

TREN GEÇİŞLERİNİN KÜÇÜK AYASOFYA CAMİ ÜZERİNDE VE YANINDAKİ SERBEST ZEMİN YÜZEYİNDE OLUŞTURDUĞU TİTREŞİMLERİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aykut ERKAL *

Alınma: 28.08.2017; düzeltme: 18.11.2017; kabul: 31.12.2017

Öz: Kentleşmenin dünya çapında hızlı artışına paralel olarak, karayolu ve demiryolu trafiği de artmaktadır. Bunun sonucunda, özellikle şehir merkezlerinde yaygınlaşan demiryolu ağları, kültürel miras yapılarına son derece yakın inşa edilebilmektedir. Tren geçişlerinin oluşturduğu dinamik yükler, bu hassas yapılara hasar verebileceği gibi, yapı sakinlerini de rahatsız edebilmektedir. Demiryolu hattına yakınlığı, tarihi zenginliği ve toplumsal değerinden dolayı Küçük Ayasofya Cami bu çalışmada örnek yapı olarak seçilmiştir. Öncelikle, yapı üzerinde ve bahçesinde, tren titreşimleri kaydedilmiş ve frekans ortamında incelenmiştir. Demiryolundan uzaklaştıkça zemin yüzeyindeki titreşimlerin yayılımı deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Ayrıca, titreşimlerin genlikleri, yapısal hasar potansiyeli ve insan tepkisi bakımından değerlendirilmiştir. Geniş bir frekans aralığına yayılan zemin titreşimleri, demiryolundan yaklaşık 35-45m uzaklıkta, zemin büyütmesi göstermiştir. Yapı üzerinde ise tarihi yapılarda hasara sebep olabilecek, sınır titreşim seviyeleri, bazı durumlarda aşılmıştır. Sonuç olarak, kültürel miras yapıları üzerinde ve çevresinde titreşim ölçümleri yapılması, bu yapıların durum değerlendirmesi ve olası hasarların önlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Tren titreşimleri, Titreşim ölçümü, Tarihi yapılar, Kagir yapılar, Yayılım

Experimental Investigation of Train-Induced Vibrations on And Around Little Hagia Sophia Mosque

Abstract: Parallel to the increase in worldwide urbanization, road and rail traffic has also risen. Consequently, widespread railway lines have been built adjacent to the existing cultural heritage structures. Dynamic loading induced by train traffic may cause damage to these structures as well as discomfort to the residents. Due to the close proximity to the railway, historical significance and communal value, Little Hagia Sophia Mosque was selected as a case study. At first, vibrations on and around the mosque were measured and analyzed in the frequency domain. Attenuation characteristics of vibrations on the ground were determined theoretically and experimentally with distance from the railway. Then, measured vibration levels have been assessed in connection with the thresholds for potential damage and human response. Frequency of vibrations was distributed in a wide range and an amplification zone on the ground was observed 35-45m from the railway. Notably, peak particle velocities sometimes exceeded the previously established minimum damage thresholds. In conclusion, vibration measurement on and around the structure is crucial for the evaluation of structure's condition and potential damage prevention.

Keywords: Train-induced vibrations, Vibration measurement, Historic structures, Masonry structures, Attenuation

* Altınbaş Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mahmutbey Dilmenler Caddesi, No:26, 34217, Bağcılar, İstanbul, Türkiye.

İletişim Yazarı: Aykut ERKAL (aykut.erkal@altinbas.edu.tr)

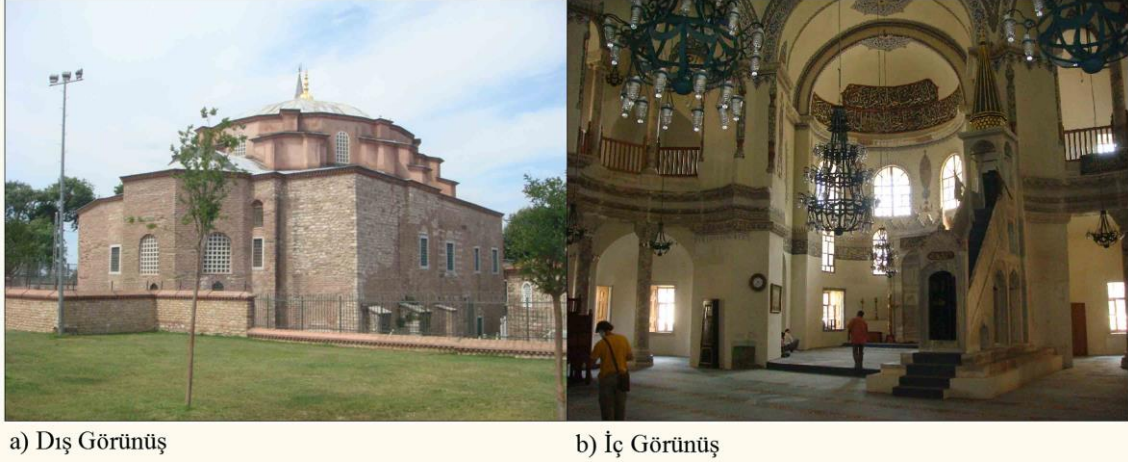
1. TRAFİK TİTREŞİMLERİ VE KÜLTÜREL MİRAS YAPILARI

Tren rayları ve tekerlekleri üzerindeki yüzeysel bozukluklara, traversler tarafından mesnetlenen rayların dinamik özelliklerine ve trenlerin yaylanabilen ve yaylanamayan kütle özelliklerine ve düzensizliklerine bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşan dengelenmemiş kuvvetler, tren sebebiyle yer titreşimlerini meydana getirirler. Bu titreşimler zemin içinde yayılarak yakın bölgelerdeki yapılara temelleri vasıtasıyla iletilirler (Connolly ve diğ., 2015). Tren sebebiyle yer titreşimleri genellikle yüksek frekanslıdır ve genlikleri yeteri kadar büyük olduğunda, hassas aletlerin çalışmasını engelleyebilir, bina sakinlerine rahatsızlık verebilir ve hatta yapısal hasara sebep olabilirler (Correia dos Santos ve diğ., 2017). Küresel ve ulusal düzeyde, son zamanlarda artan kentleşme, raylı ulaştırma sistem ihtiyacını ve inşasını, mevcut binalara daha da yakın hale getirmektedir. Örneğin, Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı'nın Türkiye genelinde, 2023 yılı hedefleri arasında 3500 km yüksek hızlı demiryolu, 8500 km hızlı demiryolu ve 1000 km konvansiyonel demiryolu olmak üzere 13000 km demiryolu inşa edilerek, toplam 25000 km demiryolu yatırımı bulunmaktadır (<http://www.udhb.gov.tr>). Benzer olarak, İstanbul'da, 145 km mevcut raylı sistem, yapımı ve ihale hazırlıkları devam eden, 2019 hedefli raylı sistem hatları ile birlikte toplam 454 km'ye ulaşacaktır (<http://www.ibb.gov.tr>).

