



Ölçüm Sahasının Değişen Koşullarında Yüksek Hızlı Tren Kaynaklı Titreşimlerin Bornitz Analitik Yaklaşımına Göre Değerlendirilmesi

Murat ŞAHİN¹, Fatih GÖKTEPE^{*2}, Erkan ÇELEBİ³, Abdullah Can ZÜLFİKAR⁴, Osman KIRTEL⁵

¹ Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, Türkiye

² Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye

³ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

⁴ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

⁵ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*fgoktepe@bartin.edu.tr

(Alınış/Received: 02.06.2022, Kabul/Accepted: 22.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Ülkemizde yüksek hızlı tren yolcu taşımacılığının trafik akış hızı maksimum 255 km/h değerine ulaşacak şekilde faaliyete geçmiştir. Söz konusu gelişmeye bağlı olarak demiryolu trafiği kaynaklı titreşim sorunlarının güzergâh boyunca öngörülememesi, mevcut araştırmaların sadece ray titreşimleri ve gürültü kirliliğinin azaltılmasına odaklanmış olması, yapılan bu çalışmayı çevresel titreşim etkilerinin sahada yerinde ölçülerek tespit edilmesine yönlendirmiştir. Yapılan bu çalışmayla, yolcu taşımacılığında kullanılan yüksek hızlı tren (YHT) geçişlerinin ölçüm sahasının değişen zemin koşullarında oluşturduğu yüzey titreşim dalgalarının yayılma biçimleri araştırılmıştır. Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlara bağlı olarak, YHT trenlerinin alüvyon zeminlerde oluşturduğu en büyük titreşim değerlerinin uzaklığa bağlı değişimi incelendiğinde Bornitz analitik çözümünün orantılı değişim gösterdiği ancak bu durumun deneysel ölçümler için geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Hendekli ve hendezsiz test sahasında yapılan titreşim ölçümleri ve bu ölçümlere ait elde edilen bulguların ortaya koyduğu sonuçlar doğrultusunda hendek varlığının hızlı tren kaynaklı titreşimleri önemli oranda azalttığı söylenebilir. Ayrıca çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı özellikle demiryolu hattına yakın ölçüm noktalarındaki hızlı tren kaynaklı titreşimler üzerinde hendeğin dışında önemli oranda yalıtım etkisi göstermiştir. Çalışma kapsamında kaydedilen ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini test etmek amacıyla mesafeye bağlı olarak regresyon analizi yapılmış ve analitik yöntemle ait azalım eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Demiryolu kaynaklı titreşimlere ait regresyon analiz sonuçlarının yüksek korelasyonlu olması kullanılan analiz yönteminin geçerliliğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek hızlı trenler, Yer titreşimleri ölçümleri, Yüzey dalgaları, Enerji soğurma performansı, Alüvyon zemin ortamı, Regresyon analizi

Evaluation of High-Speed Train Induced Vibrations in Different Conditions of the Measurement Site According to the Bornitz Analytical Approach

Abstract: In our country, high-speed train transportation started to serve by reaching the maximum traffic flow rate of 255 km/h. Regarding the mentioned development, because of the unpredictability of vibration problems caused by railway traffic along the route, and the existing research focusing only on reducing rail vibrations and noise pollution, this study is directed towards investigating the determination of the measurement of environmental vibration effects in the field. With this study, the propagation patterns of surface waves created by the measurement area of high-speed train (HST) crossings used in passenger transportation under changing soil conditions were investigated. Based on the experimental and numerical results obtained, when the variation of the maximum vibration values created by HST trains on alluvial soils with distance is examined, it is understood that the Bornitz analytical solution shows a proportional change, but this is not valid for experimental measurements. According to the results of the vibration

Atıf için/Cite as: M. Şahin, F. Göktepe, E. Çelebi, A. C. Zülfikar, O. Kırtel, "Ölçüm sahasının değişen koşullarında yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimlerin bornitz analitik yaklaşımına göre değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16., pp. 153-169, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1125269

measurements made with and without trench in the test area and the findings of these measurements, it can be said that the presence of the trench significantly reduces the vibrations caused by high-speed trains. In addition, the concrete block pavement, which was subsequently floored in the study area, showed a significant reduction effect on the vibrations affiliated with the high-speed train, especially at the measurement points close to the railway line, outside the trench. In order to test the reliability of the measurement results recorded within the scope of the study, regression analysis was performed depending on the distance and compared with the attenuation curves of the analytical method. The high correlation of regression analysis results of railway-induced vibrations showed the validity of the used analysis method.

Keywords: High speed trains, In-situ measurement, Surface waves, Energy dissipation performance, Alluvial soil deposit, Regression analysis

1. Giriş

Demiryolu hatlarına bağlı hızlı ulaşım sistemleri konforlu ve güvenli olmakla beraber, yerleşim alanlarındaki trafik yoğunluğundan ve iklim koşullarından karayoluna göre de daha az etkilenmektedir. Türkiye'de yolcu trenlerinin maksimum 255 km/h işletme hızında seyahat etmesi ve 22,5 ton dingil yüküne sahip yüksek hızlı trenlerin demiryolu hatlarından geçebilmesi amacıyla önemli yatırımlar yapılmıştır. Yumuşak zemin birikintileri üzerine kurulmuş yoğun yerleşim ve sanayi bölgelerinde YHT geçişlerinin oluşturduğu yüksek düzeyde çevresel zemin titreşimleri, günlük insan yaşamında konfor bozucu rahatsızlıklara neden olabilmekte, yapısal elemanların işletme ömrünü kısaltabilmekte ve endüstriyel üretimde kullanılan hassas elektronik ekipmanların arızalanmasına neden olabilmektedir.

Demiryolu kaynaklı titreşim problemleriyle ilgili olarak, özellikle YHT geçişlerine bağlı serbest zemin yüzeyinde oluşan titreşimlerin dalga yayılımı açısından anlaşılabilmesiyle alakalı birçok saha deneyleri gerçekleştirilerek elde edilen önemli sonuçlar yayınlanmıştır [1-3]. Yapılan çalışmalarda farklı hızlara sahip trenlerin sebep olduğu titreşimler saha koşullarında ölçülerek sonrasında geliştirilen numerik modellerle kıyas edilmiştir [4-6]. Yüksek hız trenleri gibi insan kaynaklı yüzeysel dinamik yüklerin demiryolu üstyapısında, çevre zeminde ve binalarda oluşturduğu titreşim etkilerinin dalga yayılma hareketine bağlı parametrik araştırıldığı çalışmalarda, sonlu eleman, sınır eleman ya da sınır integral yöntemleri [7-9], bu yöntemlerin ortak kullanımına dayalı melez çözüm teknikleri [10, 11] ve ampirik tabanlı analitik çözüm yaklaşımları [12, 13] kullanılmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda demiryolu kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik dalga bariyer modellerinin enerji soğurma performansı hem deneysel [14] hemde nümerik araştırmalarla [15-18] analiz edilmiştir. Ayrıca gerçek tren yükü yerine yapay yük kaynağından harmonik titreşim dalgaları üretilerek sahada küçük ölçekli modeller üzerinden deneysel çalışmalar yapılmıştır [19, 20]. Bununla birlikte farklı frekans içeriklerine sahip dinamik yük kaynaklarının ölçüm noktalarında sebep olduğu deneysel titreşim sonuçlarıyla dalgaların soğurulmasını ifade eden analitik çözüm yaklaşımlarının karşılaştırıldığı birçok çalışma yapılmıştır [21-23]. Kim ve Lee [24] tren geçişleri, patlatma yükü, kazık çakma işlemi gibi titreşim kaynaklarının oluşturduğu etkileri üç eksenli ivmeölçerle deneysel olarak kayıt altına alarak mesafeye bağlı azalımı parçacık hızlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Ren vd. [25] çalışmalarında, YHT geçişlerinin alüvyon zemin koşullarında sebep olduğu titreşim etkilerinin mesafeye bağlı olarak yayılım ve azalım özelliklerini araştırmak için Bornitz formülasyonunu kullanmışlardır. Ju ve Ni [26] en küçük kareler yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmalarında, makine ve demiryolu gibi insan kaynaklı oluşan titreşimlerin zemin ortamında sönümlenmesiyle alakalı elde ettikleri parametrelerin üstyapıların dinamik davranışlarında önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Yapılan bu arazi çalışmasında, yumuşak zemin ortamında belirlenen ölçüm noktasındaki YHT trenlerinin geçişleri esnasında deneysel saha çalışmalarında elde edilen maksimum ivme genliklerinin mesafeye bağlı azalım ilişkileri Bornitz analitik çözüm yöntemi sonuçlarıyla hem serbest zemin hemde hendekli serbest zemin için karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten hendekli

