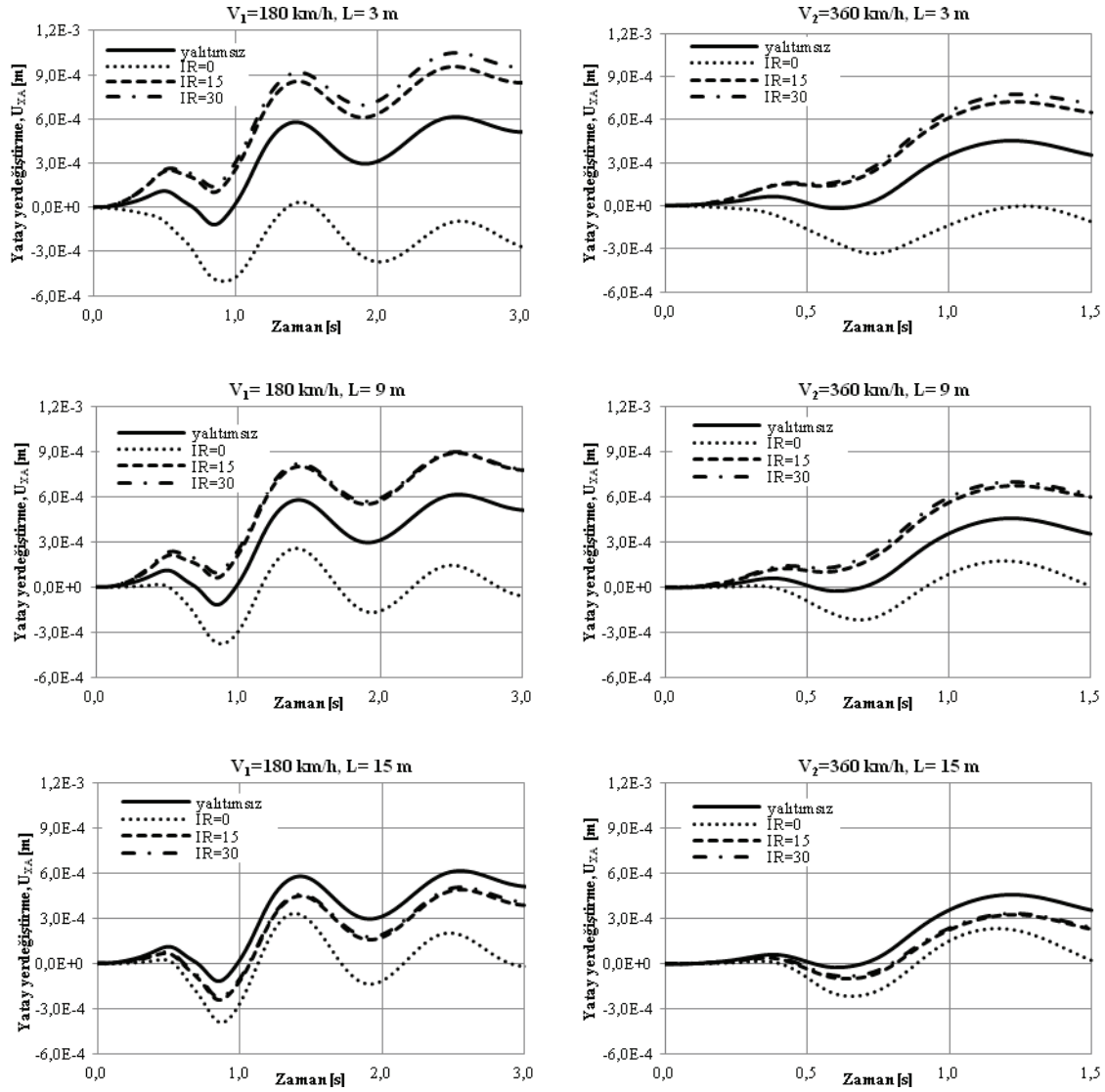
Düşey dalga bariyerinin binaya olan uzaklığının (L) dalga yayılışına olan etkisi malzeme yoğunluk kontrastına (IR) göre incelenmiştir:

$$IR = \rho_b V_b / \rho_s V_s \quad (2)$$

Burada verilen yoğunluk kontrastı (IR) bariyerin empedans değerinin ($\rho_b V_b$), zeminin empedans değerine ($\rho_s V_s$) oranı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle bu büyüklük, bariyer iç dolgu malzemesinin zemine göre dinamik rijitliğini karşılaştırmaktadır.