Ne yazık ki, trafik sebebiyle titreşimler özellikle tarihi yapılarda risk teşkil etmektedir. Çünkü genliklerinin çok yüksek olmamasına karşın, bu titreşimler yapılara, uzun süreli, sık tekrarlı ve yüksek frekanslı olarak tesir ederler (Kliukas ve diğ., 2008). Ayrıca tarihi yapı malzemelerinin çekme kuvvetlerine karşı dayanımları da çok yüksek değildir. Titreşim etkileri, eski kagir yapılarda aşamalı bir şekilde harç parçalanmasına ve tuğla yada taş blok ayrılmasına sebep olabilir. Taşıyıcı sistemlerinde yetersizlik bulunan, atmosferik etkiler sebebiyle kısmen çürümeye maruz kalmış ve geçmiş depremler neticesinde kısmi hasar görmüş yapılar özellikle risk altındadır (Erkal, 2017). Raylı sistemlerin yoğun işlediği şehir merkezlerinde, kültürel miras olarak kabul edilen tarihi yapıların büyük bir kısmının bulunması, bu alanlarda kapsamlı araştırma ihtiyacını doğurmaktadır. Buna örnek teşkil eden eserlerden biri de Bizans döneminde bir kilise olarak inşa edilen, son derece önemli bir kültürel miras yapısı, günümüzde Cami olarak kullanılan, Küçük Ayasofya Cami'dir. Bu yapı, çok yakınından geçen demiryolu sebebiyle, 1871 yılından bu yana, yoğun tren trafiğinin olumsuz etkilerine maruz kalmıştır. Tarihi, toplumsal ve estetik değerler barındırması nedeniyle, tren titreşimlerinin yapıya hasar verici nitelikte olup olmadığı ve demiryolundan uzaklaştıkça titreşimlerin zemindeki yayılımının araştırılması, eserin korunması açısından büyük önem arz etmektedir.

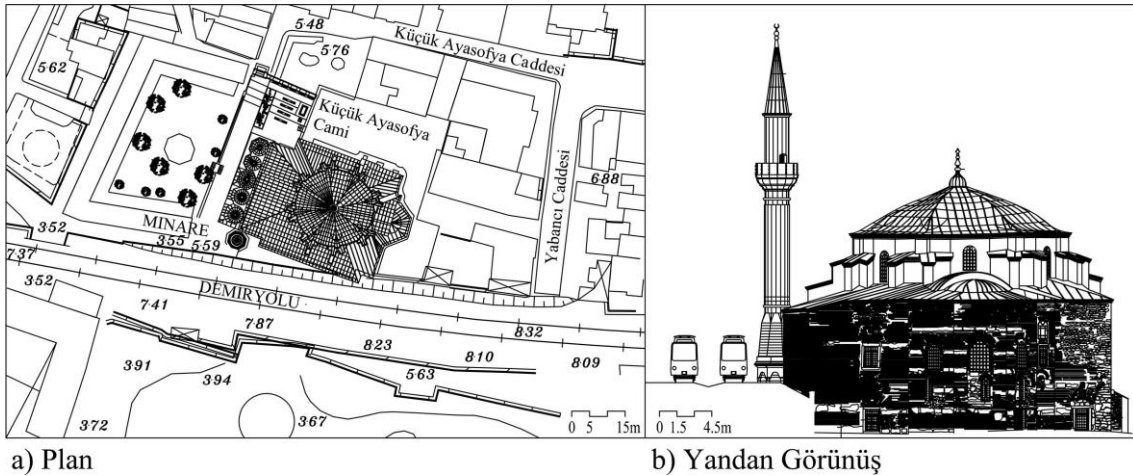
2. KÜÇÜK AYASOFYA CAMİ VE TREN TİTREŞİMLERİ

İstanbul'un en eski Bizans Dönemi yapısı olarak bilinen Küçük Ayasofya Cami, MS 527-536 yılları arasında kilise olarak Bizans İmparatoru İustinianos tarafından inşaa edilmiştir. Osmanlı İmparatorluğu döneminde, Küçük Hüseyin Ağa tarafından 1504'de kiliseden camiye çevrilen yapı, Eminönü İlçesi'nde hala kullanılmaktadır (Şekil 1). Köse Bahir Mustafa Paşa tarafından 1762'de yapıya bir minare eklenmiş, 1940 yılında kısmen yıkılsa da, yeniden inşası 1956 yılında tamamlanmıştır (Erkal, 2017). Yapı, tarih boyunca yangın, deprem, istila, yağmalama gibi çeşitli felaketlere maruz kalmıştır. Bunlardan biri de tren sebebiyle titreşimlerdir. 1870-1871 yıllarında, güneyde yapı duvarına 5-10m uzaklıktaki tren yolunun inşa edilmesiyle, 2012'ye kadar, yapı devamlı ve uzun süreli titreşimlere maruz kalmıştır. Çok çeşitli restorasyon ve güçlendirme müdahaleleri görmüştür (Koçak ve Köksal, 2010). Son olarak, zemin profilinde ve yapının temel sisteminde zamanla oluşan 15-20cm civarındaki farklı oturmalar, cami üst yapısında çatlak ve yapısal hasarlar oluşturmuştur. Bu sebeple, 2003 yılında önerilen güçlendirme çalışmasıyla, temel sistemi mini kazıklarla takviye edilmiş ve cami ile hemen yanından geçen demiryolu arasındaki camiye bitişik olan duvar yalıtılıp, camiden ayrılmıştır (Sağlamer, 2003).



Şekil 1.
Küçük Ayasofya Cami

Planda yaklaşık 44mx28m boyutlarındaki yapının 21.5m ye uzanan 16.5m çapında 8 köşeli ana kubbesi bulunmaktadır (Şekil 2). Taş ile takviye edilerek 4-5cm kalınlığında harç ile örülen tuğla dış duvarlar yapıya heybetli ve estetik bir görünüm vermektedir. Kubbe ve tonozlar ise tuğladan yapılmıştır. Basınç kuvvetlerine karşı daha mukavim olan bu tarihi kagir yapı, tren titreşimleri sebebiyle oluşabilecek çekme kuvvetlerine karşı nispeten daha zayıftır. Bu sebeple olası hasar tespitine ilaveten yapının dış etkilere karşı davranışı da düzenli olarak takip edilip, değerlendirilmelidir. Yapının deprem performansı ve tren titreşimlerine karşı davranışı, kısıtlı olarak incelenmiş olsa da (Güler ve diğ., 2004; Koçak ve Köksal, 2010; Yüzüğüllü ve Durukal, 1997; Arun, 2001; Erkal ve diğ., 2010b) tren titreşimlerinin yapı üzerinde ve çevresindeki özellikleri ve etkileri, kapsamlı olarak araştırılmamıştır. Bu sebeple olası hasar tahminlerine imkan verebilecek, kapsamlı bir titreşim ölçme programı uygulanmıştır. Kritik noktalarda kaydedilen partikül hızları, zaman ve frekans ortamında analiz edilmiştir. Zeminde kaydedilen titreşimlerin yayılımı deneysel ve teorik yöntemlerle belirlenip değerlendirilmiştir. Daha sonra, titreşim seviyeleri, yapısal hasar ve insan tepkisi bakımından incelenmiştir. Çünkü bu yapının varlığının korunması ve geleceğe güvenle aktarılması, global bir kültürel miras olmasından dolayı büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.
Küçük Ayasofya Camisinin konumu ve demiryoluna olan yakınlığı

3. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Yapı çevresinde yapılan üç derin sondaj çalışması neticesinde, zemin yüzeyinden 10m derinliğe kadar değişik kalınlıklarda heterojen dolgu tabakaları, eski yapı temeli ve zemin iyileştirmesi için kullanılan kireç taşı blokları bulunan katmanlar, yumuşak-orta kıvamda siltli kil istifi ve deniz kumundan oluşan tabakalar bulunmuştur. Yaklaşık 10m derinlikte Trakya formasyonuna ait kumtaşı-silttaşı-kilttaşı kayasına rastlanmıştır. Daha detaylı bilgi, Güler (2004) ve arkadaşlarının çalışmalarında bulunmaktadır (Güler ve diğ., 2004).

