

FARKLI FREKANS İÇERİKLERİNE SAHİP TREN GEÇİŞLERİNDE OLUŞAN TİTREŞİM ENERJİSİNİN SOĞURULMASININ DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL EVALUATION OF THE
ABSORPTION OF VIBRATION ENERGY IN TRAIN PASSES WITH
DIFFERENT FREQUENCY CONTENTS

**Murat ŞAHİN¹ Fatih GÖKTEPE² Erkan ÇELEBİ³ Abdullah Can ZÜLFİKAR⁴
Osman KIRTEL⁵**

ABSTRACT

The field studies on railway transportation systems in our country only being focused on platform vibrations and reduction of noise contamination. The necessity of investigating the vibration effect induced by the repetitive passage of the high-speed train, freight and suburban train with different frequency contents remains up to date in terms of wave propagation, especially in soft soils with low shear wave velocity for our country. Most of the vibration energy is transferred by Rayleigh Surface waves. The resonance phenomenon that occurs when the critical velocity of the moving load is equal to the velocity of Rayleigh waves can create strong ground motion on the surrounding railway and are likely to result in damaging vibrations. This study focuses on the determination of vibration formation mechanism and wave propagation characteristics caused by trains at different speeds in alluvial soil conditions used in passenger and freight transportation. To compare the experimental measurement at consecutive observation points and the analytical solutions defining the absorption of vibration energy in the soil medium depending on wave type and geometric damping, Kırkpınar region between İzmit and Arifiye was selected. The absorption of vibration in the experimental measurements did not show a proportional decrease while the reduction in vibrational behavior obtained from analytical solutions decreased proportionally depending on the distance.

Keywords: Energy dissipation performance, in situ measurement, Rayleigh surface waves, passage of the high-speed train, freight and suburban train

¹ İnşaat Mühendisi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı 74110, Bartın, muratemirbeyoglu@gmail.com

² Dr. Öğr. Üyesi, Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 74110, Bartın, fgoktepe@bartin.edu.tr

³ Prof. Dr., Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 54187, Sakarya, ecelebi@sakarya.edu.tr

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 41400, İstanbul, aczulfikar@gtu.edu.tr

⁵ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 54187, Sakarya, okirtel@sakarya.edu.tr

ÖZET

Ülkemizde demiryolu ulaşım sistemlerini ilgilendiren konularda gerçekleştirilen saha çalışmaları sadece demiryolu üstyapı titreşimleri ve gürültü kirliliğinin azaltılmasına odaklanmıştır. Farklı frekans içeriklerine sahip yüksek hızlı tren (YHT) ile yük ve banliyö trenlerinin tekrarlı geçişleri sırasında meydana getirdiği titreşim etkilerinin özellikle kayma dalgası hızı düşük alüvyon zemin koşullarında dalga yayılım açısından irdelenmesi gerekliliği ülkemiz için güncelliğini korumaktadır. Titreşim enerjisinin büyük bir bölümü Rayleigh yüzey dalgaları tarafından taşınmaktadır. Hareketli yüke ait kritik hızın Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılış hızına özdeş olduğu durumlarda, özellikle yumuşak zemin koşullarında meydana gelebilecek rezonans fenomeni ile demiryolu platformu çevresinde kuvvetli yer hareketleri ve bunun sonucunda hasar yapıcı titreşimlerin oluşması muhtemeldir. Yapılan bu çalışma, yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan farklı hızlardaki tren geçişlerinin alüvyon zemin ortamında sebep olduğu titreşim oluşum mekanizmasının ve dalga yayılım özelliklerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözümler ile ardışık gözlem noktalarındaki deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması için İzmit-Arifiye arasında bulunan Kırkpınar bölgesi seçilmiştir. Analitik çözümlerle elde edilen titreşim azalım ilişkisi mesafeye bağlı olarak orantılı bir şekilde azalmışken, deneysel ölçümlerdeki titreşim soğurulması orantılı bir azalım göstermemiştir.

Anahtar sözcükler: Enerji soğurma performansı, yerinde zemin titreşim ölçümleri, Rayleigh yüzey dalgası, yüksek hızlı tren ile yük ve banliyö tren geçişleri

1. GİRİŞ

İnsanların hayat standartlarının ekonomik gelişmeye bağlı yükselmesiyle modern kent topluluklarının yoğun yerleşim bölgelerinde, daha kaliteli, güvenli yaşam isteği ve çevresel etkenlerin ürettiği problemlere karşı gösterdikleri duyarlılıklar hızla artmaktadır. Deprem yer hareketi dışındaki insan yapısı üretilen yüksek frekanslı titreşim kaynaklarının (ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik akış yükleri, masif inşaat aktiviteleri, patlamalar vb.) oluşturduğu kuvvetli dalgaların yumuşak zemin ortamında yayılışının incelenmesi, çevresel titreşim problemlerinin mühendislik çözümlerinin üretilmesi açısından önem kazanmıştır (Bata, 1971; Massarsch, 1993, 2004; Xia vd., 2007).

Çağdaş dünyada modern sanayinin hızlı ilerlemesi, ticaret merkezlerinin gelişimi, bunlara bağlı olarak modern kentlerin sürekli genişlemeleri ile insanların günlük yaşam ve çalışma ortamları üzerindeki ulaşım sistemlerinin oluşturduğu titreşim etkileri, büyük şehir yöneticilerinin, ulaşım sistemi planlayıcılarının, trafik sistemi tasarımcılarının ve çevre sorunları ile ilgili dünyanın her yerindeki mühendis araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Crispino ve D'apuzzo (2001) İtalya'nın Napoli bölgesinde bulunan kültürel miras koruması altındaki tarihi yapılarda karayolu trafiğinin meydana getirdiği titreşim etkilerini ölçmüşler ve İngiliz standardında BS 6472 (2008) belirtilen kriterlere göre tespit ettikleri maksimum partikül hızını karşılaştırarak değerlendirmişlerdir.