durumdaki ölçüm sahasına sonradan döşenen parke kilit taşı döşemesinin demiryolu kaynaklı titreşimler üzerindeki yalıtım performansı deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Demiryolu kaynaklı titreşim problemlerinin yumuşak zemin saha koşullarında tam ölçekli biçimde teorik ve deneysel verilerle analiz edilmesi bu çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ölçüm yapılan sahanın genel zemin yapısı

Çalışma kapsamında, İstanbul-Ankara arasında bulunan alüvyon tabanlı zemin ortamlarından da geçen 533 km uzunluğundaki demiryolu hattındaki tekrarlı hızlı tren geçişleri dikkate alınmıştır. YHT geçişleri esnasında demiryolu üstyapısının yakın çevresinde meydana gelen titreşim etkilerinin yerinde incelenebilmesi için ölçüm sahası olarak İzmit-Arifiye arasında bulunan Sapanca/Kırkpınar bölgesi seçilmiştir. Ölçüm sahasındaki ortalama hızları 255 km/h olan YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşimler farklı zamanlarda hatta dik ve hatta paralel doğrultularda kayıt altına alınarak, titreşim enerjisinin soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönmeye bağlı tanımlayan Bornitz analitik çözüm yöntemiyle [27], ardışık gözlem noktaları için karşılaştırılmıştır. Çalışma sahasının genel zemin yapısını anlamak için farklı zamanlarda ve değişik noktalarda yapılan jeolojik etütlere göre ölçüm noktasının genç ve kalın alüvyon zemin tabakaları ile kaplı olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte yapılan derin sondajlarda ana kayaya ulaşamadığı ve alüvyon kalınlığının yer yer 1000 m'nin üzerinde olduğu; bilim insanları tarafından yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [28]. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen Sismik Kırılma (Refraksiyon) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) jeofizik etütleriyle inceleme sahasının dinamik zemin parametreleri hesaplanarak Tablo 1'de özetlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Jeofizik saha deneylerinde yapılan ölçümler

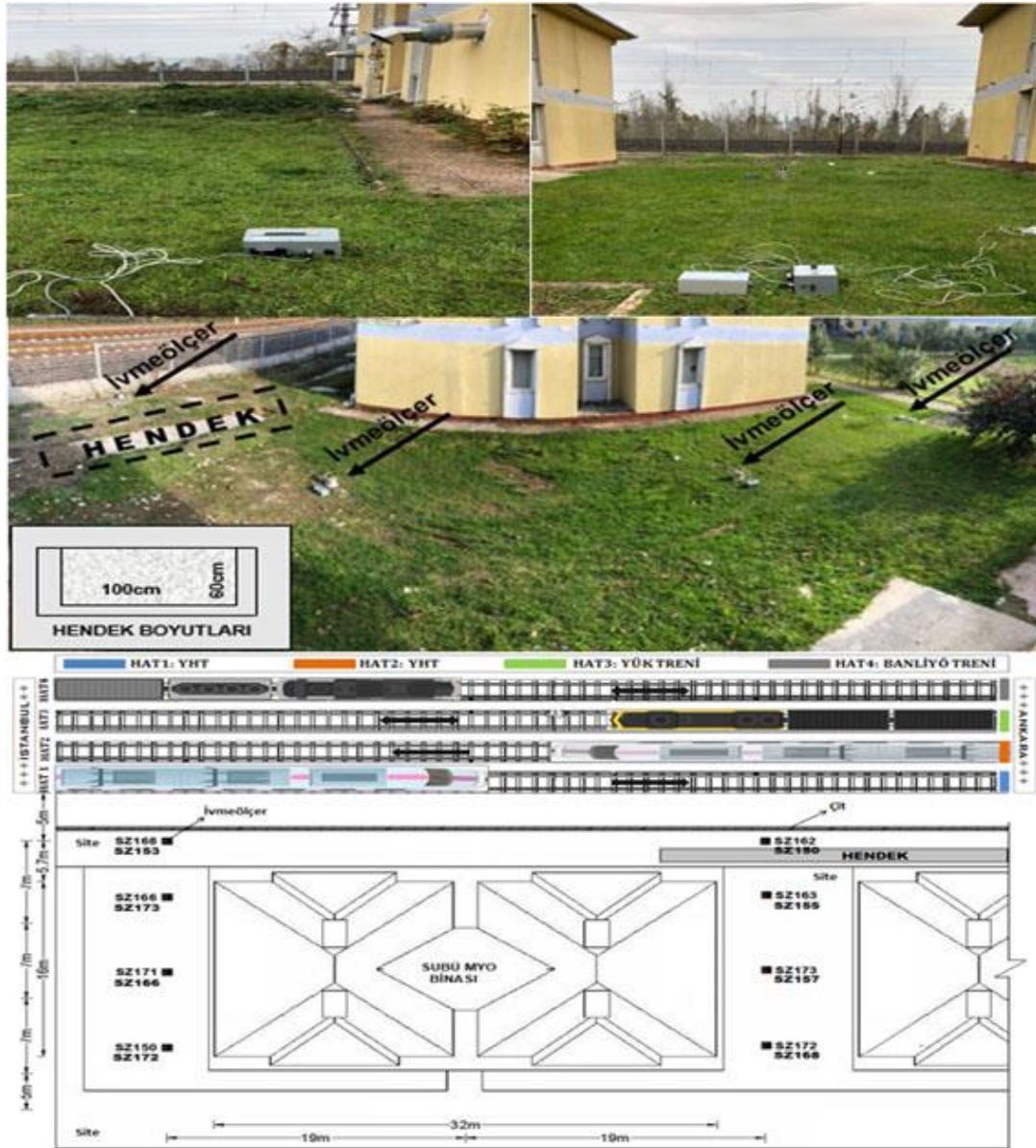
Elde edilen dinamik deneysel saha verileri dikkate alındığında, Sapanca/Kırkpınar bölgesindeki pilot çalışma sahası için hesaplanan jeofizik test ölçümleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki [29] zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan eşik değerlerle karşılaştırıldığında zemin grubu ZD'ye ($180 \text{ m/s} < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$) yani taşıma gücü açısından oldukça olumsuz özelliklere karşı gelmektedir. Hatta yönetmelikte belirtilen $V_{s30} < 180 \text{ m/s}$ sınır durumu göz önünde bulundurulduğunda ZE yerel zemin sınıfı kapsamında bile değerlendirilebilir.