Tren titreşimlerinin etkin olduğu üst tabakalardaki zemin özellikleri ise oldukça önemlidir. Bu kısımda zemin yapısı ince daneli ve kohesiftir. Yapı yakınında 1.0mx1.5m plan boyutlarında ve 2.0m derinliğinde açılan iki muayene çukurunda, 0.9m derinliğe kadar tuğla, kemik parçaları ve bitkisel köklerin bulunduğu yeni dolguya rastlanmıştır. Bu kısımdan çukur tabanına uzanan bölgede ise bitki kökleri, %20-30 oranında çeşitli büyüklükte beyazımsı gri renkli kireç taşı çakılları ile bunları çevreleyen kil-marn litolojileri ve hatta kömür ve cam parçaları içeren eski dolgu olduğu saptanmıştır (Arun, 2001). Anlaşılacağı üzere yapının ve raylı sistemin üzerinde bulunduğu zemin son derece heterojen ve tabakalıdır.

4. RAYLI SİSTEM HATTI ÖZELLİKLERİ

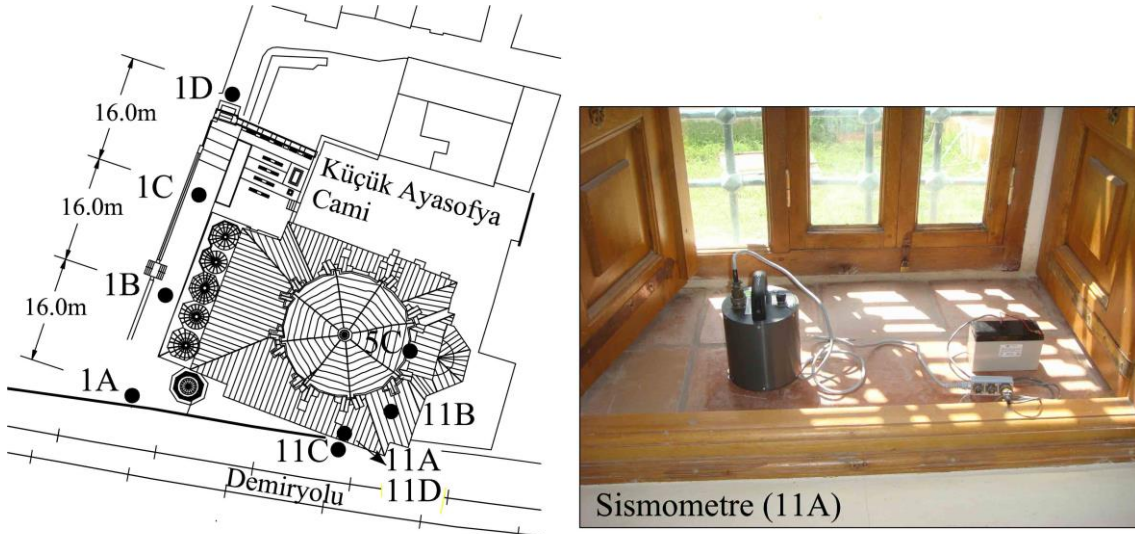
Tarihi semt merkezlerinden geçen bu raylı sistem hattında çalışan banliyö trenleri Sirkeci-Halkalı arasında, diğer trenler ise Edirne'ye kadar seyahat etmişlerdir. Demiryolu operasyonu 2012'de durmuş olsa da, iyileştirmeden sonra tekrar hizmet verecektir. Trenler genellikle altı vagonlu olup bunların ikisi seyahat yönüne göre diğerlerini çeken lokomotiflerdir. Raylı sistem hattına ve çalışan trenlere ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sirkeci-Halkalı raylı sistem hattının ve bu hatta çalışan trenlerin özellikleri

Tren Türü	Banliyö Treni	Ana Hat (Ekspres) Treni	Yük Treni
Günlük Her İki Yöne Seyahat Eden Tren Sayısı	118 adet	6 adet	2 adet
Günlük Seyahat Eden Yolcu Sayısı	65000–75000 kişi	1000–1500 kişi	—
Dingil Ağırlığı	14–16ton	10–12 ton	En fazla 20 ton
Toplam Ağırlık	320 ton	400–500 ton	En fazla 1500 ton
Tren Hızı	70–90 km/saat	70–90 km/saat	70 km/saat

5. TİTREŞİM ÖLÇME PROGRAMI

Kapsamlı bir test programı dâhilinde, Küçük Ayasofya Cami yapısı üzerinde ve yapı çevresindeki zemin üzerinde, sismograflar kullanılarak trafik sebepli titreşim ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada Test 1, Test 5 ve Test 11'de yapılan ölçümler incelenmiştir. Testlerde, sismograflar, test numaralarıyla birlikte, A, B, C ve D olarak adlandırılıp Şekil 3'de gösterilen noktalara yerleştirilmişlerdir. Test 1'de titreşimlerin zemin üzerindeki yayılımını araştırmak amacıyla, bölgenin fiziksel kısıtları imkan verecek şekilde, dört sismograf, tren yoluna dik ve eşit aralıklarla cami bahçesinde zemin yüzeyine yerleştirilmişlerdir. Dolayısıyla, sismograf A, demiryoluna en yakın noktada ve sismograf D en uzak noktada bulunmaktadır. Test 5'de ise yapısal sistemdeki titreşimleri anlamak amacıyla, sismograf C, taşıyıcı sistemin esas kısımlarından biri olan ana kubbenin dış kenarına yerleştirilmiştir (Şekil 3). Test 11'de ise, titreşimlerin yapının çeşitli bölgelerindeki özelliklerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu sebeple, sismograf C yapı dışında zemin üzerine, A ve D sırasıyla zemin kattaki ve birinci kattaki demir yoluna en yakın pencerelerin iç kısımlarına yerleştirilirken, B ise birinci kattaki demiryoluna yakın bir döşemenin ortasına sabitlenmiştir (Şekil 3).



a) Test 1, Test 5, Test 11

c) Örnek enstrümantasyon

Şekil 3.

Yapı üzerinde ve çevresinde ölçüm alınan noktalar

Testlerde, titreşimlerin birbirine dik doğrultulardaki bileşenleri [düşey (Z), kuzey-güney (K-G) ve doğu-batı (D-B)] ölçülmüştür. Ölçümler, hafif, üç bileşenli ve dijital çıktılı sismograflar (CMG-6TD) kullanılarak yapılmıştır. Kagir yapıların olası yüksek stifinlari ve titreşimlerin yüksek frekanslı olmasından dolayı, kayıtlarda titreşim örnekleme oranı 500 Hz olarak atanmıştır. Bu değer, benzer bir bilimsel çalışmada, bir çan kulesinin çevresel titreşim analizinde kullanılan değerın 2.5 katı olarak, geniş aralıklı bir analize imkan vermiştir (Gentile ve Saisi, 2007).

6. ZEMİN YÜZEYİNDEKİ TREN SEBEPLİ YER TİTREŞİMLERİ

Tren geçişi esnasında zeminde bünye ve yüzey dalgaları oluşmaktadır. Titreşim enerjisinin büyük bir bölümü bünye dalgaları olan boyuna ve enine dalgalardan ziyade, Rayleigh yüzey dalgaları ile taşınmaktadır. Dalgalar zeminde yayılırken, genliklerinin değişimi konusunda fikir sahibi olmak için, Test 1’de zemin yüzeyinde, 3 farklı tren geçişinin oluşturduğu titreşimler kaydedilmiştir. Titreşimlerin düşey (Z), kuzey-güney (K-G) ve doğu-batı (D-B) yönlerindeki ölçülen en yüksek partikül hızları sırasıyla Şekil 4’de gösterilmiştir. Titreşim seviyelerinin büyüklükleri geniş ölçüde farklılıklar göstermiştir. Örneğin, Tren1 ve Tren2 nin oluşturduğu düşey doğrultudaki en yüksek genlik seviyelerindeki fark %62 ye kadar çıkmaktadır. Değeri 70km/saat ile 90km/saat arasında değişen tren hızlarının bu farklılık üzerindeki etkisinin büyüklüğü aşıkardır (Xia ve diğ., 2005). Grafik, titreşimlerin kayıt edildiği alanda iki farklı bölgenin olduğunu da açığa çıkarmaktadır. Şöyle ki, titreşim kaynağından yaklaşık 25m ötesine kadar, titreşim genlikleri tren özelliklerine göre büyük çeşitlilik göstermiştir. Dolayısıyla bu bölge zemin davranışı bakımından kritik bir bölgedir. Bu bölgenin ötesinde zemin davranışı genlikler bakımından göreceli olarak birbirine daha yakın değerler olsa da, titreşim seviyeleri kısmen de olsa “insanın rahatça algılayabileceği” eşik değeri olan 0.3mm/s’nin üzerine çıkmaktadır. Eğer yapılar dinamik özellikleri sebebiyle bu titreşimleri büyütecek olursa, potansiyel hasar, titreşim kaynağından 25m den daha uzak da bile vuku bulabilir (Erkal ve diğ., 2010a).