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığı ile yük ve banliyö trenlerine sahip birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de deprem yer hareketi dışındaki farklı frekans içeriklerine sahip insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu titreşimlerin oluşum mekanizmasının ve bunların yumuşak zemin koşullarında yayılma özelliklerinin incelenmesi önemli

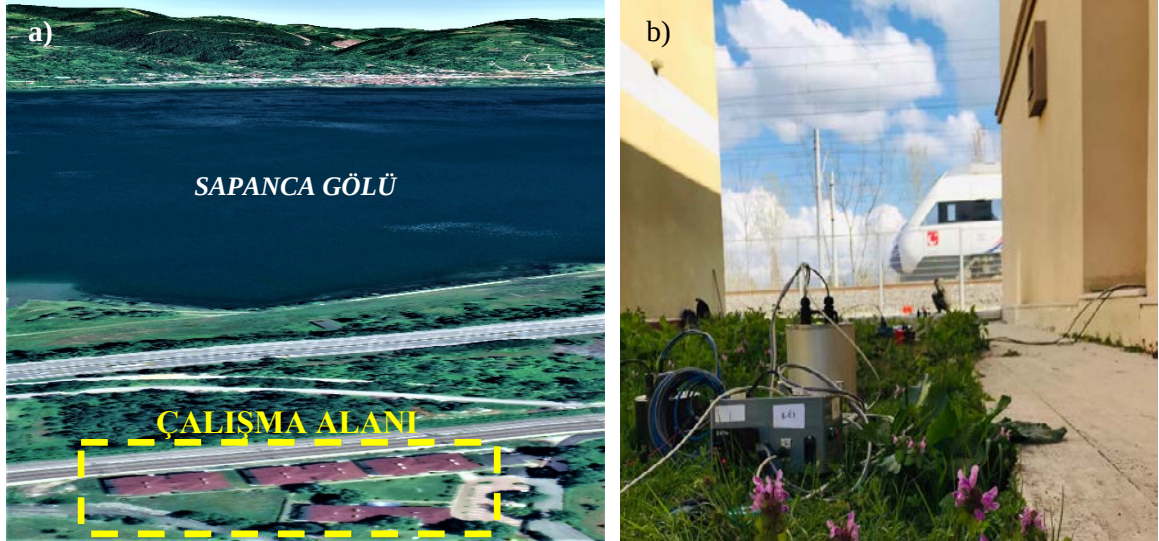
araştırma konuları olmuştur. Titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözümler Bornitz (1931) ile ardışık gözlem noktalarındaki deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılması ile ilgili olarak literatürde yapılan birçok çalışma mevcuttur (Macijauskas ve Van Baars, 2014; Ju ve Ni, 2007; Athanasopoulos vd., 2000; Kim ve Lee, 2000; Göktepe vd., 2017).

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının kent içinde ürettiği çevresel titreşimlerin etkileri, trafik akış yoğunluklarına, tren seti yüklerine, etkime sürelerine, seyahat hızlarına bağlı incelenmiş ve dalga yayılımı probleminin anlaşılabilmesiyle ilgili birçok saha deneyleri gerçekleştirilmiş, elde edilen önemli sonuçlar yayınlanmıştır. Degrande ve Schillemans (2001) Brüksel-Paris arasında test sürüşü yapan bir lokomotif ve 7 vagonlu oluşan Thalys HST tipi yüksek hızlı yolcu treninin 223-314 km/saat arasındaki geçiş hızlarında demiryolu ve yakın çevrede (4-72 m arasında 14 farklı gözlem noktası) oluşturdukları serbest zemin titreşimlerini incelemişlerdir. Xia vd. (2005) Çin'in Kuzey-Doğu bölgesindeki Shenyang-Harbin demiryolu hattında faaliyet gösteren yük ve yolcu trenlerinin 20-80 km/saat arasında değişen geçiş hızlarında ürettikleri titreşimleri, ana istasyona 12 m uzaklıktaki 2-3 katlı betonarme binalarda, seçilmiş bir köprü ayağı (Daqinghe köprüsü) üzerinde ve yakın çevresindeki serbest zemin bölgesinde (köprüden 20 m aralıklarla 3 ölçüm noktası) incelemişlerdir. Tren hızının ve yükünün artmasıyla bina katlarında titreşim seviyesinin arttığı, demiryolundan uzaklaştıkça serbest zeminde etkisinin hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, Branderhorst (1997) Hollanda'nın Amsterdam-Utrecht şehirleri arasında 40-160 km/h hızlarında seyahat eden aynı tip yüksek hızlı yolcu trenlerinin meydana getirdiği çevresel titreşimleri ölçerek, elde ettikleri veri setini sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmak üzere araştırmacılara sunmuşlardır. Bununla birlikte, Auersch (1989) Almanya'da faaliyet gösteren ICE tipi yüksek hızlı yolcu trenlerinin 100-300 km/h arasında değişen hızlarda elde ettiği ölçüm sonuçlarını rapor olarak yayınlamıştır. Aynı şekilde Adolfsson vd. (1999) İsveç'in batı sahil hattında Göteborg-Malmö arasında kullanılan X2000 tipi trenlerin 200 km/saat aşan hızda oluşturduğu çevresel titreşimleri kayıt altına almışlardır. Titreşim etkilerini kapsayan çevresel değerlendirme sonuçları yeni ulaşım sistemlerinin tasarımı ve planlanması aşamasında gerekli programlardan biri haline gelmiştir.

Ülkemizde demiryolu ulaşım sistemlerini ilgilendiren konularda gerçekleştirilen az sayıdaki saha araştırma çalışmaları kent içi hafif raylı sistem titreşimlerinin yolcu konforu ve güvenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesiyle, seyahat kalitesinin ve çevresel akustik sorunların iyileştirilmesiyle sınırlı kalmıştır. Ulusal literatürde yapılan yerel bir çalışmada ise, İstanbul Aksaray-Havalimanı şehir içi raylı ulaşım trafiğinde kullanılan ve maksimum seyahat hızları 50km/saat'i aşmayan hafif metro araçlarının geçişleri sırasında demiryolu hattında ve yakınındaki idari bir binada oluşturduğu titreşim etkilerinin ölçülerek konfor analizi yapılmıştır (Güçlü vd., 2010). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ölçümler ve simülasyon çalışmaları, taşıt tekerleği-ray etkileşimi sonucu çevreye yayılan konfor bozucu titreşimleri ve gürültüyü azaltmak için araç gövdesinde ve demiryolu alt yapısında alınabilecek izolasyon yöntemlerine odaklanmıştır. Yapılan bu çalışmada, YHT ile yük ve banliyö trenlerinin geçişleri esnasında demiryolu üstyapısının yakın çevresinde meydana gelen titreşim etkilerinin yerinde incelenebilmesi için trafik akış hızının yüksek değere ulaştığı alüvyon zemin koşullarında (zemin kayma dalga hızı < 200 m/sn) serbest zemin titreşimleri ölçülmüştür. İzmit-Arifiye arasındaki Kırkpınar bölgesinde belirlenen pilot bölgede kayıt altına alınan deneysel ölçüm sonuçları ile titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