Düşey dalga bariyerinin yapıya olan uzaklığına ($L=3, 9$ ve 15 m) bağlı performansı trenin $V_1=180$ km/h ve $V_2=360$ km/h geçiş hızlarına göre elde edilmiştir. Hareketli yükten kaynaklanan titreşimlerin yapının tepe noktasında meydana getirdiği yatay yerdeğiştirmelerin değişimi Şekil 7'deki grafiklerde, zemine yerleştirilen bariyerin empedans kontrastına ($IR=0, 15$ ve 30) göre verilmiştir. İçi boş hendek tipi bariyerin ($IR=0$) yan duvar stabilitesini sağlamak için $0,15$ m genişliğinde betonarme cidar düşünülmüştür. Şekil 7'nin pratiğe dönük sonuçları ve önemli karakteristikleri aşağıda özetlenmiştir:

(1) Yük kaynağından zemine, oradan da yapıya iletilen titreşimlerin dalga yayılım davranış biçimleri yalıtımlı ve yalıtımsız zemin koşulları için benzerlik göstermektedir. Bina titreşimlerinde davranış biçimi farklılığı, sadece dinamik yükün frekans içeriğinden yani trenin geçiş hızından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. Dalga bariyeri konumunun ve malzeme yoğunluğunun bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesine etkisi (Effect of wave IR and location of the trench on structural response)

(2) Düşey yalıtım bariyerinin korunacak yapıya yakın yerleştirilmesine ($L=3$ m) karşı gelen pasif yalıtım uygulamasında hareketli yükün ele alınan geçiş hızları için içi boş hendek tipi ($IR=0$) yalıtım durumunun diğer yalıtım örneklerine göre daha iyi performans gösterdiği, yük kaynağından 20 m uzaktaki binanın tepe noktasından alınan ölçüm sonuçlarından anlaşılmaktadır. Trenin $V_1=180$ km/h hızı için yatay titreşim genlikleri yalıtımsız duruma göre ortalama olarak %25 civarında azalırken, $V_2=360$ km/h geçiş hızında bu değer %35'e ulaşmıştır. Bariyerin yapıya uzaklığı arttıkça ($L=9$ m) dalgayı sönümleme etkisi, özellikle trenin $V_1=180$ km/h geçiş hızında %50'ye kadar yükselmiştir.

(3) Bariyerin içine doldurulan malzemenin titreşim enerjisini tüketme kapasitesi trenin farklı geçiş hızlarına bağlı araştırıldığında, malzeme yoğunluğu zemine göre arttıkça ($IR \geq 15$) yapıdan $L=3$ m uzakta

yerleştirilen yalıtım duvarı titreşimlerin genliklerini ortalama olarak yalıtımsız duruma göre yaklaşık %60-70 oranında artırmaktadır. Binaya olan uzaklığı $L=9$ m olarak gözönüne alınırsa titreşimleri büyütme etkisi %40-50 değerlerine gerilemektedir. Yalıtım aracında kullanılan malzeme, bariyere çarpan dalgalarda farklı türlerde yansımalar, kırılmalar ve saçılmalar neden olmaktadır. Ölçüm noktasıyla dalga bariyeri arasındaki mesafe dalga yayılımını önemli ölçüde etkilemektedir. Zemin titreşimlerini makul düzeyde azaltabilmek için bu uzaklığın Rayleigh dalga boyunun en az iki katından fazla olması gerekirdi [24]. Mesafenin yetersizliğinden dolayı bariyer ile korunacak yapı temeli arasında kuvvetli dalga etkileşimleri, yıkıcı dalga girişimlerinden kaynaklanmaktadır.

(4) Aktif yalıtım durumunda ($L=15$ m) dikkate alınan tüm tren geçiş hızlarına göre göz önünde

bulundurulmuş tüm dalga bariyer türleri ($0 \leq IR \leq 30$) binanın yatay titreşim genliklerinin azaltılmasında oldukça etkili olmuştur. İçi boş bariyer modeli yalıtımsız duruma göre en fazla % 85 civarında bina titreşimlerini azaltırken, diğer yalıtım modellerinde bu değer % 40 oranına kadar yükselmiştir. Yüksek frekanslarda dalgalar daha sığ ortamdaki yayılımına devam ettiği için bütün yalıtım malzemelerinde yaklaşık olarak birbirine benzer davranış şekli gözlemlenmiştir.

(5) Aktif ve pasif yalıtım durumları için gerçekleştirilen tüm sayısal uygulamalar dalga bariyerlerinin varlığının demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede etkilemediğini göstermiştir.