Tablo 1. Sismik Hızlar ve Zemin Elastik Parametreleri

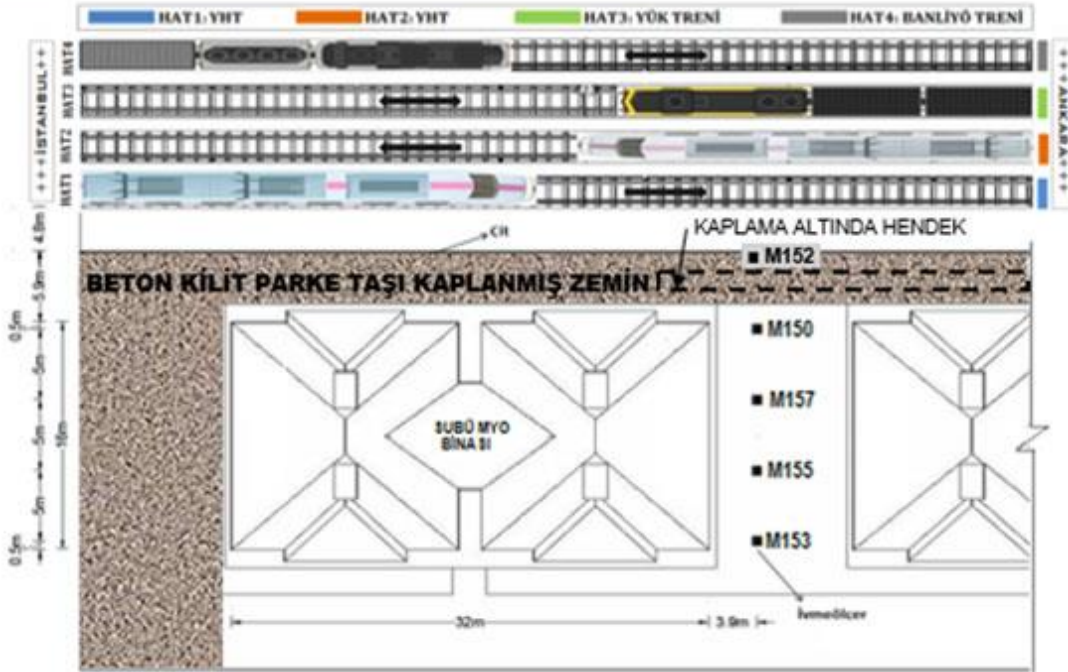
| | | Dalga Hızları | | |
|------------------------------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| | Sembol | Birimi | 1. Tabaka | 2. Tabaka |
| P Dalgası Hızları - Düz Atış | (V_p) | m/s | 795 | 1213 |
| P Dalgası Hızları -Ters Atış | (V_p) | m/s | 795 | 1213 |
| S Dalgası Hızları | (V_s) | m/s | 170 | 240 |
| P Dalgası Hızları (Ortalama) | (V_p) | m/s | 795 | 1213 |
| | | Tabaka Derinlikleri | | |
| | Sembol | Birimi | P Düz | P Ters |
| Derinlikler | (h) | M | 9,00 | 9,00 |
| | | Elastik Parametreler | | |
| | Sembol | Birimi | 1. Tabaka | 2. Tabaka |
| Yoğunluk | (d) | gr/cm ³ | 1,65 | 1,83 |
| Poisson Oranı | (P) | - | 0,48 | 0,48 |
| Kayma Modülü | (G) | kg/cm ² | 476 | 1054 |
| Elastisite Modülü | (E) | kg/cm ² | 1404 | 3118 |
| Sökülebilirlik | | | KOLAY | KOLAY |

2.2. Zemin titreşimlerinin ivmeölçerlerle kayıt altına alınması

Çalışma sahasında, genel olarak hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu titreşimlerin demiryoluna hattına dik ve paralel olarak yayılmasını değerlendirmek amacıyla farklı noktalarda ölçüm noktaları belirlenerek farklı zamanlarda üç adet ölçüm yapılmıştır. Ölçüm yapılan demiryolu hattı platformunun güzergâh kesitinde kullanılan alt temel, balast altı malzeme, balast tabakası ve beton traverslere elastik bağlantı malzemesiyle montajı yapılan raylara ait detaylar Şekil 2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. ve 2. saha titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçerlerin dizilimi.



Şekil 4. 3. saha titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçerlerin dizilimi.

2.3. Titreşim dalgalarının uzaklığa bağlı yayılışının analitik yaklaşımlarla incelenmesi

Amick ve Gendreau [27] tarafından geliştirilen Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu teorik formülasyon Denklem 1'de verilmiştir.

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

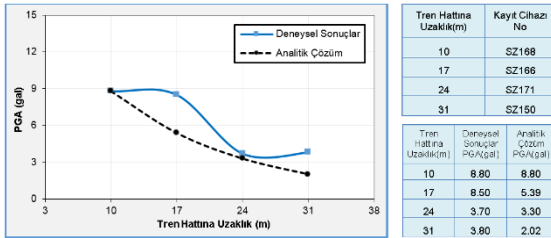
Analitik çözümler için kullanılan teoriye göre, geometrik ve malzeme sönümünün yer değiştirme genliklerinde neden olduğu azalım yukarıdaki formülasyonla ifade edilmiştir. Buna göre, yük kaynağından r_b mesafesindeki yer değiştirme genliği u_b ile, r_a mesafesindeki yer değiştirme genliği ise u_a ile ifade edilmektedir. Formülasyondaki, γ geometrik azalım katsayısı olup, dış yükün neden olduğu sismik dalga yayılım mekanizmasına ve dış yükün pozisyonuna bağlı olarak seçilmektedir. Yukarıdaki formülde α ile gösterilen malzeme azalım katsayısı ise,

zeminin tipine ve dış yükün frekans içeriğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Titreşim enerjisinin soğurulmasını tanımlayan analitik çözümlerle alakalı kapsamlı açıklamalar yazarların daha önceki çalışmalarında [31, 32] verildiğinden çalışmanın bu kısmında sadece özet biçimde sunulmuştur.