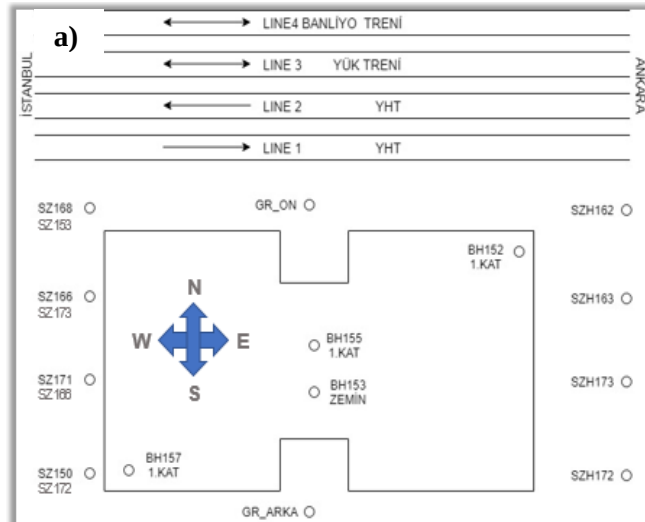
2. MATERİYAL VE YÖNTEM

Yüksek hızlı demiryolu hattına yakın seçilmiş ölçüm sahası, Sakarya'nın Sapanca ilçesinde bulunan SUBÜ Kırkpınar turizm MYO uygulama oteli ve sosyal tesislerinin bulunduğu yerleşkedir (Şekil 1). Çalışma kapsamında, İstanbul-Ankara arasında toplam uzunluğu 533 km olan, taşıma gücü zayıf alüvyon zemin ortamlarından ve yoğun yerleşim bölgelerinden geçen Köseköy-Pamukova arasındaki YHT ile yük ve banliyö trenlerinin tekrarlı geçişleri dikkate alınmıştır.



Şekil 1. İncelenecek sahanın a) Kuş bakışı görünüşü b) Hızlı trenin geçişi

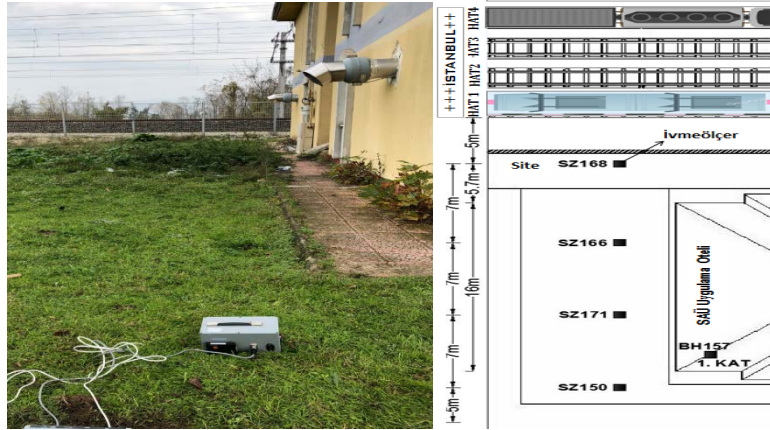
Yerel zemin koşullarını dikkate alarak 200-250 km/saat hız aralığındaki YHT trenleri ile yük ve banliyö trenlerinin çift yönlü tekrarlı geçişlerinin ürettiği serbest yüzey yer hareketini dalga oluşum mekanizmasına bağlı incelemek ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için belirli aralıklarla güzergâha sistematik olarak dik ve paralel dizilmiş ivmeölçerler ile titreşim kaydı alınmıştır (Şekil 2a). Seçilen pilot bölgede gerçekleştirilen titreşim ölçümleri için sahanın genel durumu Şekil 2b'de şematik olarak verilmiştir. Çalışma sahasında 4 ayrı tren hattı bulunmakta olup, seçilen örnek binaya yakın mesafede bulunan ilk iki hattan YHT geçişi olmaktadır. Üçüncü hattan yük treni geçmekte iken, dördüncü hattan ise banliyö treni geçmektedir.





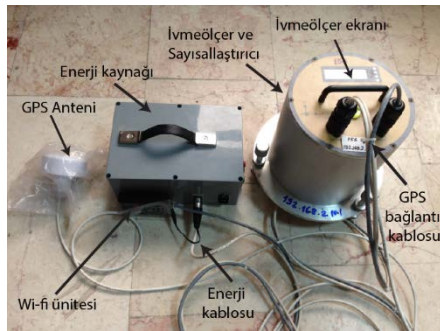
Şekil 2. a) Kayıt cihazları yerleşim şeması b) Seçilen çalışma sahasının genel görünümü

Serbest zemin hareketini gözlemlemek üzere kullanılan ivme ölçerler Şekil 3’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. İvmeölçerler arası mesafe 7 m ve aynı hizada olacak biçimde konumlandırılmıştır. Bu çalışma için 3 kayıt YHT geçişi, 1 kayıt yük treni geçişi ve 1 kayıt yolcu treni geçişi; toplamda 5 tren geçişi için kayıt alınmıştır.



Şekil 3. a) Saha ölçümleri için kullanılan ivmeölçer sensörlerinin dizilimi

Çalışma kapsamında kullanılan ivmeölçerler çok düşük gürültü seviyelerine sahip, üç eksenli Capacitive Force Micro-machined sensörler ile zayıf titreşim hareketlerini ölçebilen, DAC-3HDG tipi 32 bit yüksek çözünürlüklü ivmeölçerlerdir. Saha ölçümlerinde kullanılan cihazlar: GPS anteni, enerji kaynağı ve ivmeölçer ana kutusu olmak üzere üç temel parçadan oluşmaktadır (Şekil 4). Bunlara ait teknik özellikler Şekil 4’de ayrıntılı verilmiştir. GPS anteni ve enerji kabloları ivmeölçere iki kablo yardımı ile bağlanırlar. Ana kutunun içinde üç tane MEMS sensörü, ADC sayısallaştırıcı ve ivmelerin kayıt altına alındığı bellek vardır.



