

Yüksek Hızlı Trenlerin Serbest Zemin Yüzeyinde Oluşturduğu Titreşimlerin Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi

Fatih Göktepe^a, H. Serdar Küyük^{a,b}, Erkan Çelebi^a, Muharrem Aktaş^a, Elif Ağcakoca^a

^aDepartment of Civil Engineering, Engineering Faculty, Sakarya University, 54187 Sakarya, Turkey

^bKandilli Observatory and Earthquake Engineering Institute, Bogazici University, 81220 Istanbul, Turkey

Özet— Trenlerin seyahat hızlarının artması ve tekrarlı geçişleri, yüksek frekanslı dinamik yükleri meydana getirir. Titreşen demiryolu üst yapısı, titreşim enerjisini çevresindeki zeminlere iletir. Demiryolu ağına yakın bölgelerdeki yapılar zemin ortamının karakterine göre biçimlenen titreşimlerden etkilenir. Kuvvetli yer hareketleri binalara ve temellerine hasar verebileceği gibi binalarda yaşayan insanlara da konfor bozucu titreşimleriyle rahatsızlık verebilir. Türkiye’de taşıma gücü zayıf, alüvyon zemin ve yoğun yerleşim bölgelerinden geçen (Eskişehir-Adapazarı-Izmit), inşaatı devam eden ve geçirilmesi planlanan yüksek hızlı trenler’in (YHT) çevrede oluşturdukları titreşimlerin tespiti için suana kadar herhangi bir saha araştırması yapılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, YHT’lerin yakın çevrede oluşturduğu titreşimleri doğal saha koşullarında belirlemektir. YHT demiryolu hattına yakın seçilmiş gözlem noktalarında, YHT trafiğinin ürettiği kuvvetli zemin titreşimleri yedi yüksek kaliteli sismik sensör ile kayıt altına alınmış ve titreşimlerin oluşturdukları pik ivme değerlerinin mesafeyle azalımı hesaplanmıştır. Saha çalışması sonuçları, Bornitz’in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu analitik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Analitik yöntemin serbest zemin yüzeyinde oluşan düşey ivme genliklerini tahmin etmede başarılı olduğu fakat yatay ivme kayıtları için fazla kestirim yaptığı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek hızlı tren, serbest zemin titreşimleri, yerinde zemin titreşim ölçümleri

Abstract— Railway platform which is vibrated with higher frequency dynamic loads induced by high speed train cars transfer these vibrations energies to surrounding ground and close by structures are effected by them. Strong ground motion not only can give damage to the nearby buildings and their footings but also effect the human comfort by undesired vibrations. Extensive in-situ research are still required for both recent ongoing construction projects in soft soil deposits (Eskişehir-Adapazarı-Izmit) and for planned construction projects on highly populated areas (Edirne-Istanbul-Ankara-Kars) in Turkey. The aim of the study can be summarized as to determine comfort disturbance and devastating environmental vibration created by high speed trains on free field. Strong ground motions induced by high speed train measured and recorded at the inspection points selected at the site close to high speed train line passing through highly populated regions. Environmental effects of these vibration data compared and evaluated. However, the applicability of a well know half space solutions based on Bornitz’s analytical approach which takes account the loss of the amplitude of waves due to geometrical damping and material damping of Rayleigh waves are

investigated. Bornitz’s solution tends to overlap vertical free field vibration with in-situ measured records.

Index Terms— High speed train, free field vibrations, in situ measurement

I. GİRİŞ

Son zamanlarda küresel dünyada, hareket hızlarını, yolcu ve yük kapasitelerini sürekli arttırarak değiştiren YHT teknolojisi araştırmalarının önemli bir bölümü yalnızca yolcuların konforunu sağlamak için değil aynı zamanda demiryolu ağının içinden geçtiği yoğun yerleşim bölgelerinde yaşayanların maruz kalabileceği gürültü kirliliğinden ve büyük genlikli titreşimlerden korunması çalışmalarını da kapsamaktadır. 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 [1-5].