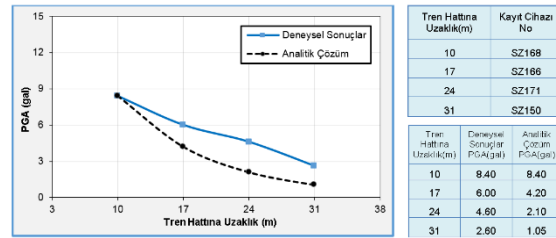
3. Bulgular

3.1. Dalga yayılımının uzaklığa bağlı değişiminin analitik çözümlerle karşılaştırmalı analizi

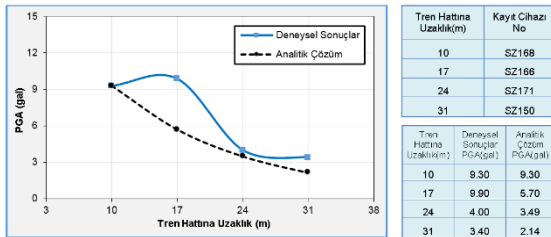
Yapılan bu çalışmada tekrarlı tren geçişlerine ait ölçüm verilerini Bornitz analitik çözüm yaklaşımına göre kıyaslamak amacıyla demiryolu hattına yakın ilk iki hatta gerçekleşen YHT seferleri dikkate alınmıştır. Üçüncü ve dördüncü hattan geçen yük ve banliyö trenleriyle YHT trenlerinin geçişleri esnasında farklı frekans içeriklerine bağlı demiryolu üstyapısının yakın çevresinde meydana gelen titreşim etkileri yazarların daha önceki çalışmasında [31, 32] değerlendirildiğinden dolayı, Ankara yönlü birinci hattan geçen YHT geçişleri bu çalışmada sadece hendekli serbest zemin ortamı için verilmiştir (Şekil 3 ve 4). Ölçüm sahasındaki ikinci hattan İstanbul yönünde geçen YHT trenlerinin alüvyon tabanlı serbest zemin ortamında oluşturduğu ivme zaman kayıtlarındaki tepe ivme değerleri mesafeye bağlı olarak hem deneysel hemde analitik olarak Şekil 5-12’de verilmiştir. Analizler hareketin 2 doğrultusu için “hatta paralel (E-W)” ve “hatta dik (N-S)” olarak yapılmıştır.



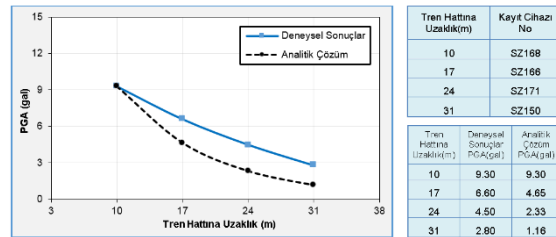
Şekil 5. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



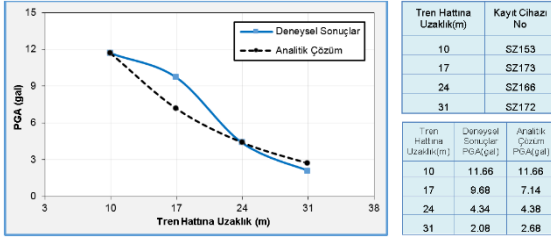
Şekil 6. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



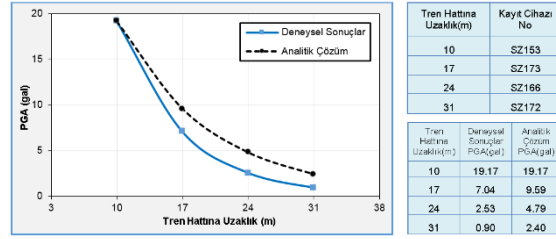
Şekil 7. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).



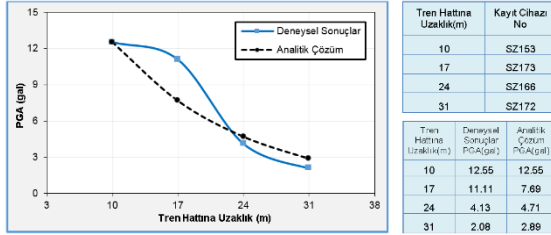
Şekil 8. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).



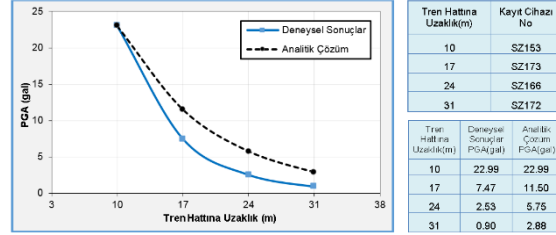
Şekil 9. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



Şekil 10. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1.Ölçüm-İstanbul yönü).



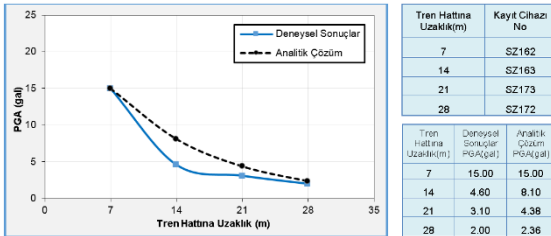
Şekil 11. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).



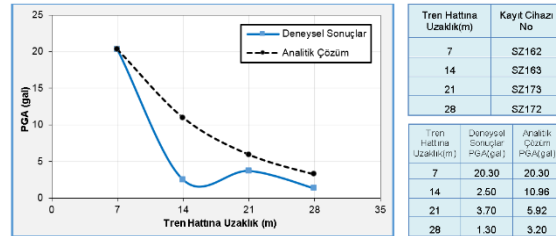
Şekil 12. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (2.Ölçüm-İstanbul yönü).

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça serbest zemin yüzeyinde meydana gelen tepe ivme genlikleri Bornitz çözüm yöntemine göre her iki doğrultu için orantılı biçimde azalma gösterirken, bu durumun deneysel sonuçlar için geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Özellikle hatta dik doğrultu için deneysel ölçümlerde kaydedilen maksimum ivmeler analitik sonuçlara kıyasla genel anlamda daha büyük değerlerde çıkmıştır. Buna ilaveten, hızlı tren hattına 17 m uzaklıktaki mesafede ölçülen en büyük ivme genlik değerlerinin özellikle hatta dik doğrultuda azalım davranışı sergilemediği hatta bazı ölçümlerde artış eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır. Bu durum hatta yakın ikinci ölçüm noktasında yerel olarak büyütme etkilerinin olduğu zemin yapısı varlığını düşündürmüştür (Şekil 5-12).

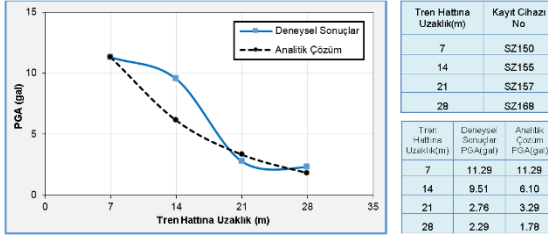
Çalışmanın bu kısmında öncelikle birinci ve ikinci saha çalışmalarındaki hendekli durumda ölçülen demiryolu kaynaklı titreşimler değerlendirilmiş, üçüncü saha çalışmasıyla da hendekli durumda ölçüm sahasına sonradan döşenen parke kilit taşının hızlı tren kaynaklı yer titreşimine etkisi test sahasında yapılan titreşim ölçüm kayıtları kullanılarak analiz edilmiş ve Şekil 13-24' de gösterilmiştir. Analizler yine "hatta paralel (E-W)" ve "hatta dik (N-S)" olmak üzere hareketin iki doğrultusu için yapılmıştır.