Donanım	Özellikleri
İvmeölçer	3 Eksen a-) Capacitive Force Micromachined Sensor b-) 300ng/√Hz. noise c-) ±2g Full calibration d-) ±5 V Differential output e-) Resolution over 200 Hz. bandwidth f-) Self test input (Kendi kendini test edebilme girişi)
Güç Kaynağı	12 VDC
Çalışma Sıcaklığı	-20 +80
Haberleşme Portu	1 Ethernet / TCP-IP
GPS	50 Kanal Super Sense Dahili
Çalışma Frekansı	50/100/200 Hz. (5mS)
Hafıza Kartı	2 Gb Dahili (140 saat kayıt alabilme yeteneği) Kutu
ADC	32 Bit yüksek çözünürlük.
Filtre	2 Kanal FIR/Antialiasing

Şekil 4. Veri kaydedici ivmeölçer ve teknik özellikleri

3. DALGA SOĞURULMASININ DENEYSEL VE ANALİTİK ANALİZİ

Zemin dinamiği problemlerinde dalga tipleri genel olarak cisim ve yüzey dalgaları olarak tanımlanmaktadır. Jeolojik zemin katmanının yüzeyinde yayılan Love ve Rayleigh dalgaları hem serbest zemin titreşimlerinde hem de mühendislik yapılarında P ve S cisim dalgalarına göre daha fazla deformasyonlara sebep olmaktadır. Titreşim dalgasının enerjisi ve genlikleri dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça mesafeye bağlı olarak azalmaktadır. Bu azalım oranı (w_2 / w_1), Bornitz' in aşağıdaki denklemiyle de açıklanabilen, geometrik (radyasyon) sönümleme ($(r_1 / r_2)^n$) ve malzeme sönümlemesi ($e^{\alpha(r_1 - r_2)}$) olmak üzere iki bileşene bağlıdır (Bornitz, 1931).

$$\text{Bornitz bağıntısı} \rightarrow \frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{\alpha(r_1 - r_2)} \quad (1)$$

Bornitz yaklaşımındaki diğer parametreler sırasıyla; r_1 ve r_2 , ölçüm noktalarının titreşim kaynağına olan uzaklığı, n geometrik sönümleme katsayısı, α ise bir malzeme sönümleme katsayısı şeklinde özetlenebilir. Geometrik sönümleme mekanizması, farklı frekans içeriklerine bağlı olarak oluşan enerji yoğunluğunun dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça azalması biçiminde mesafeye bağlı oluşmaktadır (Kim ve Lee, 2000). Geometrik sönümleme katsayısı (n), Tablo 1'de gösterildiği gibi yayılan dalganın tipi, kaynak tipi ve konumu değerlendirilerek analitik olarak belirlenebilir.

Tablo 1. Çeşitli kaynaklar için geometrik sönümleme katsayıları (Athanasopoulos vd., 2000)

Kaynak Tipi	Dalga Tipi	Kaynak Konumu	n
Noktasal	Cisim dalgaları	Yüzey	2.0
Noktasal	Yüzey dalgaları	Yüzey	0.5
Noktasal	Cisim dalgaları	Derin	1.0
Çizgisel	Cisim dalgaları	Yüzey	1.0
Çizgisel	Yüzey dalgaları	Yüzey	0
Çizgisel	Cisim dalgaları	Derin	0.5

Literatürde yapılan birçok çalışmada (Amick ve Gendreau, 2000; Athanasopoulos vd. 2000; Kim ve Lee, 2000) Bornitz çözüm yaklaşımında kullanılan n geometrik sönümleme katsayısı ve α malzeme sönümleme katsayısı değerlerinin; farklı frekans içeriklerine bağlı dinamik yük kaynaklarının farklı kombinasyonları ile alttaki jeolojik zemin ortamına bağlı olarak özenle seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Tablo 1'de farklı dinamik yük kaynaklarına göre Geometrik sönümleme katsayısı (n) seçilebilirken, bu katsayı farklı tipteki zemin sınıfları için de Tablo 2'de verildiği biçimde de tanımlanabilmektedir.

Tablo 2. Zemin tipine göre Geometrik Sönüm Katsayıları(n) (Amick ve Gendreau, 2000)

Zemin Tipleri	Geometrik Sönüm Katsayısı (n)
Kumlu zemin	1.0
Az kumlu zemin	1.5
Yumuşak killi ve kum dolgu	0.8 – 1.0
Çakıllı, kumlu sağlam zemin	1.0
Sağlam ve kayalık zemin	1.4 – 1.7
Siltli zemin	0.8
Killi zemin	1.4 – 1.5

Malzeme sönümleme katsayısı α değerinin belirlenmesinde ise titreşim kaynağının frekansına ve zemin tipine bağlı olarak aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$\alpha = \alpha_0 f \quad \text{veya} \quad \alpha = \frac{2 \pi f D}{V_R} \quad (2)$$

Bu denklemde V_R Rayleigh dalgalarının yayılma hızı, D sönüm oranı, f titreşim kaynağının baskın frekans değeri, α_0 ise zemin tipine göre Tablo 3'ten elde edilen değerdir. V_R değeri yüzeye yakın noktadaki ölçülen kayma dalgası hızı V_S değerine eşit alınabilmekte olup genellikle yumuşak kil ve gevşek kum zeminler için $V_S=80\sim 220\text{m/s}$ aralığında değişmektedir (Athanasopoulos vd., 2000). D sönüm oranı ise taşıma gücü zayıf zemin katmanları için %1 civarında alınabilmektedir (Macijauskas ve Van Baars, 2014).

Tablo 3. Çeşitli zemin tipleri için frekanstan bağımsız α_0 değerleri (Athanasopoulos vd., 2000)

Zemin Tipleri	α_0 değerleri (s/m)
Kaya	$(0.385\sim 0.485)\times 10^{-3}$
Kumtaşı	$(0.580\sim 0.775)\times 10^{-3}$
Sert plastik killler	$(0.385\sim 0.525)\times 10^{-3}$
Orta yoğunluktaki kırma taşlar	$(0.850\sim 1.100)\times 10^{-3}$
Plastik killler, iri kumlar ve orta yoğunluklu çakıllar	$(0.965\sim 1.200)\times 10^{-3}$
Yumuşak plastik killler, Siltler, Hafif yoğun, Orta veya iri kumlar	$(1.255\sim 1.450)\times 10^{-3}$
Siltli killler, Siltler ve doymuş ince kumlar	$(1.200\sim 1.300)\times 10^{-3}$
Alüvyon killler ve doymamış gevşek kumlar	$(1.800\sim 2.050)\times 10^{-3}$