Durağan veya hareketli titreşim kaynaklarının ürettiği kuvvetli yüzey dalgalarının sebep olduğu büyük genlikli titreşimlerin davranışını ve yakın çevresindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek için son dönemlerde az sayıda da olsa deneysel saha araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının kent içinde ürettiği çevresel titreşimlerin etkileri, trafik akış yoğunluklarına, tren seti yüklerine, etkime sürelerine ve seyahat hızlarına bağlı incelenmiş ve dalga yayılımı probleminin anlaşılabilmesiyle ilgili birçok saha deneyleri gerçekleştirilmiştir. Degrande ve Schillemans [6] Brüksel-Paris arasında test sürüşü yapan bir lokomotif ve 7 vagonun oluşan Thalys HST tipi YHT’nin 223-314 km/saat arasındaki geçiş hızlarında demiryolu ve yakın çevrede (4-72 m arasında 14 farklı gözlem noktası) oluşturdukları serbest zemin titreşimlerini incelemişlerdir. Diğer taraftan, Branderhorst [7] Hollanda’nın Amsterdam-

Utrecht şehirleri arasında 40-160 km/h hızlarında seyahat eden aynı tip YHT'nin meydana getirdiği çevresel titreşimleri ölçerek, elde ettikleri veri setini sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmak üzere araştırmacılara sunmuşlardır. Bununla birlikte, Auersch [8] Almanya'da faaliyet gösteren ICE tipi YHT'nin 100-300 km/h arasında değişen hızlarda elde ettiği ölçüm sonuçlarını rapor olarak yayınlamıştır. Aynı şekilde Adolfsson vd. [9] 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.

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığına sahip birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi, ülkemizde de yolcu taşımacılığındaki trafik akış hızları $V=250$ km/h değerlerine ulaşacak şekilde planlanmış, yolcu ve yük taşımacılığındaki dingil yükleri 180-225 kN olarak tasarlanmıştır. Yüksek-hızlı demiryolu hatlarında sürekli tren geçişlerinin, demiryolu üstyapısında, çevre zeminde ve yapılarda oluşturduğu kuvvetli titreşimlerin ölçülmesi, uluslararası normlara göre karşılaştırılıp incelenmesi, yapı temellerinde hasar ve insanlarda rahatsızlık verici etkilerinin değerlendirilmesi, titreşimlerin yayılma alanında veya korunacak yapı çevresinde azaltılması ve en uygun demiryolu üstyapı tasarımının gerçekleştirilmesi gibi konular inşaat mühendisliğinin ulaşım sistemlerinin planlanmasında önemli bir uğraş alanı olmuştur.

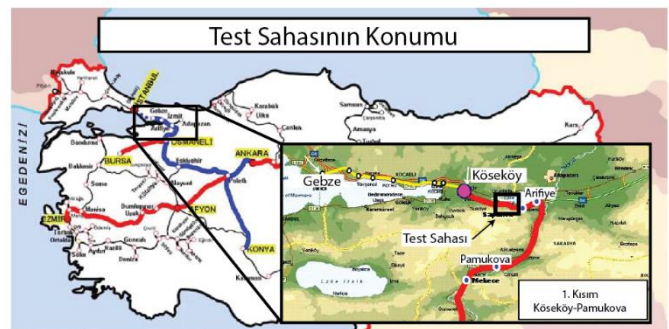
Ülkemizde demiryolu ulaşım sistemlerini ilgilendiren konularda gerçekleştirilen az sayıdaki saha araştırma çalışmaları kent içi hafif raylı sistem titreşimlerinin yolcu konforu ve güvenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesiyle, seyahat kalitesinin ve çevresel akustik sorunların iyileştirilmesiyle sınırlı kalmıştır. Ulusal literatürde önerdiğimiz proje konusuna en yakın çalışma, 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 9.5 m yakınındaki bir idari binada oluşturduğu titreşim etkilerinin ölçüldüğü ve konfor analizi yapılarak değerlendirildiği yerel çalışmadır [10]. Aynı projede 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. Çözüm önerileri ağırlıklı olarak makine mühendisliği disiplini çerçevesinden sunulmuştur. Çalışmada, demiryolu hattına 3.5 m uzaklıkta bulunan ve derinliği sadece 1 m olan drenaj amaçlı açık bir kanal uygulamasının zemin titreşimleri üzerindeki azaltıcı etkisi ölçülmüştür. Diğer taraftan, ülkemizde Çelebi vd. [11] gerçekleştirmiş oldukları saha deneylerinde, harmonik titreşim dalgaları oluşturmak için 10-100 Hz frekans aralığında çalışan 250 N düşey yük kapasiteli elektro-dinamik sarsıcı kullanılmıştır. Çalışmada küçük ölçekte (boyutları:1x1x0.5m) hazırlanan betonarme temellerin titreşimleri, önlerine 2.5 m