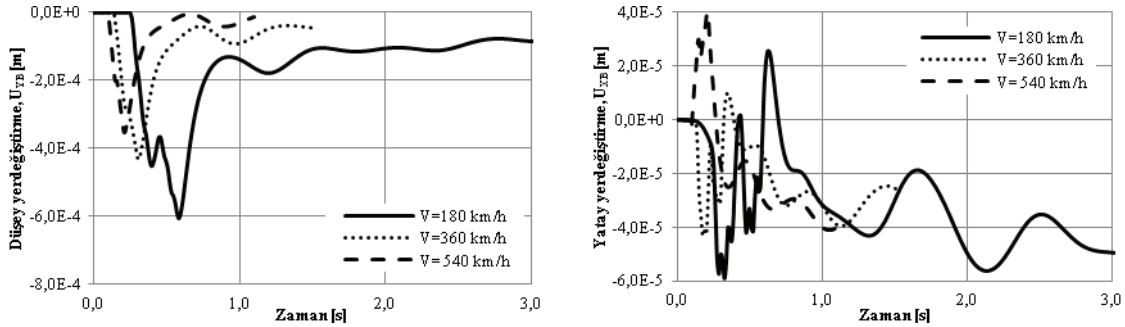
3.2. Tren Hızının ve Demiryolu Üstyapı Rijitliğinin Bina Dinamik Davranışına Etkisi (Effect of the Train Speed and the Rail Platform Rigidity on Dynamic Response of Structure)

Demiryolu hattı titreşimlerini geleneksel balastlı hatlara göre azaltmak için çalışmanın ilk aşamasında demiryolu üstyapısı rijit betonarme plak olarak ele alınmıştır. Yüksek hız treninin farklı geçiş hızlarına göre balastsız rijit üstyapıdaki düşey ve yatay titreşim

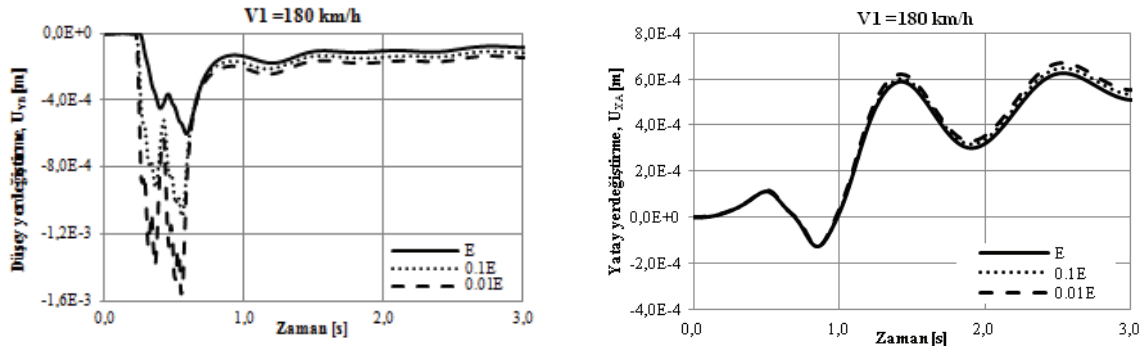
etkilerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 8’ de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Zeminin yalıtımsız durumu için sonuçlar elde edilmiştir.

Hızlı trenin seyahat hızı küçüldükçe demiryolu platformundaki tesir süresi artmıştır. Bundan dolayı dinamik yük demiryolu üstyapı titreşimlerini büyümüşür. Üstyapı temel tabanında seçilen noktada elde edilen titreşimler değerlendirildiğinde, trenin $V_1=180$ km/h geçiş hızında en büyük düşey ve yatay yerdeğiştirmeler, $V_2=360$ km/h geçiş hızına göre yaklaşık olarak 1,5 kat daha fazladır. Trenin seyahat hızı $V_3=540$ km/h değerine ulaştığında üstyapıdaki titreşim düzeyi $V_1=180$ km/h geçiş hızına göre yarı yarıya azalmaktadır. Düşey ve yatay yerdeğiştirmelerin farklı rijitliklerdeki yol platformları için değişimleri elde edilmiştir (Şekil 9).

Üstyapı sisteminin taşıyıcı yol yatağı farklı rijitliklerdeki yol platformlarıyla karşılaştırıldığında yükün altındaki düşey titreşimlerde tahmin edildiği gibi önemli derecede azalma (burada, düşey yer değiştirmeler için %65’e varan bir azalma) meydana getirirken, binanın dinamik davranışına etkisi %10’dan fazla olmamıştır.



Şekil 8. Düşey ve yatay yerdeğiştirmelerin tren geçiş hızlarına göre değişimi (Time history of the vertical and horizontal displacements depending on train speeds)