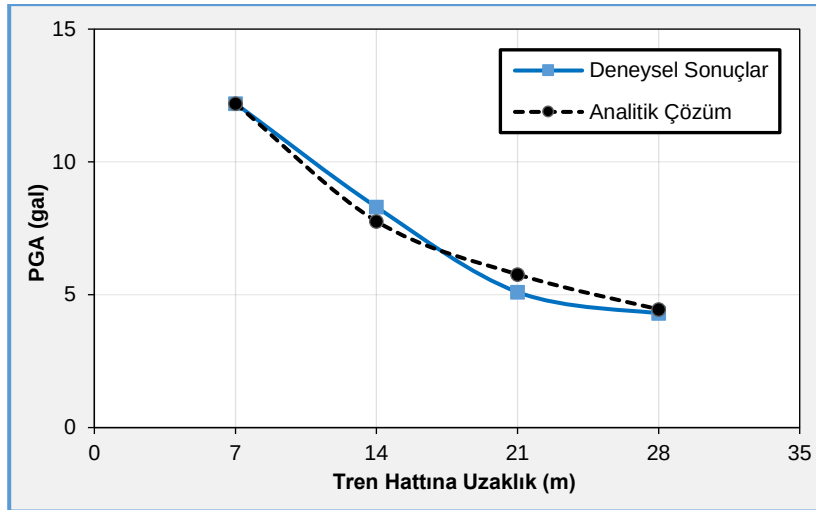
Dinamik yük kaynağı olarak düşünülen YHT geçişlerinin demiryolu platformuna yakın bölgelerde meydana getirdiği ortalama titreşim frekansı, yapılan sayısal ölçümlere ait ham verilerin işlenmesi sonucu elde edilen Fourier genlik spektrumlarına göre 80-90Hz civarında yüksek frekanslı bileşenler olarak hesaplanmıştır. Bu değer demiryolu hattından uzaklaştıkça ortalama 20-45Hz aralığına kadar düşmektedir. Yük treninde 20-80Hz arasında daha yayılı olan baskın frekanslar banliyö treninde ise 30-40Hz aralığında hesaplanmıştır.

Dinamik yük kaynaklarının meydana getirdiği titreşim etkilerinin jeolojik zemin ortamında soğurulmasını ifade eden malzeme sönümü mekanizması zemin ortamının tipi, su muhtevası ve sıcaklık değişimi gibi parametrelerin değişiminden kaynaklanmaktadır. Genellikle malzeme sönümlemesinin, zemin partiküllerinin yüzeylerinde birbirine sürtünmesi ve kayma davranışına bağlı olarak gelişen histeresiz enerji kaybına sebep olduğu düşünülmektedir. Zemin tipi bakımından değerlendirildiğinde ise sağlam zeminlerin titreşim enerjisini soğurduğu ve kohezyon sebebiyle killi zeminlerin, kumlu zeminlere göre daha fazla sönümleme gösterme eğiliminde olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, su muhtevası bakımından değerlendirildiğinde ise nemli kumların, kuru kumlara göre titreşim dalgalarının enerjisini daha az sönümlediği belirtilmiştir (Amick ve Gendreau, 2000). Bunun sebebi olarak, kum partiküllerinin arasındaki gözeneklerde bulunan suyun tanecikler arasında sürtünmeyi azalttığı ve sıkıştırma enerjisinin önemli bir bölümünü ilettiği şeklinde yorumlanmıştır. Sıcaklık bakımından değerlendirildiğinde ise zemin içinde bulunan suyun donması, tanecikleri arasındaki sürtünmeyi azalttığından titreşim dalgalarının enerjisini daha az sönümlediği anlaşılmıştır. Malzeme sönümlemesinin belirlenmesinde farklı zemin tipleri için α değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Zemin tipine göre Malzeme Sönüm Katsayıları(α) (Amick ve Gendreau, 2000)

Zemin Tipleri	Malzeme Sönüm Katsayısı α (m^{-1})
Siltli çakıllı kum	0.13
Granül dolgu üzerine demirsiz beton	0.20
Siltli ince kum	0.26
Suya doymuş ince taneli kum	0.10
Suya doymuş ve donmuş ince taneli kum	0.06
Balçık tabakası ve organik siltli suya doymuş kum	0.04
Suya doymamış killi gevşek kum	0.04
Kireçli ince kum	0.10
Killi ve ince kumlu balçık	0.10
Kum ve siltli suya doymuş kil	0.0-0.12
Kum ve siltler	0.026-0.36
Kıyılarda çamur katmanı üzeri kum dolgusu	0.05-0.2
Kıyılarda kuru kum dolgusu	0.026-0.065
Yumuşak Bangkok kili	0.026-0.44

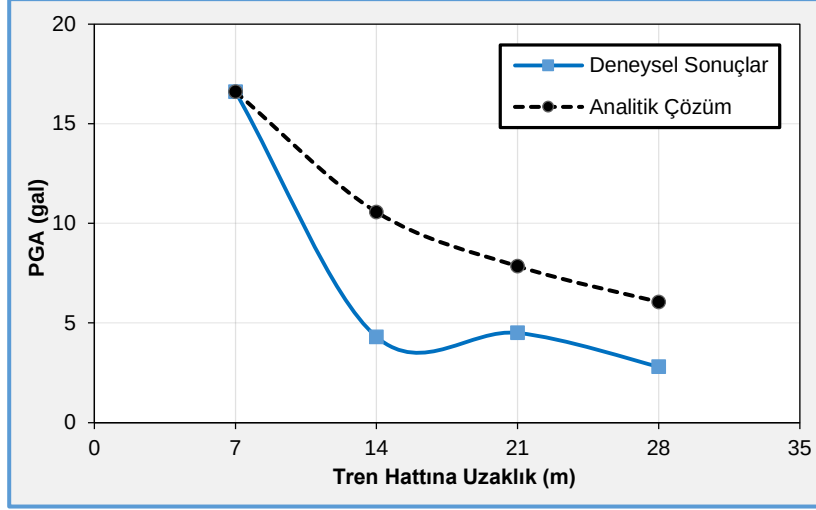
Dinamik yük kaynağından farklı mesafelerde demiryolu hattına dik doğrultuda serbest zemin yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla alınan veriler filtreleme programları kullanılarak ivme genlik değerleri elde edilmiştir. Tüm ivmeölçerlerden alınan kayıtlar için geçiş sürelerine uygun zaman aralıkları belirlenmiş ve ölçüm değerleri senkronize olacak şekilde ham kayıtlar kısaltılarak kesilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara ait veri analizleri zaman ve frekans tanım alanında saniyede 200 data kaydedilebilecek şekilde ayarlanmıştır ($\Delta t=1/200 = 0.005$). Tren geçişlerinin seçilmiş ölçüm noktalarında kaydedilen ivme-zaman verilerinden integrasyon işlemi için 4.dereceden Butterworth Band geçişli filtreleme fonksiyonu kullanılmıştır. Bornitz' in iki nokta arasındaki titreşim enerji soğurulmasına bağlı analitik çözüm sonuçları ile deneysel veriler arasındaki azalım ilişkisi mesafeye bağlı olarak elde edilerek Şekil 5-14'de verilmiştir.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	12.20	12.20
14	8.30	7.77
21	5.10	5.77
28	4.30	4.45