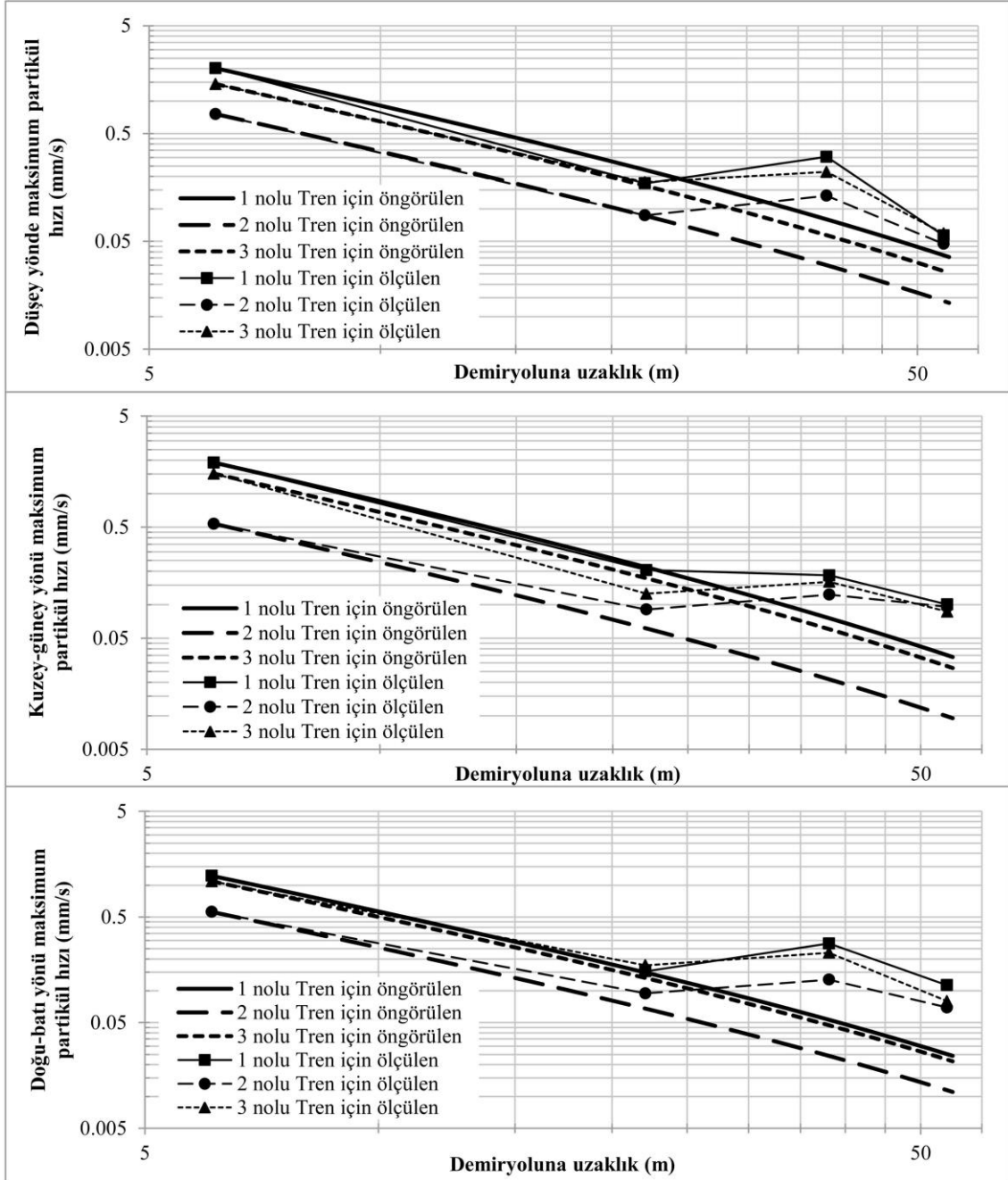
Şekil 4’de, titreşimlerin zemin içinde ilerleyişi sırasında genliklerinin değiştiği de görülmektedir. Buna titreşimlerin yayılımı denir. Zeminin yayılım özelliklerinin bilinmesi, olası zemin yapı etkileşimi ve zemin iyileştirme çalışmalarında alınacak önlemler bakımından son

derece önemlidir. Yarı sonsuz bir zemin üzerinde, titreşimlerin genliklerindeki azalım geometrik ve malzeme sönümünden dolayı meydana gelir. Geometrik sönüm, titreşim enerjisinin daha geniş bir alana yayılıp azalmasından dolayı oluşurken; malzeme sönümü, dalga yayılımı sırasında, zeminin tamamen elastik olmamasından dolayı içsel sürtünmeler sebebiyle kaybedilen enerjiden kaynaklanır. Zemin türü, nem oranı, zemin sıcaklığı ve benzeri faktörler malzeme sönümünü etkilemektedir. Geometrik ve malzeme sönümünden kaynaklanan titreşim genliklerindeki azalım, teorik olarak Denklem 1 ile ifade edilebilir (Kim ve Lee, 2000).

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n \exp[-\alpha (r_2 - r_1)] \quad (1)$$

Denklemdaki w_1 ve w_2 , titreşim kaynağından sırasıyla r_1 ve r_2 mesafelerindeki titreşimlerin genliklerini, n geometrik yayılım (azalım) katsayısını ve α ise malzeme sönüm katsayısını göstermektedir.

Öngörülen teorik yayılım modelleri, düşey (Z), kuzey-güney (K-G) ve doğu-batı (D-B) doğrultularında ölçülen titreşimlerle karşılaştırıldı (Şekil 4). Teorik model için, trenlerin 6 vagonlu olduğu ve hızlarının 90km/saat değerine kadar çıktığı dikkate alınır, trenler genel olarak kısa ve hızlı olarak değerlendirilebilir. Buna göre, tren yüklemesi tekil ve çizgisel yüklerin kombinasyonu olarak karakterize edilerek, geometrik yayılım katsayısı $n=1.5$ olarak seçilmiştir. Zeminin sıkışmış, sert ve konsolide olduğu dikkate alınarak ve en büyük titreşim enerjisinin 30-50 Hz arasında olduğu düşünülerek, malzeme sönüm katsayısı ise 0.015 (1/m) olarak seçilmiştir (Kim ve Lee, 2000; Woods, 1997). Teorik yayılım modeli ve zemin yüzeyindeki titreşim ölçümleri, bazı farklılıklar dışında, makul derecede uyumlu bir davranış gösterdiği kabul edilebilir. Dalgalar zemin içinde ilerlerken frekanslarına bağlı olarak zemin tarafından genlikleri sönümlendirilebilir ya da büyütülebilir. Dalgaların zemin tabakaları içinde geçirdiği genliklerin artması şeklindeki değişimlerin tümüne zemin büyütmesi denir. Tren yoluna 35-45m uzaklıktaki bir bölgede zemin büyütmesi olayı görülmektedir. Buna benzer bir davranış Xia ve diğ. (2005) tarafından da rapor edilmiştir (Xia ve diğ. 2005). Zeminin heterojen ve yumuşak katmanlar içeren tabakalı yapısı bu oluşumun en büyük sebeplerindendir. Zeminin sönümleyici özelliği ve katılığı azaldıkça titreşimlerin genlikleri artma eğilimindedir. Yaptığı örnek çalışmada, hareketli tren yüklerinin yumuşak ve sert zeminlerdeki etkilerini inceleyen Auersch (2008), %5 sonum oranı kullanarak, enine (S) dalga hızını sert zemin için 300m/s ve çok yumuşak zemin için 30m/s olarak almıştır (Auersch, 2008). Sonuç olarak, yumuşak zeminin düşük frekanslı hız genliklerini, sert zeminde elde edilen genliklerden 100 kat daha fazla olarak rapor etmiştir.