derinlikte yerleştirilen dalga bariyerinin (kesit alanı = 3 m^2) aktif ve pasif uygulamalarıyla birlikte incelenmiştir.

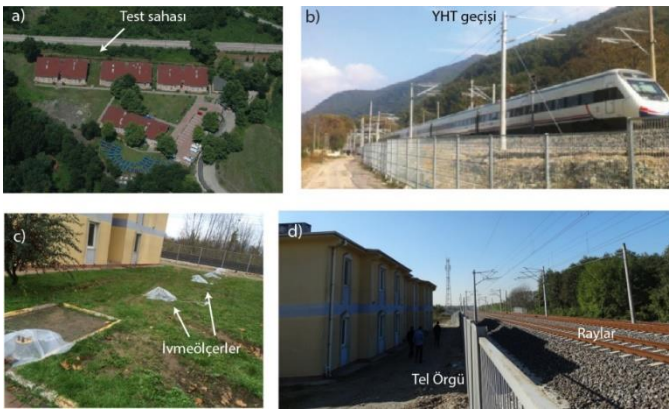
Yukarıda tanımlanan problemlerin çözümlerine yönelik kapsamlı saha araştırmalarının gerekliliği özellikle ülkemizin taşıma gücü zayıf, alüvyon zemin ortamlarından (Eskişehir-Adapazarı-İzmit) ve yoğun yerleşim bölgelerinden geçen, inşaatı devam eden ve geçirilmesi planlanan yüksek hızlı modern demiryolu hatları (Kars-Ankara-İstanbul-Edirne hızlı tren projesi) için güncelliğini korumaktadır. Ülkemizde YHT yolcu taşımacılığının yakın zamanda faaliyete geçmiş olması ve ulaşım sisteminin yeni olması, söz konusu muhtemel çevresel sorunların öngörülememesi, mevcut araştırmaların da sadece demiryolu üstyapı titreşimleri ve gürültü kirliliğinin azaltılmasına odaklanmış olması, bu çalışmayı çevresel titreşimlerin yerinde incelenmesi konusuna yönlendirmiştir. Bu çalışmada demiryolu hattına çok yakın seçilmiş bir sahada serbest zemin titreşimleri kayıt altına alınmış ve YHT trafiğinin ürettiği zemin titreşimlerinin mesafe ile azalımı incelenmiştir.

II. SAHA KOŞULLARI VE YÜKSEK HIZLI TREN SETİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Bu çalışma kapsamında, İstanbul-Ankara arasında toplam uzunluğu 533 km olan, taşıma gücü zayıf alüvyon zemin ortamlarından ve yoğun yerleşim bölgelerinden geçen Köseköy-Pamukova arasındaki yüksek hızlı modern demiryolu hattındaki YHT geçişleri dikkate alınmıştır (Şekil 1). YHT geçişlerinin yakın çevrede oluşturduğu titreşim etkilerinin yerinde incelenebilmesi için ölçüm sahası olarak İzmit-Arifiye arasında bulunan Kırkpınar bölgesi seçilmiştir (Şekil 2). Demiryolu trafik akış hızının 200-230 km/saat gibi yüksek değere ulaştığı güzergah oldukça zayıf zemin koşullarına (zemin kayma dalga hızı < 300 km/saat) sahiptir.