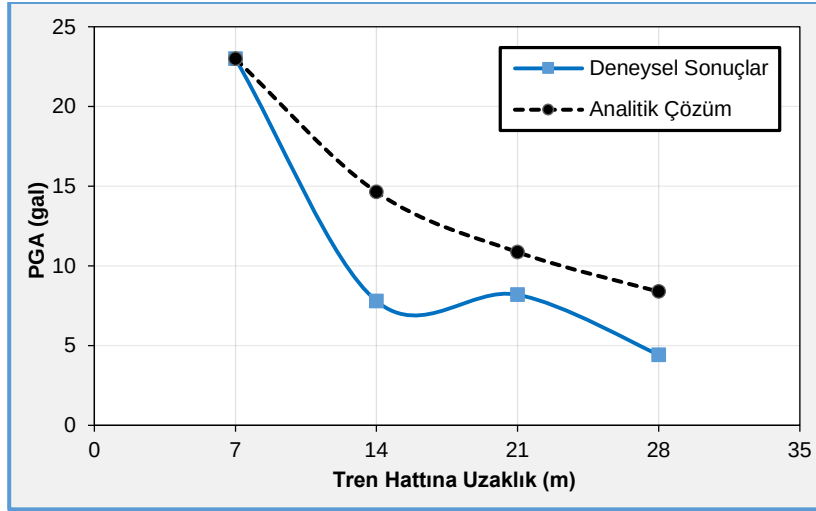
Şekil 5. YHT Ankara yönü 1.kayıt serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	16.60	16.60
14	4.30	10.57
21	4.50	7.85
28	2.80	6.06

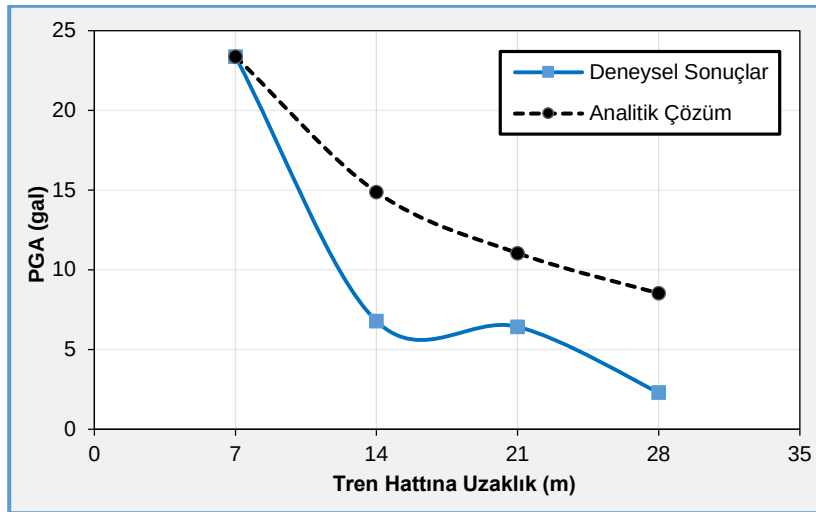
Şekil 6. YHT Ankara yönü 1.kayıt serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	23.00	23.00
14	7.80	14.64
21	8.20	10.87
28	4.43	8.39

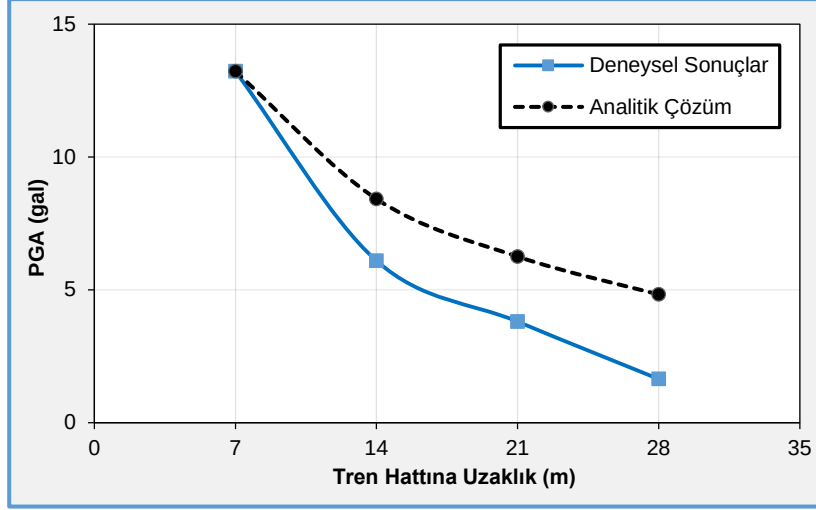
Şekil 7. YHT Ankara yönü 2.kayıt serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	23.38	23.38
14	6.78	14.88
21	6.43	11.05
28	2.30	8.53

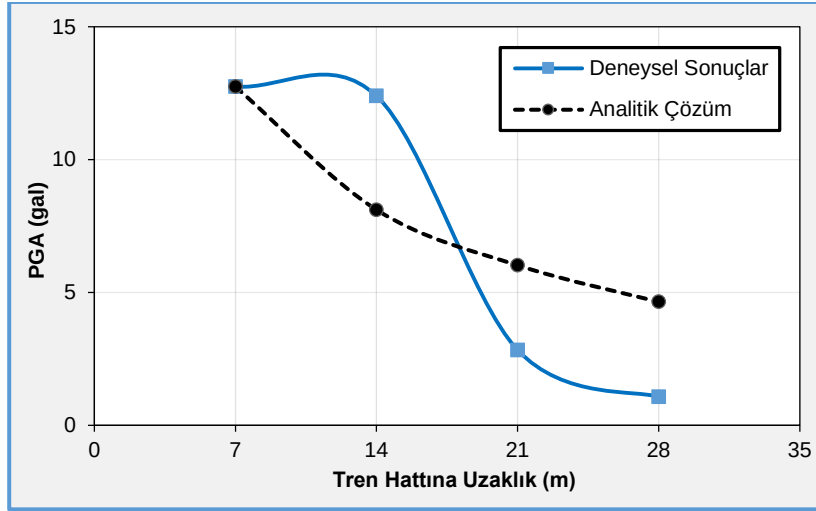
Şekil 8. YHT Ankara yönü 2.kayıt serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ153
14	SZ173
21	SZ166
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	13.22	13.22
14	6.09	8.42
21	3.80	6.25
28	1.64	4.82