Şekil 4. Tren sebebiyle oluşan titreşimlerin zemin yüzeyindeki yayılımı

7. YAPI VE BAHÇESİNDE TREN SEBEPLİ TİTREŞİMLER

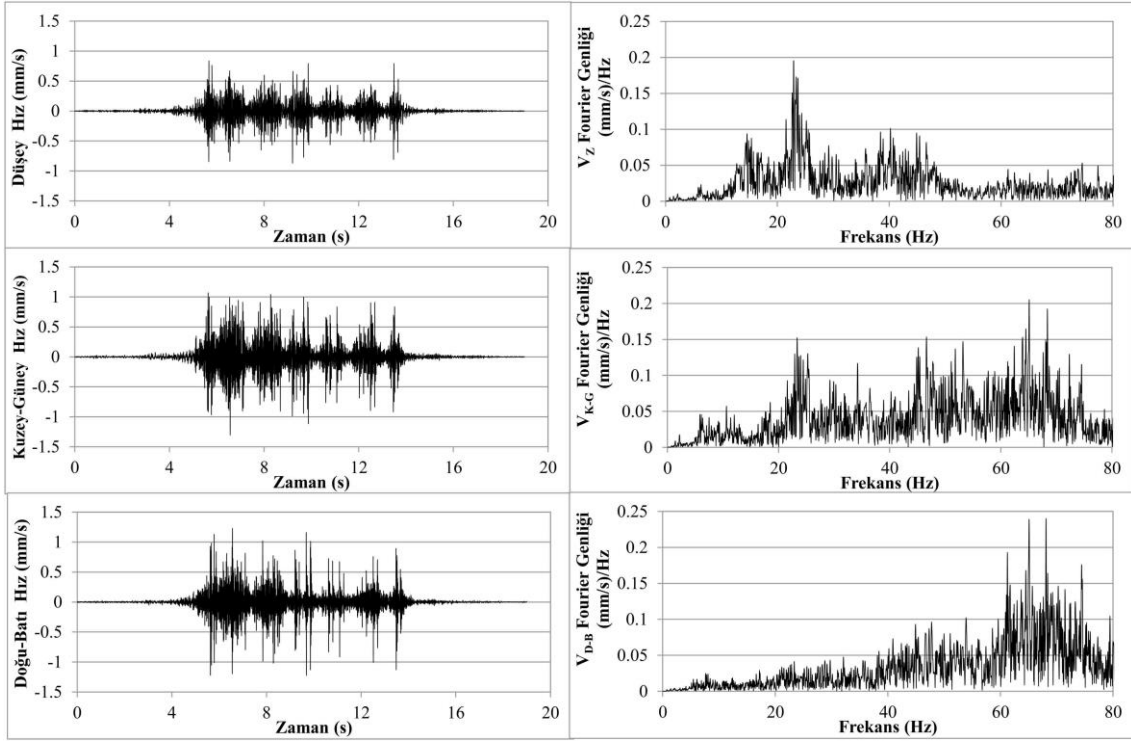
Test 11’de yapı dışında zeminde, C noktasında (11C) ve birinci kat döşeme ortasında, B noktasında (11B) ve Test 5’de ise ana kubbenin dış kenarında, C noktasında (5C), 2 nolu tren geçişleri sebebiyle 3 doğrultuda kaydedilen tren titreşimleri, zaman ve frekans alanında sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7’de verilmiştir. Frekans alanında Fourier spektrumları hesaplanmıştır. Kaydedilen titreşim enerjisinin büyük kısmının 100Hz değerinin altında kaldığı ve insan tepkisi de genellikle 100Hz’in altındaki frekans değerlerinde çalışıldığı için (Sica ve diğ., 2014), titreşimlere temel çizgi düzeltilmesi (base-line correction) yapıldıktan sonra, gürültüden arıtmak

amacıyla, kesim frekansı 100Hz olan, üçüncü mertebeden, alçak geçiren, Butterworth filtre uygulanmıştır.

Bu çalışmada, yapı dışında zeminde kaydedilen titreşimlerin (11C) yüksek frekanslı ve yaklaşık 15-80Hz gibi bir aralıkta olduğu görülmektedir (Şekil 5). Bu aralık, daha önce yapılan benzer çalışmalarda, 4-30 Hz (Jones ve Block, 1996) ve 7-70 Hz (Kim ve Lee, 2000) olarak rapor edilen tren titreşim hakim frekans aralıklarından daha geniştir. Buradan görülmektedir ki, tren geçişlerinin oluşturduğu zemin titreşimlerinin hakim frekansları, genellikle geniş aralıklarda meydana gelmektedir. Titreşimlerin genlikleri tüm doğrultularda birbirinden çok farklı değildir, çünkü bu titreşimler çok çeşitli noktalarda ve çok çeşitli fazlarda meydana gelen yüzey ve bünye dalgalarının üst üste binmesiyle oluşmaktadır. Bu sebeple, tren sebebiyle yer titreşimleri, yakınındaki yapıları her doğrultuda sarsabilir. Zeminde oluşan bu tür yüksek hakim frekanslı tren titreşimleri, yüksek frekanslı modları olan yapılarla etkileşerek, yapı titreşimlerini arttırabilir. Hatta, zemin titreşim genliklerinin yeteri derecede yüksek olması durumunda, titreşimin genliği yapılarda hasara sebep olabilecek değerine ulaşabilir.