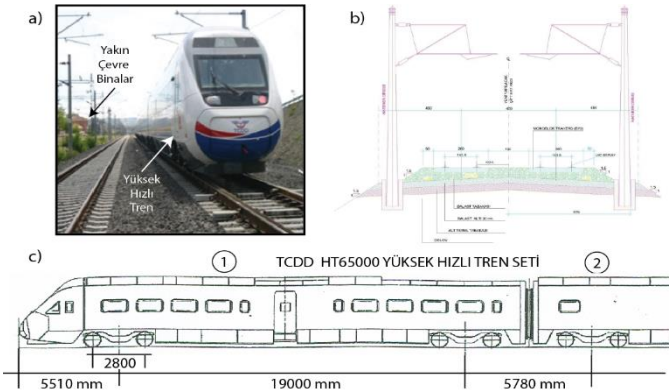


Şekil 1. Yapımı bitmiş ve yapılması planlanan yüksek hızlı tren hatları ve bu çalışmanın yapıldığı test sahası



Şekil 2. Ölçüm alınan serbest zemin bölgesine ilişkin detaylar

TCDD'nın yüksek hızlı demiryolu yolcu taşımacılığında kullandığı HT65000 YHT seti ve güzergah kesiti ile ilgili bilgiler Şekil 3'de verilmiştir. Yolcu vagonlarını çeken lokomotif 27.4 metre uzunluğundadır. Tekerlekler arası mesafe 2.8 metredir. YHT toplamda 6 vagonla birlikte 159 metre uzunluğa ulaşarak yüksek hızda hareket eden ağır bir kütleye dönüşmektedir. Yolcu durumuna göre 2 vagon daha eklenebilmektedir. Bu tren seti 36 metrelik UIC-60 ray altında ön-germeli, önçekmeli monoblok B70 traversler üzerinde hareket etmektedir. Demiryolunun taşıtı ve hattının mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Maksimum insan kapasitesi 411 ve katar yükü 18 tona kadar çıkabilmektedir. Yolcu taşımacılığında 250 km/saat hıza ulaşabilen tren seti incelenen bölgede ≈ 230 km/saat ile geçmektedir. Tren güzergâhının kesit bilgileri Şekil 3b' de gösterilmiştir.



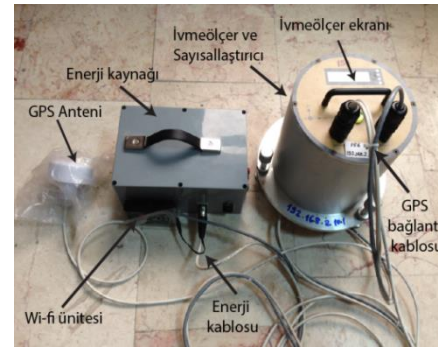
Şekil 3. İncelenen test sahasından geçen yüksek hızlı tren a) önden görünüşü b) geçtiği güzergâhın kesit bilgileri c) HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları

TABLO 1 DEMİRYOLU TAŞITI VE HATTININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ [12]

Bileşenler	Karakteristikler	Semboller	Büyükölç	Birim
Lokomotif HT 65000	Dingil yükü	F_z	180	kN
	Hareket hızları	V	69,44	m/sn
Demiryolu 2UIC 60	Kesit alanı	A_r	1.54×10^{-2}	m^2
	Atalet momenti	I_z	6.11×10^{-5}	m^4
	Elastisite modülü	E	2.11×10^8	kN/m^2
	Birim hacim	γ	78	kN/m^3
	ağırlık			
Balast Yay-söndürücü sistem	Rijitlik katsayısı	k_b	1.26×10^5	kN/m
	Sönüm katsayısı	c_b	1.69×10^2	kNsn/m

III. ÇALIŞMADA KULLANILAN SENSÖRLER

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 kullanılacak olan cihazlar: GPS anteni, enerji kaynağı ve ivmeölçer ana kutusu olmak üzere üç temel parçadan oluşmaktadır (Şekil 4). 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. Bu sensörlerden yedi takım test sahasında kullanılmıştır.