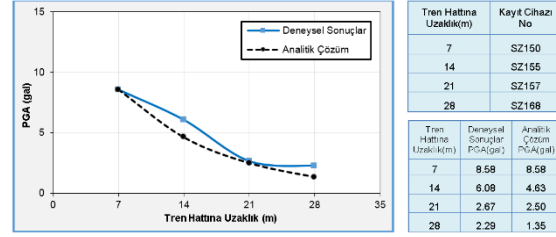
Şekil 13. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



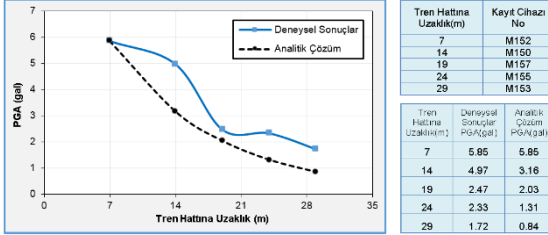
Şekil 14. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



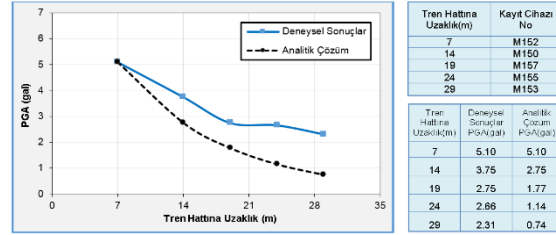
Şekil 15. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



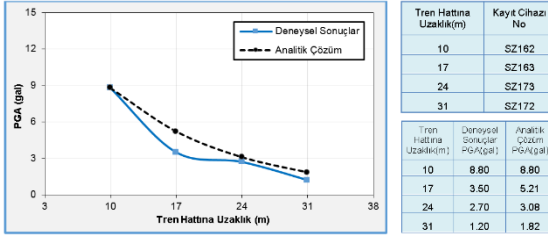
Şekil 16. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



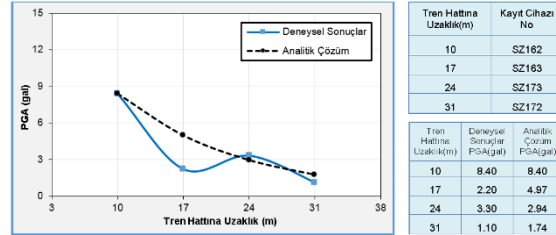
Şekil 17. 3.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



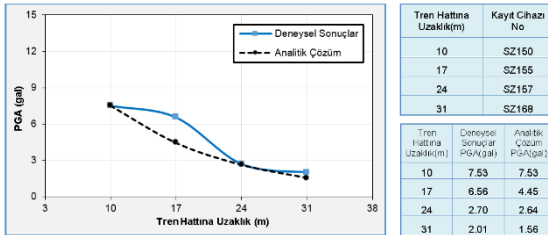
Şekil 18. 3.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- Ankara yönü)



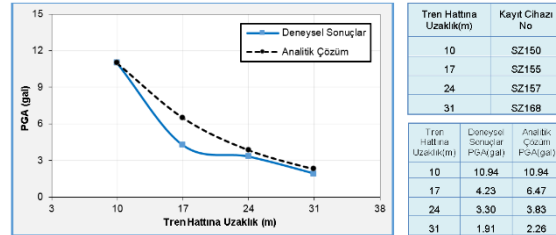
Şekil 19. 1.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



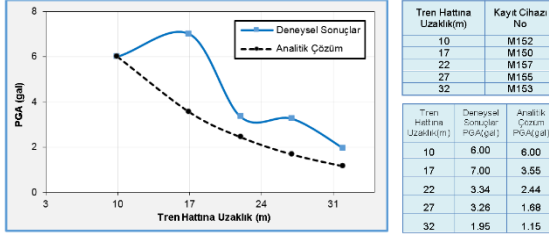
Şekil 20. 1.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



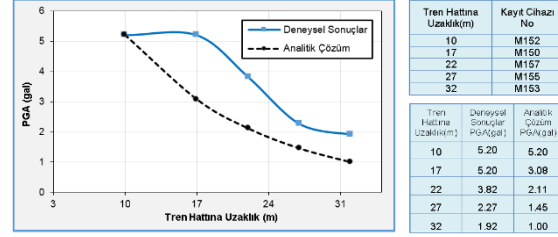
Şekil 21. 2.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



Şekil 22. 2.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendekli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



Şekil 23. 3.Saha çalışmasında hatta dik doğrultuda hendecli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)



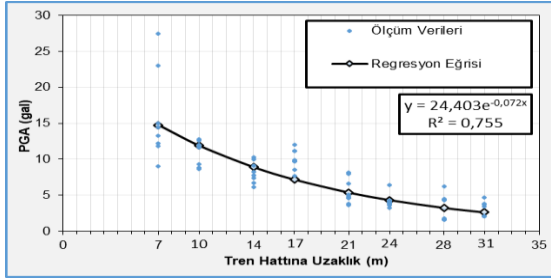
Şekil 24. 3.Saha çalışmasında hatta paralel doğrultuda hendecli durumda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın analitik yöntemle karşılaştırılması (1. Ölçüm- İstanbul yönü)

Test sahasındaki ikinci demiryolu hattından geçen İstanbul yönlü YHT trenlerinin serbest zemin hareketlerine benzer olarak, ivmeölçerlere daha yakın olan ve birinci hattan geçen Ankara yönündeki hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu tepe ivme genlikleri analitik sonuçlarda mesafeye bağlı azalırken deneysel olarak yine orantısız azalım göstermemiştir. Hızlı tren hattına yakın 14m'de ölçülen Ankara yönlü YHT titreşim dalgalarının maksimum genlikleri birinci saha çalışmasında daha fazla azalma eğilimi gösterirken, sonrasında tüm koşulların sabit olduğu ikinci saha çalışmasında aynı noktada artışlar gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak, ikinci saha çalışması sırasında trenlerin sebep olduğu titreşim etkileri dışında, ölçüm yapılan alanda yürütülmekte olan inşaat faaliyetlerinden dolayı (konkasör çalışması) meydana gelen gürültülerin kayıtların değerlendirilmesini zorlaştırdığı şeklinde değerlendirilmiştir. Buna ilaveten, üçüncü ölçümde test sahasına sonradan döşenen parke kilit taşı Ankara yönlü birinci hattan geçen YHT trenlerinin sebep olduğu demiryolu kaynaklı titreşimler üzerinde önemli oranda yalıtım etkisi göstermiştir. Hendecli serbest zemin ortamında İstanbul yönünde geçen hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu ivme-zaman kayıtlarının en büyük değerleri dikkate alındığında, tren hattına 17m mesafedeki uzaklığa bağlı azalımın birinci saha çalışmasında daha fazla olduğu söylenebilir. Bunun aksine özellikle hatta dik doğrultuda ikinci ve üçüncü saha ölçümlerinde aynı noktada büyütme etkileri gözlemlenmiştir. Seçilen pilot bölgeye sonradan döşenen parke kilit taşı ve hendek bariyeri İstanbul yönlü hızlı tren titreşimlerini azaltsa da, tepe ivme genliklerinde elde edilen yalıtım oranı ivmeölçerlere daha yakın olan Ankara yönlü birinci demiryolu hattındaki titreşimlere oranla daha azdır (Şekil 13-24).