Şekil 9. Üstyapı ve bina titreşimlerine demiryolu platform rijitliğinin etkisi (Aktif Yalıtım) (Effect of the track rigidity on the railway embankment and building vibration for active isolation)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hızlı tren trafiğinin ürettiği zemin titreşimlerinin, çevre yapılarıdaki etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak bir çözüm olan dalga bariyerlerinin etkin kullanımı için yapı zemin etkileşimini de dikkate alarak yapılan bu nümerik çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Pasif yalıtım uygulamalarında farklı empedans kontrastına sahip yalıtım örnekleri değerlendirildiğinde, yapısal titreşimlerin azaltılmasında en yüksek performansı içi boş hendek tipi dalga bariyer modeli göstermiştir.
- Aktif yalıtım durumunda incelenen tüm dalga bariyer modelleri, dikkate alınan tüm tren geçiş hızlarına göre yapısal titreşimlerin azaltılmasında oldukça etkili olmuştur.
- Dalga bariyerinin konumu demiryolu üstyapı titreşimlerini etkilememiştir.
- Tren yükünün demiryolu üstyapısında meydana getirdiği düzey titreşimlerinin etkisi, yol yatağı rijitliğinin artırılmasıyla azalmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, 2010-01-04-008 proje numarası ve “Dinamik Yüklerin Ürettiği Kuvvetli Zemin Titreşimlerinin Azaltılması için Yenilikçi Çözümlerin Geliştirilmesi” isimli araştırma projesini destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığına teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Fiala, P., Degrande, G., Augusztinovicz, F., Numerical Modelling of Ground Borne Noise and Vibration in Buildings due to Surface Rail Traffic, **Journal of Sound and Vibration**, 301, 718-738, 2007.
2. Auersch, L., The Effect of Critically Moving Loads on the Vibrations of Soft Soils and Isolated Railway Tracks, **Journal of Sound and Vib.**, 310, 587-607, 2008.
3. Ahmad, S., Al-Hussaini, T. M., Simplified Design for Vibration Screening by Open and Infilled Trenches, **Journal of Geotechnical Engineering**, 117 (1), 67-88, 1991.
4. Celebi, E., Firat, S., Beyhan, G., Cankaya, I., Vural, I., Kirtel, O., Field Experiments on Wave Propagations and Vibration Isolation by Using Wave Barriers, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 29 (5), 824-833, 2009.
5. Forchap, E., Verbic, B., Wave Propagation and Reduction of Foundation Vibrations, **Berg-Verlag GmbH**, Bochum, 165-178, 1994.
6. Baker, J. M., An Experimental Study on Vibration Screening by In-Filled Trench Barriers,

- M. S. Thesis, State University of New York at Buffalo, USA, 1994.
7. Thau, S. A., Pao, Y. H., Diffraction of Horizontal Hear Waves by a Parabolic Cylinder and Dynamic Stress Concentrations, **J. Appl. Mech.**, ASME, 785-92, 1966.
8. Fuyuki, M., Matsumoto, Y., Finite Difference Analysis of Rayleigh Wave Scattering at a Trench, **Bull. of Seism. Society of America**, 70 (6), 2051-69, 1980.
9. Barber, J. R., Surface Displacements due to a Steadily Moving Point Force, **J. Appl. Mech.**, 63, 245-251, 1996.
10. Yang, B. Y., Hung, H. H., A 2.5D Finite/Infinite Element Approach for Modelling Visco-Elastic Bodies Subjected to Moving Loads, **Int. J. Numer. Meth. Eng.**, 240, 1317-1336, 2001.
11. Celebi, E., Schmid, G., Investigation of Ground Vibrations Induced by Moving Loads, **Engineering Structures**, 27, 1981-1998, 2005.
12. Karlström, A., Boström, A., Efficiency of Trenches along Railways for Trains Moving at Sub- or Supersonic Speeds, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 27 (7), 625-641, 2007.
13. Kirtel, O., Goktepe, F., Celebi, E., Mitigation of Structural Responses to Train Induced Vibrations by Using Open and In-Filled Trenches, **9th International Congress on Advances in Civil Engineering, KTU**, Trabzon, Turkey, 2010.
14. 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.
15. Huber, G., Erschütterungsausbreitung beim Rad/Schiene-system, Veröffentlichungen 115, Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1988.
16. 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.
17. 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., Haag, D. D., Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Published and Distributed by A.A. Balkema Publisher, The Netherlands, 2002.
18. Kuhlemeyer, R. L., Lysmer, J., Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, 99 (SM5), 421-427, 1973.
19. Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H., On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics, **IBM Journal**, 11, 215-234, 1967.

20. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. L., Finite Dynamic Model for Infinite Media, **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 95, 859–875, 1969.
21. Wolf, J. P., Song, C., Dynamic Stiffness Matrix of Unbounded Soil by Finite Element Multi-Cell Cloning, **Ertq. Eng. and Structural Dyn.**, 23, 233-250, 1994.
22. Rosset, J. M., Kausel, E., Dynamic Soil-Structure Interaction, **Proc. 2nd Int. Conference on Num. Methods In Geomechanics**, Blacksburg, Virginia, 1976.
23. Lysemer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S., Tajirian, F., SASSI A System for Analysis of Soil–Structure Interaction, Theoretical manual, 1988.
24. Al-Hussaini, T. M., Ahmad, S., Design of Wave Barriers for Reduction of Horizontal Ground Vibration, **Journal of Geotechnical Engineering**, 117 (4), 616–636, 1991.