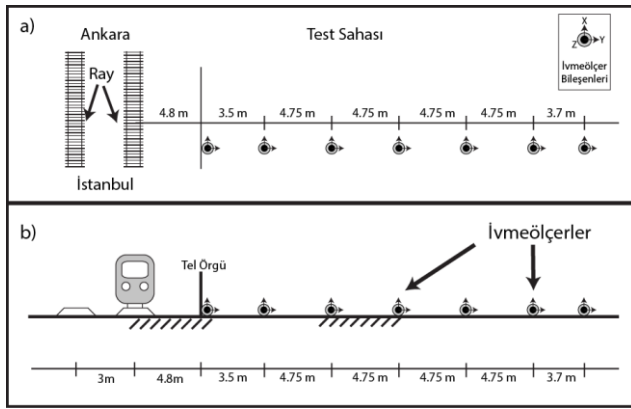


Şekil 4. DAC-3HDG GPS senkronizasyonlu sayısallaştırıcı ve veri kaydedici ivmeölçer

IV. DOĞAL SAHA KOŞULLARINDA SERBEST ZEMİN TİTREŞİMLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Kernel Yüksek hızlı demiryolu hattına yakın seçilmiş ölçüm sahası, Sakarya'nın Sapanca ilçesinde bulunan SAÜ Kırkpınar turizm MYO uygulama oteli ve sosyal tesislerinin bulunduğu yerleşkedir. Yerel zemin koşullarını dikkate alarak 200-230 km/saat hız aralığındaki tren geçişlerinin ürettiği serbest yüzey yer hareketini dalga oluşum mekanizmasına bağlı incelemek ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için $3.5m \leq L \leq 4.75m$ aralıklarla güzergâha sistematik olarak dik dizilmiş yedi gözlem noktasında titreşim

kaydı alınmıştır. Titreşim etkilerinin kayıt altına alındığı gözlem noktalarının konumu Şekil 5’de gösterilmiştir. İstanbul’dan çıkıp Ankara’ya giden YHT’ler Şekil 5a’daki sağ rayı kullanmaktadır. Güvenlik sebebi ile tel örgünün YHT tarafına sensör koyulamamıştır. İlk sensör YHT demiryolu hattından 4.8 metre uzağa, son sensör ise 31 metre uzağa konulmuştur. Alınan kayıtlar üç bileşenli olup, sensörler YHT güzergâhına paralel (X eksen) olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 5. İncelenecek test sahasının doğal saha koşullarındaki a) plan ve b) kesit görünüşleri

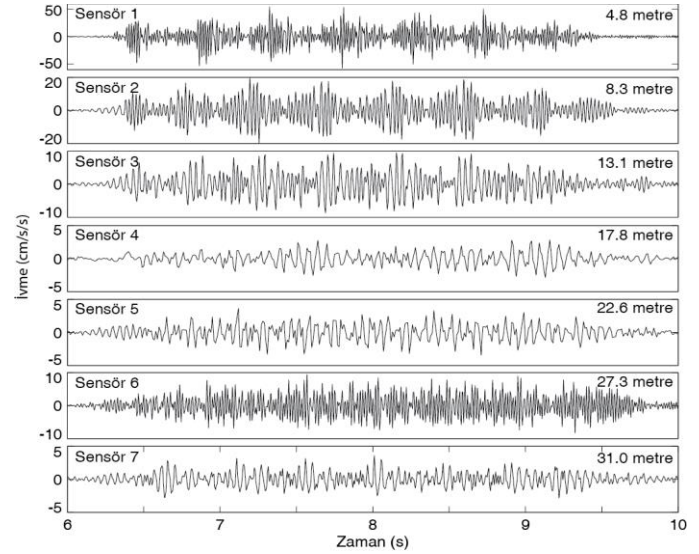
TABLO 2. DİNAMİK YÜK KAYNAĞINA OLAN MESAFEYE BAĞLI HER ÜÇ BİLEŞENDE ÖLÇÜLEN SERBEST ZEMİN TİTREŞİMLERİNE AIT İVME DEĞERLERİ