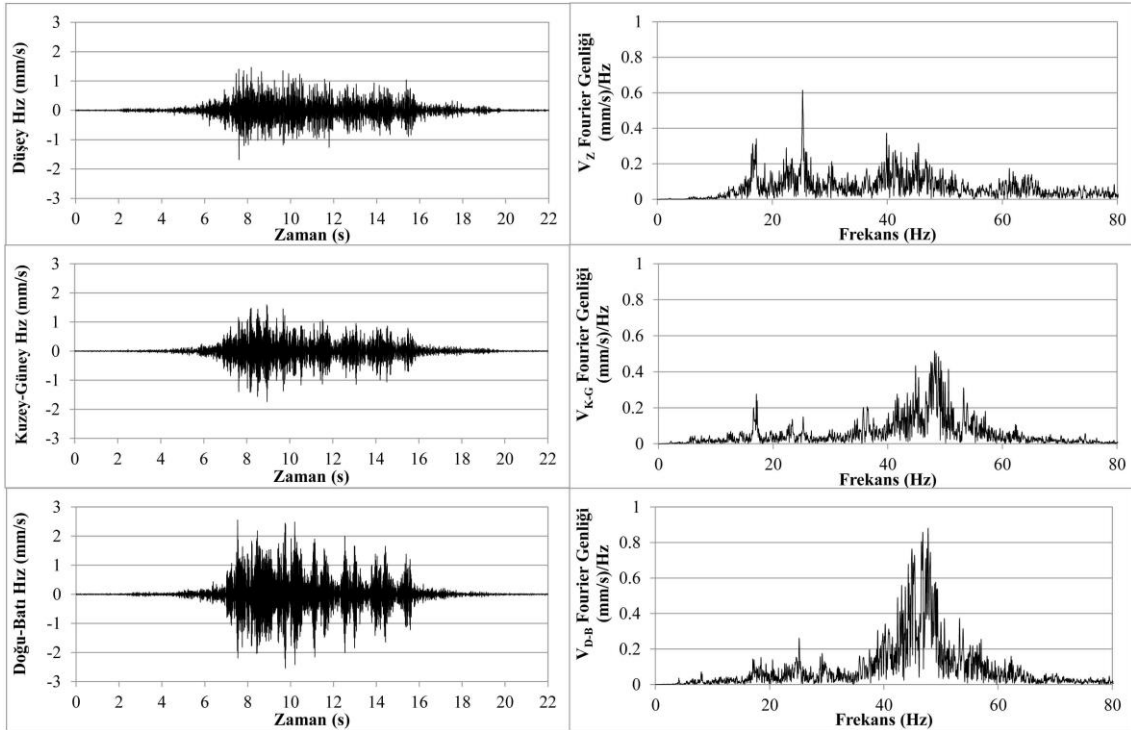
Şekil 6 ise birinci kat döşeme ortasında kaydedilen titreşimleri göstermektedir. Titreşimlerin düşey bileşenleri, geniş bir frekans aralığında kaydedilmiştir. Öyle ki, düşey titreşim frekansları 15-65Hz gibi bir aralığa yayılırken, kuzey-güney ve doğu-batı yönündeki yüksek genlikli yatay titreşimler yaklaşık 40-60Hz gibi daha dar bir alanda yoğunlaşıp 48Hz değerinde tepe yapmaktadır. Bunun sebebi döşemenin yerdeğiştirme kabiliyetinin, düşey doğrultuda, yatay doğrultudakinden daha fazla olmasından dolayıdır. Titreşimlerin genlikleri de kritiktir. Özellikle doğu-batı doğrultusunda 3mm/s değerine yaklaşmakta ve bu değer hem rahatsızlık vericidir hem de kültürel ve tarihi değeri olan yapılarda 1mm/s olan partikül hız sınır değerini geçmektedir (Tablo 2).

Ana kubbenin dış kenarında, demiryoluna yaklaşık olarak paralel olan doğu-batı doğrultusundaki titreşimlerin, diğer doğrultulardaki titreşimlerden daha yüksek genlikli olduğu Şekil 7’de görülmektedir. 5C noktasında, deplasmanların yüksek genlikli ve taşıyıcı sistem üzerinde olmasından dolayı, yapının zemin titreşimleri ile olan etkileşimi, titreşim kayıtlarının analizinde daha belirgin olarak görülmektedir. Frekans içeriğine bakıldığında, yapının birinci doğal titreşim frekansının 4.15Hz (T=0.24sec) olduğu aşıkardır. Bu değer, yapının daha önce farklı araştırmacılar tarafından, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan modal analizinden elde edilen 4.59Hz (Güler ve diğ., 2004) ve 4.47Hz (Koçak ve Köksal, 2010) değerindeki birinci doğal titreşim frekans değerlerinden sırasıyla %8 ve %10 kadar farklıdır. Bu farklılık makul olarak değerlendirilse de, sebepleri daha gerçekçi bir nümerik model ve deneysel modal analiz yöntemleriyle araştırılabilir. 5C noktasında 45Hz üzeri titreşimlerin neredeyse yok denecek kadar az olması da yine yapının bir filtre gibi çalıştığını gösterir. Yani, yapının doğal titreşim frekanslarının haricindeki zemin titreşimlerinden pek etkilenmediği sonucuna varılabilir. Gelecekte potansiyel bir hasarın sözkonusu olup olmayacağı konusunda fikir edinmek için, yapının çeşitli noktalarda kaydedilen en yüksek partikül hızları bir sonraki bölümde değerlendirilecektir.



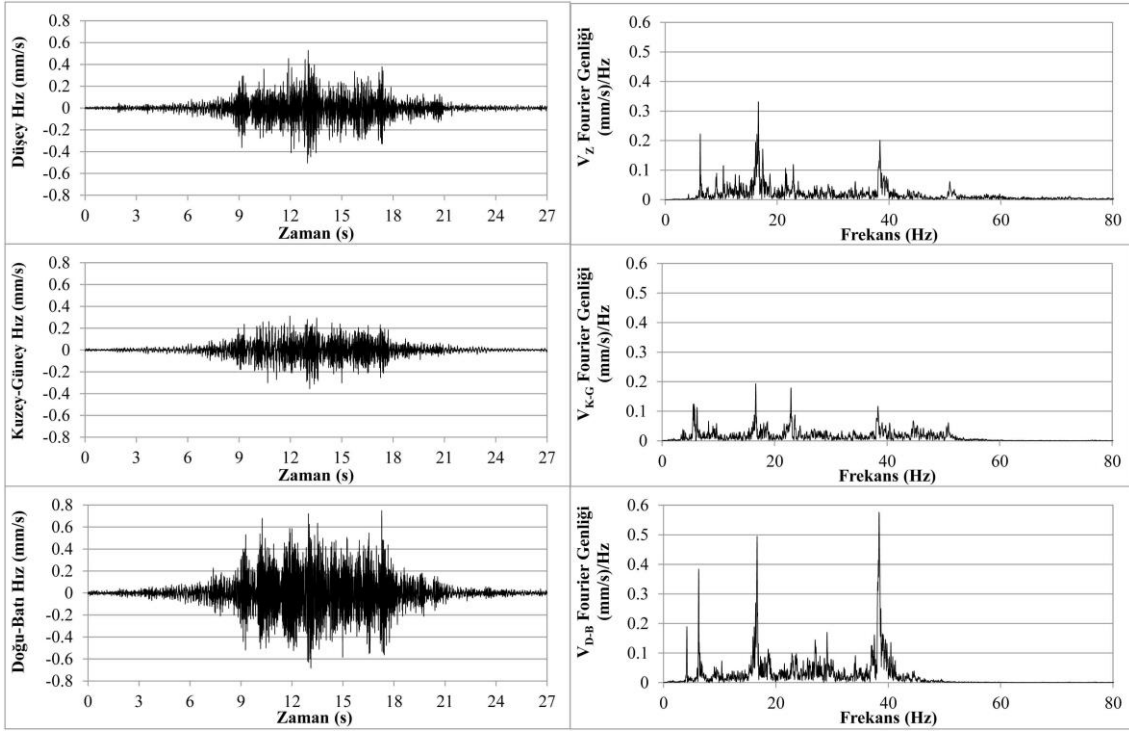
Şekil 5.

Test11 'de C noktasında Tren2 titreşimlerinin düşey, kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri ve ilgili Fourier spektrumları



Şekil 6.

Test11 'de B noktasında Tren2 titreşimlerinin düşey, kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri ve ilgili Fourier spektrumları



Şekil 7.

Test 5'de C noktasında Tren2 titreşimlerinin düşey, kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri ve ilgili Fourier spektrumları

8. YAPISAL HASAR VE İNSAN TEPKİSİ BAKIMINDAN YAPIDAKİ TİTREŞİM SEVİYELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapının ve yapı sakinlerinin titreşimlere tepkisi, bu titreşimlerin genliği, frekansı, yönü, süresi gibi titreşim özelliklerine bağlı olmasının yanında, yapının dinamik özelliklerine de bağlıdır. Hatta vücudun duruş biçimi, titreşimin uygulanma noktası, vücut ağırlığı, vücut direnci ve kıyafetleri gibi birçok faktör de titreşimlerin hissedilmesine etki eder. Bu sebeple, yapısal hasar oluşturacak ve yapı sakinlerine rahatsızlık verebilecek yer titreşimleri için, doğruluğu kesin olan ve evrensel boyutta geçerli sınır değerler belirlemek mümkün değildir. Yine de bir çok yönetmelik ve bilimsel çalışma en yüksek partikül hızlarını esas alarak, değerlendirmeyi önerirler. Çünkü partikül hızı, partikül ivme ve partikül yerdeğiştirmelerine göre doğası itibarıyla, titreşimlerin frekans içeriğinden nispeten daha bağımsızdır (Hao ve diğ., 2001). Çeşitli çalışmalar sonucu çok çeşitli değerler önerilmiştir (Srbulov, 2010). Bazı en yüksek partikül sınır hız değerleri Tablo 2'de örnek olarak verilmiştir.