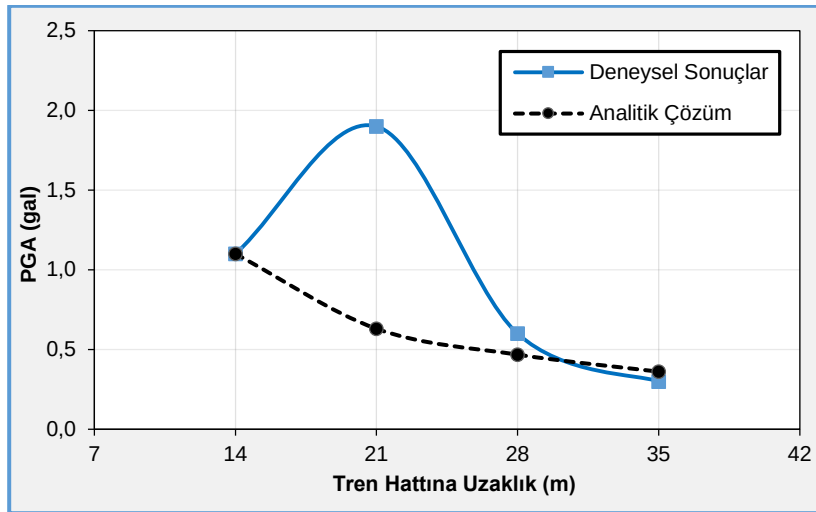
Şekil 9. **YHT** Ankara yönü 3.kayıt serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ153
14	SZ173
21	SZ166
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	12.75	12.75
14	12.40	8.12
21	2.84	6.03
28	1.07	4.65

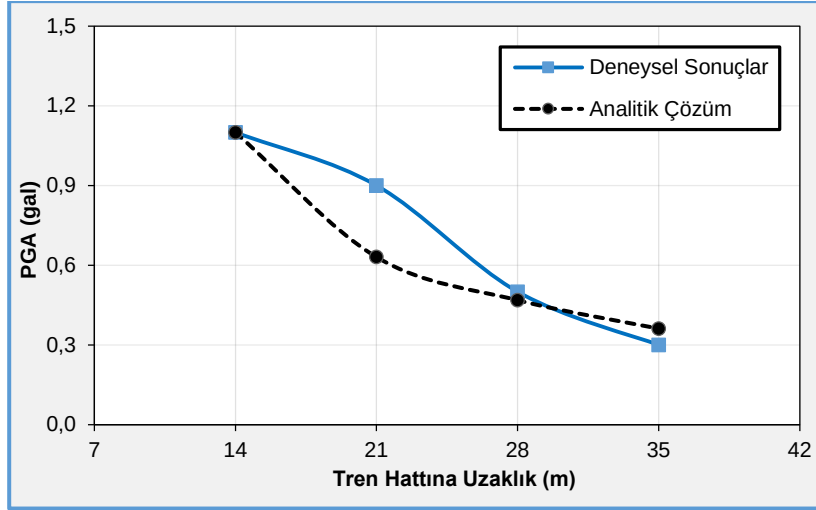
Şekil 10. **YHT** Ankara yönü 3.kayıt serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	1.10	1.10
21	1.90	0.63
28	0.60	0.47
35	0.30	0.36

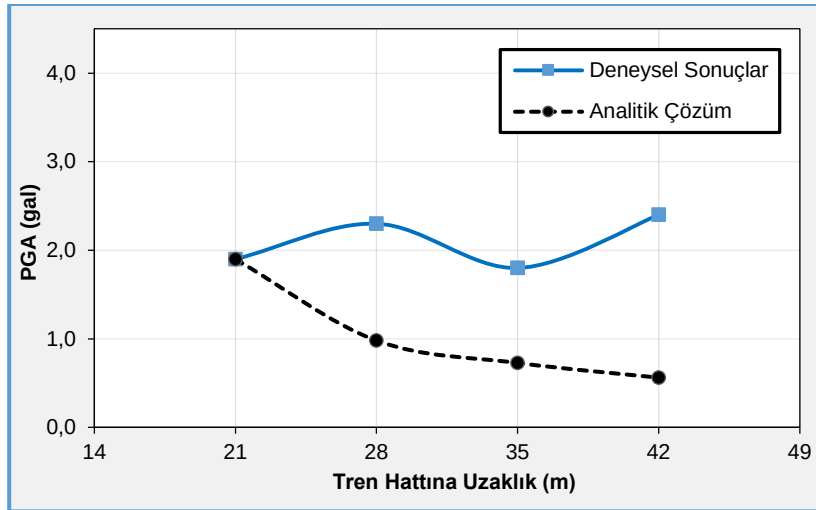
Şekil 11. Ankara yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	1.10	1.10
21	0.90	0.63
28	0.50	0.47
35	0.30	0.36

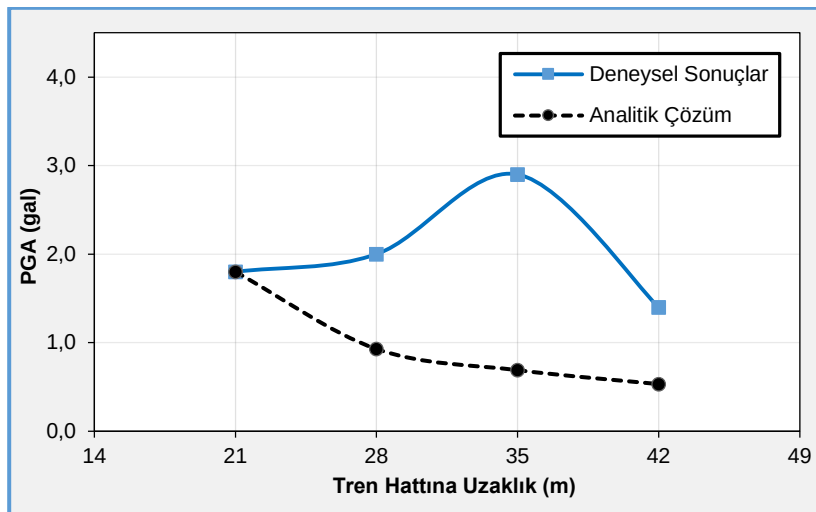
Şekil 12. Ankara yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.90	1.90
28	2.30	0.98
35	1.80	0.73
42	2.40	0.56

Şekil 13. Ankara yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.80	1.80
28	2.00	0.93
35	2.90	0.69
42	1.40	0.53

Şekil 14. Ankara yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) ölçüm sonuçları ile analitik çözüm PGA (maks. yer ivmesi) azalım eğrileri karşılaştırma grafiği