Dinamik yük kaynağına olan mesafe (m)	X bileşeninde ölçülen ivme değeri (cm/s/s)	Y bileşeninde ölçülen ivme değeri (cm/s/s)	Z bileşeninde ölçülen ivme değeri (cm/s/s)
4.8	57.0938	35.2439	18.2653
8.3	19.6206	13.0662	10.0833
13.1	9.4852	5.8467	8.2158
17.8	2.8653	5.0233	6.0167
22.6	3.6351	3.3199	4.1601
27.3	9.4079	9.7046	2.9858
31.0	3.5710	6.4255	3.2005

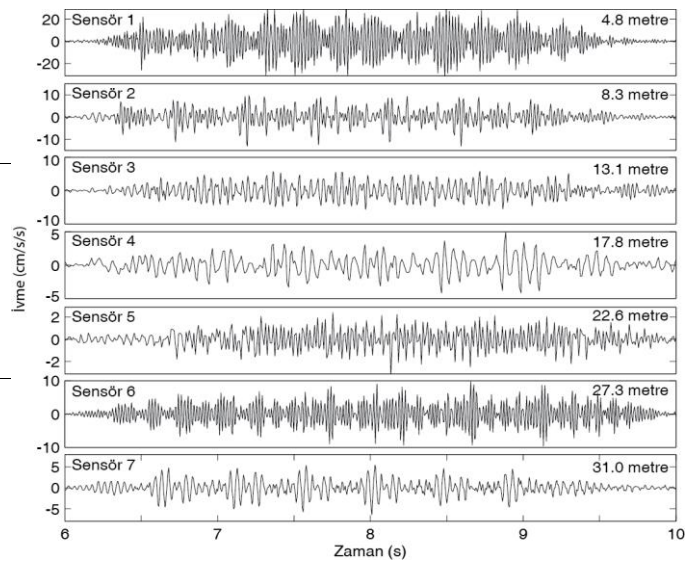
Serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafikleri

Demiryolu hattına yakın seçilmiş gözlem noktalarında, YHT trafiğinin ürettiği kuvvetli zemin titreşimleri yerinde ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Gözlem noktalarında X, Y ve Z bileşenlerine ait ölçülen pik yer ivme değerleri, demiryolu güzergâhına olan mesafeye bağlı olarak Tablo 2’de verilmiştir. Geliştirilen yazılım yardımıyla her üç bileşen için (X, Y, Z) ivme değerlerinin zamana bağlı değişimi aşağıda grafikler halinde verilmiştir (Şekil 6, 7, 8). Grafiklerde X eksenı zamanı Y eksenı ise normalize edilmiş ivme genliklerini göstermektedir. Demiryolu hattına en yakın noktadan uzaklaştıkça serbest zemin yüzeyinde meydana gelen ivme değerlerinin azalmakta olduğu ve pik ivme değerlerinin güzergâha paralel doğrultuda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

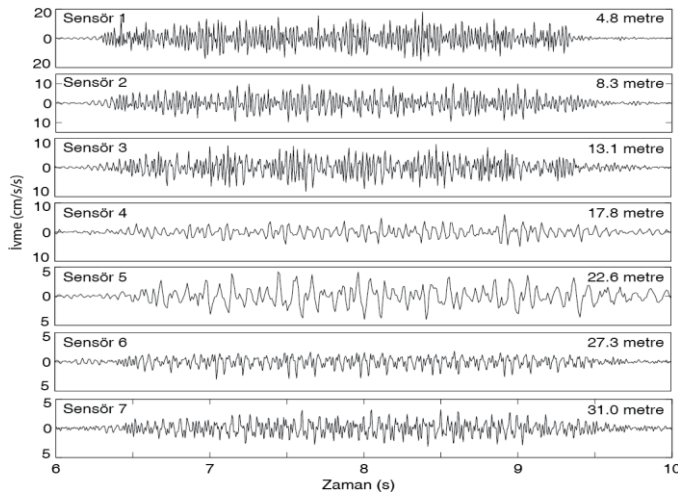
Demiryolu hattına paralel doğrultuda ölçülen ivme genlik bileşenlerinin, güzergâha dik doğrultudaki genlik bileşenlerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bu fark, mesafe ile azalmaktadır. Bununla birlikte düşey genlik bileşenlerinin, yatay genlik bileşenlerine göre yakın mesafelerde çok daha küçük ve mesafeyle daha yavaş bir şekilde azaldığı görülmüştür.