Caminin hala kullanımda olmasından dolayı, ölçülen titreşim değerleri, insan algısı ve olası yapısal hasar sınır değerlerine göre değerlendirilmiştir. Şekil 8, Test 11'de yapı üzerinde dört noktada ölçülen en yüksek partikül hızlarını göstermektedir. Yatay titreşimler genelde düşey titreşimlere oranla daha yüksek genliklerdedir. Tüm değerler hassas durumlarda algılanabilir titreşim sınırı olan 0.14mm/s (BS 5228-2, 2009) ve ikamet bölgelerinde algılanabilir titreşim sınırı olan 0.3mm/s (Wiss, 1981) değerlerinin üzerindedir. Endişe arz edebilecek bir sonuç olarak, bir çok durumda titreşim seviyeleri tarihi yapılarda hasara sebep olabilecek, en düşük titreşim seviyesi olarak kabul edilen 1mm/s değerini aşmaktadır (Domenichini ve diğ., 1998; Bonde ve diğ., 1981). Özellikle ikinci tren geçişinde, kuzey-güney doğrultusunda, yapıda ölçüm yapılan tüm noktalarda titreşim seviyeleri bu değer üzerine çıkmaktadır. Masif taşıyıcı duvarlara kıyasla, döşemenin daha yumuşak olmasından dolayı, birinci katın döşeme ortasında (B noktası) tüm doğrultularda, diğer ölçüm noktalarına oranla daha yüksek titreşim seviyeleri kaydedilmiştir. En

yüksek değer, yine B noktasında, 2.7mm/s olarak ölçülmüştür. Bu değer, tarihi ve hassas yapılar için sınır değer olan 2.5mm/s (DIN 4150-3, 1999) hız değerinin üzerine çıkmaktadır.

Kaydedilen değerler büyük bir tehlike arz etmese de, yapıda düzenli aralıklarla kapsamlı olarak titreşim ölçümleri ve hasar kontrolleri yapılması, yer titreşimlerinin uzun vadede negatif etkilerini anlamak açısından oldukça önemlidir. Yapılarda hasar oluşturabilecek titreşim seviyelerinin çok altındaki titreşimlere bile insanların çok hassas olduğu sınır değerlerden de görülmektedir. Bu sebeple, tarihi kagir yapıların güçlendirilmesinde, yapının hedeflenen fonksiyonunu normal kullanım altında sürdürebilmesi için, trafik titreşimlerine karşı insan tepkisi, “kullanılabilirlik limit durumu” olarak değerlendirilmelidir. Tarihi yapıların karmaşık yapısal sistemleri, malzeme özellikleri ve zemin koşulları, yapıya özgü araştırma ve değerlendirme gerektirir. Bu alanda yapılan bazı benzer çalışmalar trafik titreşim probleminin global olduğuna işaret etmektedir (Crispino ve D'apuzzo, 2001).

Tablo 2. Yapı ve yapı sakinleri için örnek titreşim sınır değerleri

En yüksek partikül hızı (mm/s)	Titreşimlerin yapılar ve insanlar üzerindeki etkisi	Kaynak
0,14	Hassas durumlarda algılanabilir	BS 5228-2, 2009
0,3	İkamete mahsus bölgelerde algılanabilir	Wiss, 1981
0,8	Rahatlıkla algılanabilir	Wiss, 1981
1	İkametgah bölgelerinde şikayete sebep	BS 5228-2, 2009
1	Binalarda yapısal hasar	Domenichini ve diğ.,
1	Kültürel ve tarihi değeri olan yapılarda	Bonde ve diğ., 1981
2,5	Şiddetli algılanabilir	Wiss, 1981
2,5	Tarihi ve hassas yapılar için sınır değer	DIN 4150-3, 1999
3	Kazıklı temel üzerine oturan yapılarda	Bonde ve diğ., 1981
15	Kagir yapılar için kozmetik hasar sınırı	BS 5228-2, 2009