Genel olarak, analitik çözümlere ait azalım ilişkileri tüm trenler için orantılı olarak elde edilmiştir. Ancak, deneysel olarak bu azalım ilişkisi farklı frekans içeriklerine sahip YHT ile yük ve banliyö trenlerinin tekrarlı geçişleri sırasında orantılı bir azalım ilişkisi göstermemiştir. Yüksek frekans içeriklerine sahip YHT geçişlerinde en iyi sonuç demir yolu hattına dik doğrultuda elde edilmiştir. Bununla birlikte, YHT geçişleri sırasında hatta dik ve paralel doğrultuda ivmeölçer'den alınan deneysel veriler genel olarak azalım ilişkisinin dışında davranış sergilemiştir. Bu durum, tabakalı zemin ortamında yansıyan dalgaların varlığını düşündürmüştür. YHT'ye göre daha düşük frekans içeriklerine sahip yük ve banliyö tren geçişlerine ait serbest zemin titreşimleri için hesaplanan maksimum ivme değerleri genel olarak analitik çözümden daha fazla çıkmıştır. Bu fark demiryolu hattına dik doğrultuda özellikle banliyö tren geçişinde daha da artmış olup Yük trenleri genel olarak banliyö trenlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

4. SONUÇLAR

Ülkemizde demiryolu ulaşım sistemlerini ilgilendiren konularda gerçekleştirilen saha çalışmaları sadece demiryolu üstyapı titreşimleri ve gürültü kirliliğinin azaltılmasına odaklanmıştır. Farklı frekans içeriklerine sahip YHT ile yük ve banliyö trenlerinin tekrarlı geçişleri sırasında meydana getirdiği titreşim etkilerinin özellikle kayma dalgası hızı düşük alüvyon zemin koşullarında dalga yayılım açısından irdelenmesi gerekliliği ülkemiz için güncelliğini korumaktadır. Farklı frekans içeriklerine bağlı oluşan titreşim mekanizmasının zemin koşullarında soğurularak dalga yayılım özelliklerinin belirlenmesinde, özellikle alüvyon zemin ortamının jeolojik ve geoteknik özelliklerini hesaba katan iyileştirmelerin söz konusu analitik yaklaşımlar için yapılması gerekmektedir. Yapılan bu çalışma ile yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan farklı hızlardaki tren geçişlerinin alüvyon zemin ortamında sebep olduğu çevresel titreşim etkileri sebebiyle, titreşim oluşum mekanizmasının ve dalga yayılım özelliklerinin belirlenmesine odaklanılmıştır.

Analitik çözümlerle elde edilen titreşim azalım miktarları mesafeye bağlı olarak orantılı bir şekilde azalmışken, doğal zemin koşullarına bağlı elde edilen deneysel verilerdeki titreşim soğurulması bazı durumlarda orantılı bir azalım göstermemiştir. Dinamik yük kaynağından yayılan titreşim enerjisinin mesafeye bağlı olarak bazı lokasyonlarda azalım göstermemesinin sebebi olarak, dalgaların jeolojik zemin ortamındaki yansıması veya kırılması düşünülmüştür. Doğal alüvyon zemin koşullarında meydana gelen bu durumu analitik çözüm ile elde edilen sonuçlar yansıtmamıştır. Bunun sonucu olarak, titreşim enerjisinin soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözümlerin zeminin jeolojik ve geoteknik özelliklerini de tam olarak yansıtmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, seçilen ölçüm noktalarından ölçülen ivme değerlerinden elde edilen analitik ve deneysel azalım ilişkilerine göre en iyi sonuç dikey doğrultuda elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 217M427 proje nolu TÜBİTAK 1001 projesinin sağladığı maddi destekle tamamlanmış olup yazarlar bu destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

Adolfsson, K., Andréasson, B., Bengtson, P-E., Bodare, A., Madshus, C., Massarch, R., Wallmark, G., Zackrisson, P. (1999), "High speed lines on soft ground. Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line", Technical Report, Banverket, Sweden.

- Amick, H. and Gendreau, M. (2000), "Construction vibrations and their impact on vibrationsensitive facilities", ASCE Construction Congress 6, Orlando, Florida USA, February 22.
- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. ve Anagnostopoulos, G.A. (2000), "Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19:277–288.
- Auersch, L. (1989), Forschungsbericht 155, Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung, Berlin, "Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen-theoretische Untersuchungen und Messungen an Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental".
- Bata, M. (1971), "Effects on buildings of vibrations caused by traffic", *Building Science*, 6(4), 221-246.
- Bornitz, G. (1931), "Über die Ausbreitung der von Groszkolbenmaschinen erzeugten Bondenschwingungen in die Tiefe", Berlin, Springer.
- Branderhorst, J. (1997), "Modellen voor het boeggolfprobleem bij hogesnelheidstreinen. Ontwerp en validatie met behulp van de resultaten van de proef Amsterdam–Utrecht", Master's Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- BS-British Standard 6472 Parts 1 and 2 (2008), "Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings", UK.
- Crispino, M., D'apuzzo, M. (2001), "Measurement and Prediction of Traffic-Induced Vibrations In A Heritage Building", *Journal of Sound and Vibration*, 246 (2), 319-335.
- Degrade, G., Schillemans, L. (2001), "Free field vibrations during the passage of a Thalys HST at variable speed", *Journal of Sound and Vibration*, 247(1), 131-144.
- Goktepe, F., Kuyuk, H. S., Celebi, E. (2017), "In-situ measurement of railway-traffic induced vibrations nearby the liquid-storage tank", *Earthquakes and Structures*, 12 (5), 583-589.
- Güçlü, R., Metin, M., Yazıcı, H., Yalçın, N.S. (2007-2010), "Raylı Sistem Titreşimlerinin Yolcu ve Çevre Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi, MAG, Proje No: 106M443.
- Ju, S-H. and Ni, S-H. (2007), "Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 31:1239–1255.
- Kim, D-S. and Lee, J-S. (2000), "Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19:115–126.
- Macijauskas, D., and Stefan, V. B. (2014), "Propagation of harmonical vibrations in peat", *Int. J. of Geomate*, Dec., Vol. 7, No. 2 (Sl. No. 14), pp. 1101-1106.
- Massarsch, K. R. (1993), "Man-made Vibrations and Solutions", State-of the-Art Lecture, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, U.S.A., II, 1393-1405.
- Massarsch, K. R. (2004), "Mitigation of Traffic-induced Ground Vibrations", Keynote Lecture, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd on Earthquake Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley, U.S.A.
- Xia, H., Cao, Y., De Roeck, G., Degrade, G. (2007), "Environmental problems of vibrations induced by railway traffic", *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 1 (2), 142-152.
- Xia, H., Zhang, N., Cao, Y.M. (2005), "Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings", *Journal of Sound and Vibration*, 280 (3–5), 1017–1029.