Şekil 6. Demiryolu hattına paralel doğrultuda (X bileşeni) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği



Şekil 7. Demiryolu hattına dik doğrultuda (Y bileşeni) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği



Şekil 8. Düşey doğrultuda (Z bileşeni) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği

Elde edilen arazi ölçüm sonuçlarının analitik çözümlerle karşılaştırılması:

Amick ve Gendreau [13] tarafından geliştirilen ve Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu analitik çözüme göre, geometrik ve malzeme sönümünün titreşim genliklerinde neden olduğu azalım aşağıdaki denklem kullanılarak ifade edilmektedir.

$$u_b = u_a \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (1)$$

Buna göre, yük kaynağından r_b mesafesindeki titreşim genliği u_b ile, r_a mesafesindeki titreşim genliği ise u_a ile ifade edilmektedir. Denklemdeki, γ geometrik azalım katsayısı olup, dış yükün neden olduğu sismik dalga yayılım mekanizmasına ve dış yükün pozisyonuna bağlı olarak Tablo 3'den seçilmektedir.

TABLO 3. DALGA TİPİNE BAĞLI OLARAK TEORİK GEOMETRİK AZALIM KATSAYILARI [14]

Yük Kaynağı	Dalga Tipi	Ölçüm Noktası	γ
Yüzeysel	Rayleigh	Yüzey	0.5
Yüzeysel	Body	Yüzey	1
Derin	Body	Yüzey	1
Derin	Body	Derin	1

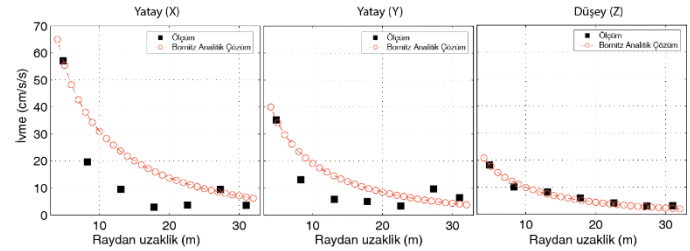
α ile gösterilen malzeme azalım katsayısı ise, zeminin tipine ve dış yükün frekans içeriğine bağlı olarak aşağıdaki formülasyon kullanılarak hesaplanmaktadır.

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

Demiryolu hattına dik bir biçimde yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla elde edilen serbest zemin yüzeyi titreşimleri ile Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu analitik çözüm kullanılarak yapılan karşılaştırma Şekil 9'da verilmiştir. Grafikte x eksenini sensörlerin mesafesini, y eksenini ise ölçülen pik ivme değerlerini

göstermektedir. Özellikle en yakın iki sensörün genlik yatay bileşenleri, düşey ölçüme göre çok daha büyük değere sahiptir. Ölçülen ivme değerlerinin mesafeye bağlı değişimi incelendiğinde, analitik yöntem ile serbest zemin yüzeyinde elde edilen ivme genliklerinin düşey bileşeni ile büyük mertebede örtüştüğü, buna karşın yatay bileşenlerde genellikle daha yüksek genlik değerleri verdiği tespit edilmiştir. Yatay X ve Y bileşenlerindeki 6. sensörde okunan değerlerin yüksek çıkmasının sebebi, sensörün serbest zemin yerine yürüyüş patikasının üzerine konulmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3c en soldaki sensör). Elde edilen sonuçlar Kuyuk vd. [15] Adapazarı-Arifiye hattında yaptıkları çalışmayla büyük ölçüde örtüştüğü düşünülmektedir.

Şekil 9. Elde edilen arazi ölçüm sonuçlarının analitik çözümlerle karşılaştırılması



the change in the pixel values for the background for incoming frames can easily be detected. The estimated models can be adapted to the recent scene by using only most recent observations. On the other hand, using limited number of observations may not provide high-quality approximations for building models. The trade off between adaptiveness of the algorithm and robustness of the models can be balanced depending on the application. The details of the proposed framework are explained in the next section.