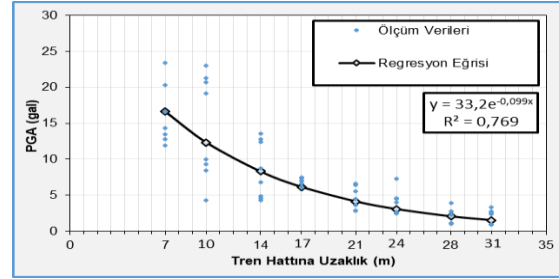
3.2. YHT geçişlerinin deneysel ve analitik olarak değerlendirilmesinde regresyon analizi

YHT trenlerinin doğal saha koşulları altında dalga iletimi açısından alüvyon gibi en elverişsiz zeminlerde oluşturduğu tepe ivme-zaman titreşim değerlerinin mesafeye bağlı değişimi incelendiğinde Bornitz analitik çözümünün orantılı değişim gösterdiği ancak bu durumun deneysel ölçümler için geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Seçilen pilot çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı ile hendek bariyer varlığını analitik çözümün dikkate alamadığı konusu vurgulanması gereken bir husustur. Bununla alakalı olarak, literatürde yaygın olarak kullanılan analitik çözüm yaklaşımlarındaki geometrik ve malzeme sönüm katsayılarının seçiminde, yerel zemin koşullarını daha gerçekçi tanımlayan jeofizik ve geoteknik deneylerin önemi bir kez daha anlaşılmıştır. Buna ilaveten özellikle deneysel ölçüm sonuçlarına göre demiryolu hattından belirli mesafelerde azalımın aksine tepe ivme genlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum yansıyan ve/veya saçılan yüzey dalgalarının varlığını düşündürmüştür. Gene çalışma sahasındaki yerel zemin koşullarının homojen yapıda olmaması sebebiyle büyütme zonlarının etkisiyle bazı ölçüm noktalarındaki titreşim seviyeleri artmıştır. Bu sebeplerden dolayı, çalışma sahasında kaydedilen ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini test etmek amacıyla regresyon analizi yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Alüvyon birikintisi gibi oldukça zayıf bir zemin ortamı üzerine inşa edilen demiryolu hattında oluşan titreşimlerin ölçüldüğü birinci ve ikinci saha ölçümlerine ait hatta dik ve paralel doğrultulardaki titreşim genliğindeki azalımın Regresyon analizi Şekil 25 ve 26'da verilmiştir. Analizler yapılırken

dinamik titreşim kaynağına olan uzaklık x parametresiyle, x' 'e bağlı oluşan tepe ivme genlikleri ise y parametresiyle tanımlanmıştır.



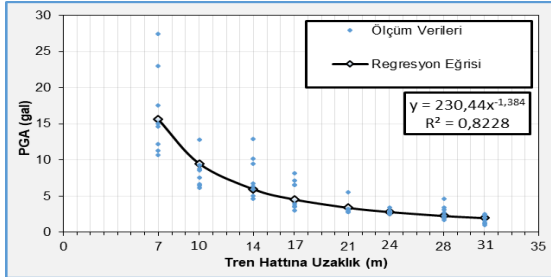
Şekil 25. 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta dik doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi



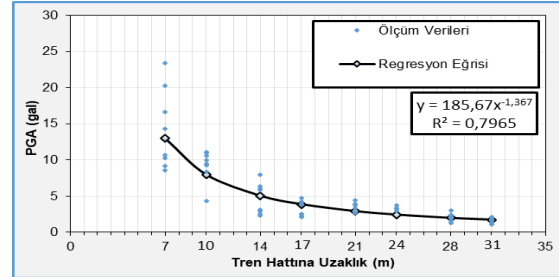
Şekil 26. 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta paralel doğrultuda titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

Yapılan regresyon analizi sonucunda değişkenler arasındaki doğrusal bağımlılığın göstergesi olan belirtme katsayı değerinin her iki doğrultu için 1'e yakın olması bağımlı ve bağımsız parametreler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir.

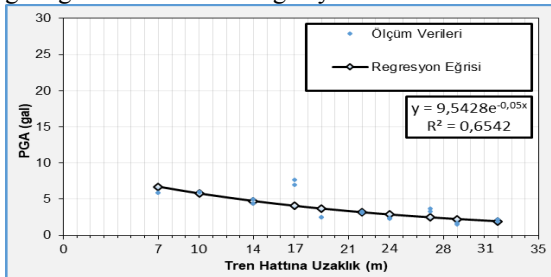
Ölçüm sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı etkisinin ve hendek varlığının değerlendirildiği üçüncü saha çalışması ile birinci ve ikinci saha çalışmalarında demiryolu hattına dik (NS) ve paralel (EW) doğrultularda alüvyon tabanlı zemin formasyonlarında ölçülen yüzey titreşim tepe ivme genliklerine ait regresyon analizi sonuçları Şekil 27-30'da gösterilmiştir. Birinci ve ikinci saha çalışmalarına ait elde edilen sonuçlardan özellikle çalışma sahasındaki hatta dik ve paralel doğrultularda hendekli durumda ölçülen tepe ivme titreşim genliklerinde oluşan azalım için hesaplanan determinasyon katsayısı değerinin %70'in üzerinde çıkması rassal değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin kuvvetli olduğunu göstermiştir. Benzer performansın üçüncü saha çalışmasında demiryolu hattına paralel doğrultuda ölçülen parke kilit taşı döşeli hendekli serbest zemin titreşimleri içinde geçerli olduğu söylenebilir.



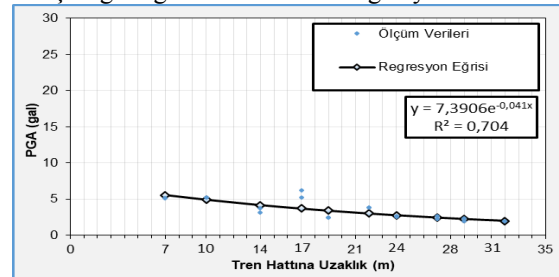
Şekil 27. Hendekli durumda 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta dik doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi



Şekil 28. Hendekli durumda 1. ve 2. saha ölçümlerine ait hatta paralel doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

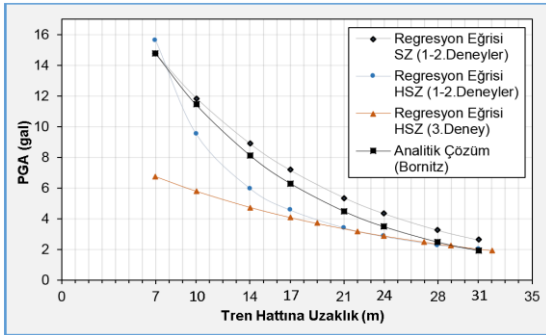


Şekil 29. Hendekli durumda 3. saha ölçümüne ait hatta dik doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

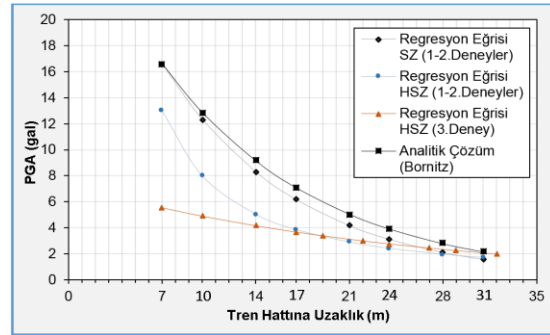


Şekil 30. Hendekli durumda 3. saha ölçümüne ait hatta paralel doğrultuda ölçülen titreşim genliğindeki azalmanın Regresyon analizi

Yapılan regresyon analizlerinin son aşamasında hızlı tren hattına dik ve paralel doğrultulardaki serbest zemin, hendekli serbest zemin ve beton parke kilit taşı döşeli hendekli serbest zemin koşulları için elde edilen Regresyon eğrileri ile Analitik yönteme ait azalım ilişkilerinin karşılaştırılması Şekil 31 ve 32’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre her iki doğrultuda Bornitz analitik çözüm yaklaşımı için teorik olarak hesaplanan değerler arasında uzaklığa bağlı orantısal azalım söz konusudur. Birinci ve ikinci saha ölçümlerinde YHT geçişlerine bağlı oluşan serbest zemin titreşimlerinin hatta paralel doğrultuda daha yüksek değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Hendekli ve hendeksiz test sahasında ölçülen ivme-zaman kayıtlarının tepe genlik değerleri karşılaştırıldığında, hendek varlığının hızlı tren kaynaklı titreşimleri önemli oranda azalttığı söylenebilir. Buna ilaveten çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşının özellikle demiryolu hattına yakın ölçüm noktalarında (7-14m) oluşan titreşim seviyelerinde hendeğin dışında önemli oranda yalıtım etkisi gösterdiği anlaşılmıştır.