IV. SONUÇLAR

The Tren setlerinin yüksek seyahat hızlarıyla tekrarlı geçişleri sırasında ürettikleri yüksek frekanslı dinamik yükler ile titreşen demiryolu üstyapısı, bu titreşim enerjisini çevresindeki zeminlere iletirler. Demiryolu hattına yakın çevre binalarda yaşayan insanların güvenliği ve konfor algısı dikkate alındığında, serbest zemin yüzeyinin farklı gözlem noktalarından YHT geçişleri esnasında oluşan titreşim problemlerinin yumuşak zemin koşullarında dalga yayılımı açısından deneysel olarak incelenmesi bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışma sonucunda demiryolu hattına paralel doğrultuda ölçülen ivme genlikleri, güzergaha dik doğrultudaki bileşen genliklerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu analitik formülasyon kullanılarak yapılan karşılaştırmada, analitik yöntem ile serbest zemin yüzeyinde elde edilen ivme genliklerinin azalımında düşey bileşen ile büyük mertebede örtüştüğü, buna karşın yatay bileşenlerde genellikle daha

yüksek genlik değerleri verdiği tespit edilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Bata 1971. "Effects on buildings of vibrations caused by traffic", *Building Science*, Vol.6, No.4, pp. 221-246.
- [2] K. R. Massarsch, "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, 1993.
- [3] K. R. Massarsch, "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, 2004.
- [4] H. Xia, Y. Cao, G. De Roeck, G. Degrande, "Environmental problems of vibrations induced by railway traffic", *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, Vol.1, No.2, pp. 142-152, 2007.
- [5] F. Göktepe, "Yüksek Hızlı Trenlerin Çevre Yapılarda Oluşturduğu Titreşimlerin Önlenmesi İçin Bariyer Sistemlerin Etkinliğinin Parametrik Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2013.
- [6] G. Degrande, L. Schillemans, "Free field vibrations during the passage of a Thalys HST at variable speed", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 247, No.1, pp.131-144, 2001.
- [7] J. Branderhorst, "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, 1997.
- [8] L. Auersch, Forschungsbericht 155, Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung, Berlin, Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen-theoretische Untersuchungen und Messungen an Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental, 1989.
- [9] K. Adolfsson, B. Andréasson,, P-E. Bengtson, A. Bodare, C. Madshus, R Massarsch, G. Wallmark,, P. Zackrisson, "High speed lines on soft ground. Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line", *Technical Report, Banverket*, Sweden, 1999.
- [10] R. Güçlü, M. Metin, H. Yazıcı, N.S. Yalçın, "Raylı Sistem Titreşimlerinin Yolcu ve Çevre Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", *TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi*, MAG, Proje No: 106M443, 2007-2010.
- [11] E. Çelebi, S. Fırat, G. Beyhan, İ. Çankaya, İ. Vural, O. Kirtel, "Field experiments on wave propagations and vibration isolation by using wave barriers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.29, No.5, pp. 824-833, 2009.
- [12] Z. Öztürk, V. Arlı, Demiryolu Mühendisliği, İstanbul: ATM, 2009.
- [13] H. Amick,, M. Gendreau, "Construction vibrations and their impact on vibration sensitive facilities", *ASCE Construction Congress 6*, Orlando, Florida USA, 2000.
- [14] D-S. Kim, J-S. Lee, "Source and attenuation characteristics of various ground vibrations", *Geotechnical Earthquake Engineering, Soil Dynamics III*, Geotechnical Special Publication ASCE, Vol.75, No.2, pp. 1507-1517, 1998.
- [15] H. S. Kuyuk, F. Goktepe, E. Celebi, M. Aktas, E. Agcakoca, "Experimental study on liquid-storage tank and free field soil vibrations due to railway traffic", in *GEOTECHNICAL ENGINEERING: International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians (ICESA)*, 145-157, Antalya, Turkey, 2014.