Şekil 31. Hatta dik doğrultuda titreşim yayılımı için elde edilen Regresyon eğrileri ile Analitik yönteme ait azalım ilişkilerinin karşılaştırılması



Şekil 32. Hatta paralel doğrultuda titreşim yayılımı için elde edilen Regresyon eğrileri ile Analitik yönteme ait azalım ilişkilerinin karşılaştırılması

4. Sonuç

Yapılan bu çalışmada, TCDD genel taşımacılık hizmetleri için kullanılan YHT tren geçişlerinin alüvyon zemin ortamında ve hendekli serbest zeminde ürettiği yer hareketinin dalga oluşum mekanizmasına odaklanılmıştır. Buna ilaveten hendekli durumda ölçüm sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı kaplamasının yer titreşimine etkisi deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar genel anlamda değerlendirildiğinde, yüksek hız trenlerinin serbest zemin ve hendekli serbest zeminde oluşturduğu, maksimum titreşim etkileri demiryolu hattından uzaklaştıkça Bornitz analitik çözüm yöntemine göre orantılı bir azalım ilişkisi gösterirken, bu durumun hatta paralel (E-W) ve hatta dik (N-S) doğrultular için ölçülen deneysel verilerde geçerli olmadığı anlaşılmıştır. Kazıldığında yanal stabilite sorunu olmayan zeminlerde en az bir dalga boyu derinliğinde uygulanan açık hendeklerin en etkili titreşim yalıtım aracı olduğu literatürden bilinmektedir [33]. Alüvyon tabanlı zemin koşullarına sahip ölçüm sahasında, hendekli ve hendeksiz serbest zemin yüzeylerinde yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimler için elde edilen maksimum ivmelere göre söz konusu yalıtım etkisi gözlenmiştir. İstenmeyen titreşimlerin engellenmesiyle alakalı önlemler kapsamında gene yüksek hızlı demiryolu hatlarında balast altı malzemesi olarak kullanılacak asfalt kaplamaların taban zemindeki gerilme ve deformasyonları azaltacağı ve daha güvenli tren seferleri oluşturacağı düşünülebilir [34]. Ayrıca, çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı hendek varlığının dışında özellikle demiryolu hattına yakın ölçüm noktalarında önemli oranda yalıtım etkisi göstermiştir. Bununla birlikte, titreşim enerjisinin zemin ortamında soğrulmasını mesafeye bağlı tanımlayan ve literatürde yapılan birçok deneysel çalışmada [22, 25] farklı hızlara sahip tren geçişleri için test edilen Bornitz’in sunmuş olduğu teorik formülasyonun, seçilen pilot çalışma sahasına sonradan döşenen beton parke kilit taşı ile hendek bariyer varlığını dikkate alamadığı konusu vurgulanması gereken bir husustur.

Doğal saha koşullarında gerçek yük kaynağına bağlı yapılan bu deneysel çalışmada elde edilen ölçüm sonuçlarının özellikle Bornitz analitik çözüm yaklaşımıyla kıyaslanması, mesafeye bağlı azalımda kullanılan teorik yaklaşımların eksikliğini ortaya çıkarmıştır. Demiryolu hattından çevreye yayılan yüzeysel titreşim dalgalarının uzaklıkla birlikte genliklerinin monoton azalması teorik olarak beklenen bir sonuç olup deneysel olarak da yapılan saha ölçümleriyle bu durum teyit edilmiştir. Ancak bazı bölgelerde, yerel zemin yapısının mekanik özelliklerinin heterojen dağılım göstermesinden dolayı titreşim seviyesinin arttığı büyütme zonlarına da rastlanılmıştır. Demiryolu hattına eşit uzaklıkta serbest zemin üzerine ardışık olarak yerleştirilen komşu ivmeölçerlerden alınan yer hareketi kayıtlarında bile farklılıklar olabileceği ölçüm sahasında tecrübe edilmiştir. Benzer koşullara sahip noktalarda kaydedilen titreşimler arasındaki fark, YHT trenlerinin geçişleri sırasında farklı frekanslarda oluşan yüzey titreşim dalgalarının yayılma biçimleri ve yerel zemin koşullarının değişmesiyle açıklanabilir.

Teşekkür

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

Kaynakça

- [1] K. Adolfsson, B. Andréasson, P-E. Bengtson, A. Bodare, C. Madshus, R. Massarch, 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.
- [2] G. Degrande, L. Schillemans, "Free field vibrations during the passage of a Thalys HST at variable speed", *Journal of Sound and Vibration*, 247(1), 131-144, 2001.
- [3] Z. Zhang, F. Ma, B. Zhang, "Vibration measurement of long-span floors in high-speed railway station", *Journal of Vibroengineering*, 20(7), 2705-2719, 2018.
- [4] P. Ropars, X. Vuylsteke, E. Augis, "Vibrations induced by metro in sensitive buildings; experimental and numerical comparisons", in: *EURONOISE 2018 Conference*, Heraklion, Greece, 2018, pp. 1381-1386.
- [5] J. Yang, P. Li, Z. Lu, "Numerical Simulation and In-Situ Measurement of Ground-Borne Vibration Due to Subway System", *Sustainability*, 10(7), 2439, 2018.
- [6] W. Yan, H. Zheng, Z. Wu, T. Wan, and X. Tian, "Experimental study and numerical analysis on the vibration characteristics of a terraced slope along an embankment section of a high-speed railway", *Shock and Vibration*, 2020.
- [7] E. Çelebi, G. Schmid, "Investigation of ground vibrations induced by moving loads", *Engineering Structures*, 27(24), 1981-1998, 2005.
- [8] S.H. Ju, "Finite element analysis of structure-borne vibration from high-speed train", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 259-273, 2007.
- [9] L. Auersch, "The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks", *Journal of Sound and Vibration*, 310, 587-607, 2008.
- [10] E. Çelebi, "Three-dimensional modelling of train-track and sub-soil analysis for surface vibrations due to moving loads", *Applied Mathematics and Computation*, 179, 209-230, 2006.
- [11] P. Fiala, G. Degrande, F. Augustinovicz, "Numerical modeling of ground borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic", *Journal of Sound and Vibration*, 301, 718-738, 2007.
- [12] L. Auersch, "Train induced ground vibrations: different amplitude-speed relations for two layered soils", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226 (5), 469-488, 2012.
- [13] G.Y. Gao, J. Song, J. Yang, "Identifying boundary between near field and far field in ground vibration caused by surface loading", *Journal of Central South University*, 21 (8), 3284-3294, 2014.
- [14] Z. Wang, A. Tang, D. Huang, C. Wu, Z. Huang, "A novel environmental vibration analysis system and its application in isolation of environmental vibration induced by high-speed train in Harbin frozen soil site", *Applied Acoustics*, 193, 108781, 2022.
- [15] J. Yao, R. Zhao, N. Zhang, D. Yang, "Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105741, 2019.

- [16] D.P.N. Kontoni, A.A. Farghaly, “Mitigation of train-induced vibrations on nearby high-rise buildings by open or geofoam-filled trenches”, *Journal of Vibroengineering*, 22 (2), 416-426, 2020.
- [17] Y. E. Ibrahim, M. Nabil, “Finite element analysis of multistory structures subjected to train-induced vibrations considering soil-structure interaction”, *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00592, 2021.
- [18] A. Lyrtzakakis, Y. Tsompanakis, P. N. Psarropoulos, “Efficient mitigation of high-speed train vibrations on adjacent reinforced concrete buildings”, *Construction and Building Materials*, 314, 125653, 2022.
- [19] S. Ahmad, T.M. Al-Hussaini, “Simplified design for vibration screening by open and infilled trenches”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 (1), 67-88, 1991.
- [20] S.H. Ju, H.T. Lin, “Experimentally investigating finite element accuracy for ground vibration induced by high-speed trains”, *Engineering Structures*, 30, 733-746, 2008.
- [21] D. Macijauskas, V. B. Stefan “Propagation of harmonical vibrations in peat”, *International Journal of GEOMATE*, 7(2), 1101-1106, 2014.
- [22] F. Goktepe, H.S. Kuyuk, E. Celebi, “In-situ measurement of railway-traffic induced vibrations nearby the liquid-storage tank”, *Earthquakes and Structures*, 12 (5), 583-589, 2017.
- [23] S.J. Yang, "Attenuation of Ground Vibration Induced by Dynamical Machinery", *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla, Missouri, USA, 1981.
- [24] D-S. Kim, J-S. Lee, “Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 115–126, 2000.
- [25] X.W. Ren, J.F. Wu, Y.Q. Tang, J.C. Yang, “Propagation and attenuation characteristics of the vibration in soft soil foundations induced by high-speed trains”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 374-383, 2019.
- [26] S-H. Ju, S-H. Ni, “Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31, 1239–1255, 2007.
- [27] H. Amick, M. Gendreau, “Construction vibrations and their impact on vibrationsensitive facilities”, *ASCE Construction Congress 6*, Orlando, 2000.
- [28] M. Komazawa, H. Morikawa, K. Nakamura, J. Akamatsu, K. Nishimura, S. Sawada, A. Erken, A. Önalp, “Bedrock Structure in Adapazari, Turkey – A Possible Cause of Severe Damage by the 1999 Kocaeli Earthquake”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 829 – 836, 2002.
- [29] TBDY, 2018. “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [30] MGS Proje Müşavirlik Mühendislik Ticaret Ltd. Şti., 2013. “TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Sivas-Erzincan Demiryolu Projesi, Çevresel Etki Değerlendirme Başvuru Dosyası”, Ankara.
- [31] M. Şahin, F. Göktepe, E. Çelebi, A.C. Zülfişkar, O. Kırtel, “Farklı Frekans İçeriklerine Sahip Tren Geçişlerinde Oluşan Titreşim Enerjisinin Soğurulmasının Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi”, 8. *Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [32] M. Şahin, “Alüvyon Zemin Ortamındaki Dalga Soğurulmasının Tren Geçişleri İçin Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, Türkiye, 2020.
- [33] M. Naghizadehroknı, M. Ziegler, J. Sprengel, “A full experimental and numerical modelling of the practicability of thin foam barrier as vibration reduction measure”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106416, 2020.
- [34] C. Güner, T.A. Törer, K. Aslantaş, “Yüksek Hızlı Hatlarda Grantüler Alt Balast Yerine Asfalt Tabaka Kullanımının Sonlu Elemanlarla Modellenmesi”, *Demiryolu Mühendisliği*, 14, 39-48, 2021.

Özgeçmiş



Murat ŞAHİN

Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği ve Mühendislik Tamamlama Programı ile Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde tamamlayan yazar, yüksek lisans eğitimini “Alüvyon Zemin Ortamındaki Dalga Soğurulmasının Tren Geçişleri İçin Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi” başlıklı teziyle Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda tamamlamıştır.

E-Posta: muratemirbeyoglu@gmail.com



Fatih GÖKTEPE

Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimini aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı'nda tamamlayan yazar halen Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nde Doçent unvanında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Yazarın araştırma konuları zemin dinamiği, zeminlerde dalga yayılımı, yapı-zemin dinamik etkileşimi, hareketli yüklerin modellenmesi, geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi, doğal afetler ve titreşim azaltıcı dalga bariyerlerinin tasarımı üzerinedir.

E-Posta: fgoktepe@bartin.edu.tr



Erkan ÇELEBİ

Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği'nde tamamlayan yazar halen Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi'nde Profesör unvanında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Yazarın araştırma konuları betonarme yapılar, geoteknik deprem mühendisliği, yapı dinamiği, yapı-zemin dinamik etkileşimi, yer titreşimleri, yer tepki analizleri, sonlu elemanlar yöntemi, titreşim dalgalarının azaltılması ve yüksek hızlı demiryolu trafiği kaynaklı zemin titreşim ölçümleri üzerinedir.

E-Posta: ecelebi@sakarya.edu.tr



Abdullah Can ZÜLFİKAR

Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek Lisans Eğitimini Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalında, Doktora Eğitimini Japon Milli Eğitim Bakanlığı (Monbusho) burslusu olarak Okayama Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Halen Gebze Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları Deprem Mühendisliği, Kuvvetli Yer Hareketi, Zemin Davranış Analizi, Tren titreşimleri, Deprem Tehlike ve Risk Analizi üzerinedir.

E-Posta: aczulfikar@gtu.edu.tr



Osman KIRTEL

Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans ve doktora eğitimini Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği'nde tamamlayan yazar halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi'nde Dr.Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Yazarın araştırma konuları betonarme yapılar, deprem mühendisliği, yapı dinamiği, yapı-zemin dinamik etkileşimi, patlama etkileri, çevresel titreşimler, sonlu elemanlar yöntemi, titreşim dalgalarının azaltılması ve yüksek hızlı demiryolu trafiği kaynaklı zemin titreşim ölçümleri üzerinedir.

E-Posta: okirtel@subu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Murat ŞAHİN: Deneysel Saha alışmaları, Verilerin Deneysel ve Analitik Analizi, Grafiklerin Elde Edilmesi, Metnin Yazımı ve Yorumlanması, Kavramsallaştırma, Metodoloji. Fatih GÖKTEPE: Deneysel Saha alışmaları, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Metnin Yazımı ve Gözden Geçirilerek Düzenlenmesi. Erkan ÇELEBİ: Deneysel Saha alışmaları, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Metnin Yazımı ve Gözden Geçirilerek Düzenlenmesi. Abdullah Can ZÜLFİKAR: Deneysel Saha alışmaları, Metodoloji, Metnin Gözden Geçirilerek İncelenmesi ve Kontrol Edilmesi. Osman KIRTEL: Deneysel Saha alışmaları, Metodoloji, Metnin Gözden Geçirilerek İncelenmesi ve Kontrol Edilmesi.