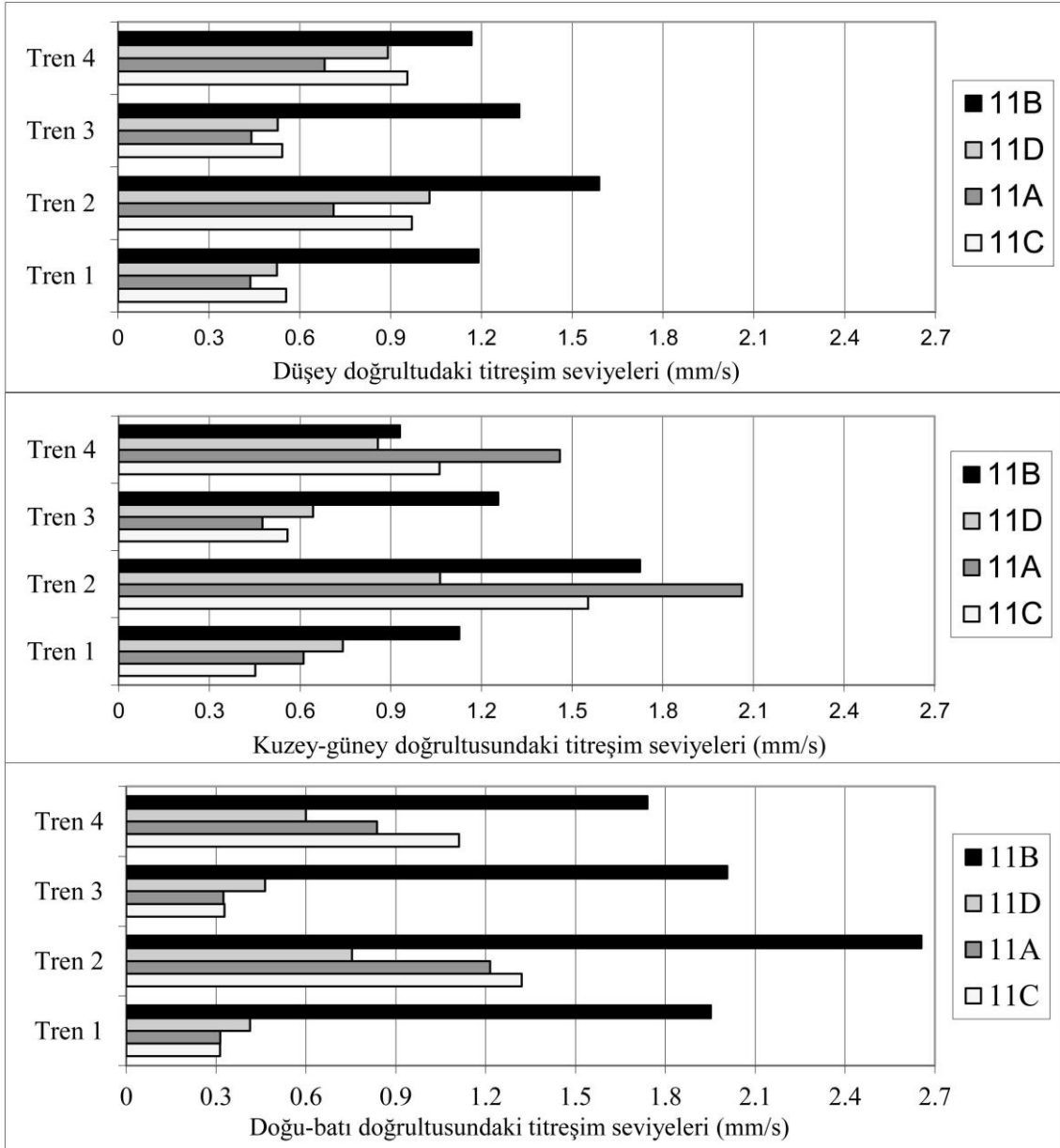
9. SONUÇ

Hızla artan kentleşmenin bir neticesi olan yoğun demiryolu ağı ne yazık ki tarihi yapılar üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. İstanbul'un halen kullanımda olan en eski Bizans dönemi yapısı, Küçük Ayasofya Cami, demiryolu trafiğine yakınlığı, tarihi değeri ve ihtişamlı mimarisi sebebiyle bu çalışmada araştırma konusu olmuştur. Öncelikle yapı üzerinde ve bahçesinde titreşim ölçme programı gerçekleştirilmiştir. Partikül hızları, zaman ve frekans ortamında analiz edilmiştir. Titreşimlerin zeminde ilerleyişi sırasında genliklerinin değişimi yani yayılımı deneysel ve teorik yöntemlerle kıyaslanıp değerlendirilmiştir. Daha sonra, titreşim seviyeleri, yapısal hasar ve insan tepkisi bakımından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Yapı yanından geçen demiryolu trafiği oldukça yoğundur. Bundan dolayı, özellikle ağır vagonları olan ve hızlı seyahat eden trenlerin sürekli ve tekrarlı geçişleri ile geniş frekans aralığı olan yer titreşimleri oluşturmaktadır. Bu titreşimler, yüksek frekanslı modları olan yapılarla etkileşerek, yapı titreşimlerini arttırabilir.
- Zeminin oldukça heterojen ve tabakalı olduğu bilinmektedir. Zemin yüzeyindeki titreşim ölçümleri ve teorik yayılım modeli, bazı farklılıklar dışında, makul derecede uyum göstermiştir. Kritik olarak, demiryoluna 35-45m uzaklıktaki bir bölgede, zemin büyütmesi sebebiyle, düşük genlikli titreşimler, yapılara ve özellikle kültürel miras yapılarına hasar verecek seviyelere çıkabilmektedir.
- Taşıyıcı sistem üzerinde kaydedilen titreşimlerin frekans içeriği, yapının birinci doğal titreşim frekansının 4.15Hz olduğuna işaret etmektedir. Bu değer, diğer araştırmacıların nümerik modellerinden elde edilen değerlerden %10 kadar farklıdır. Dolayısıyla, teorik

modellemeler kesinlikle deneysel çalışmalarla doğrulanmalıdır.

- Düşey doğrultuda döşemenin yerdeğiştirme kabiliyetinin, yatay doğrultudakinden daha fazla olmasından dolayı, döşeme titreşimleri, yapısal sistem titreşimlerinden farklıdır.
- Yapı üzerinde kaydedilen tüm titreşim seviyeleri ikamet bölgelerinde algılanabilir titreşim sınırı olan 0.3mm/s değerlerinin üzerindedir. Kritik olarak, tarihi yapılarda hasara sebep olabilecek, en düşük titreşim seviyesi olarak kabul edilen 1mm/s değeri, birçok durumda aşılmaktadır. En yüksek değer, 2.7mm/s olarak kaydedilmiştir.
- Kültürel miras yapılarının genellikle heterojen ve anizotropik malzeme ile inşa edilmesi, yapı davranış analizini ve olası bir hasar tahminini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple deneysel ölçüm ve değerlendirme oldukça önemlidir.



Şekil 8.
Test 11’de yapı üzerinde ölçülen en yüksek partikül hız seviyeleri

KAYNAKLAR

1. Arun, G. (2001) Investigation on Küçük Ayasofya Mosque – The Church of Sergius and Bacchus in Istanbul, *RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-destructive Evaluation of Masonry Structures*, Mantova, Italy, 12-14 Kasım 2001, 301-310.
2. Auersch, L. (2008) The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks, *Journal of Sound and Vibration*, 310(3), 587-607. doi:10.1016/j.jsv.2007.10.013
3. Bonde, G., Rundquist, G., ve diğ. (1981) *Criteria for Acceptable Traffic-Induced Vibrations*, Institute of Technology, Uppsala University, Sweden (UPTEC 81 42 R, TRAVI-K).
4. BS 5228-2, (2009). Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 2: Vibration, British Standards Institution, United Kingdom.
5. Connolly, D.P., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C.L. ve Forde, M.C. (2015) Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects, *Construction and Building Materials*, 92, 64-81. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042
6. Correia dos Santos, N., Barbosa, J., Calçada, R. ve Delgado, R. (2017) Track-ground vibrations induced by railway traffic: experimental validation of a 3D numerical model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 324-344. doi:10.1016/j.soildyn.2017.03.004
7. Crispino, M. ve D’Apuzzo, M. (2001) Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building, *Journal of Sound and Vibration*, 246(2), 319–335. doi:10.1006/jsvi.2001.3648
8. DIN 4150-3, (1999). German Standard on Structural Vibration – Part 3: Effects of vibration on structures, German Institute for Standardization, Germany.
9. Domenichini, L., Crispino, M., D’apuzzo, M., ve Ferro, R. (1998) Road traffic induced noise and vibration, *XXIII PIARC Road National Conference*, Italy, 69–118.
10. Erkal, A., Laefer, D., ve Fanning, P. (2010a) Building response to traffic-induced vibrations and related human disturbance, *The Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA, 10-14 Ocak 2010.
11. Erkal, A., Laefer, D., Fanning, P., Durukal, E., Hancilar, U., ve Kaya, Y. (2010b) Investigation of the rail-induced vibrations on a masonry historical building, *7th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions*, Shanghai, China, 6-8 Ekim 2010, 569-574. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.569
12. Erkal, A. (2017) Transmission of Traffic-induced Vibrations on and around the Minaret of Little Hagia Sophia, *International Journal of Architectural Heritage*, 11(3), 349-362. doi:10.1080/15583058.2016.1230657
13. Gentile, C. ve Saisi, A. (2007) Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, *Construction and Building Materials*, 21(6), 1311-1321. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007
14. Güler, K., Sağlamer, A., Celep, Z., ve Pakdamar, F. (2004) Structural and earthquake response analysis of the Little Hagia Sophia Mosque, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, 1-6 Ağustos 2004. Makale No: 2652.
15. Hao, H., Ang, T.C., ve Shen, J. (2001) Building vibration to traffic-induced ground motion, *Building and Environment*, 36(3), 321-336. doi:10.1016/S0360-1323(00)00010-X

16. http://www.ibb.gov.tr/tr-TR/kurumsal/Birimler/RayliSistemlerDB/PublishingImages/rayli_sistemler_1.pdf, Erişim Tarihi: 20.07.2017, Konu: Raylı Sistem Projeleri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Daire Başkanlığı.
17. <http://www.udhb.gov.tr/images/faaliyet/c19d85352980eaf.pdf>, Erişim Tarihi: 20.07.2017, Konu: Demiryolu Sektörel Projeler, Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.
18. Jones, C.J.C. ve Block, J.R. (1996) Prediction of ground vibration from freight trains, *Journal of Sound and Vibration* 193(1), 205–213. doi:10.1006/jsvi.1996.0260
19. Kim, D.S. ve Lee, J.S. (2000) Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(2), 115–126. doi:10.1016/S0267-7261(00)00002-6
20. Kliukas, R., Jaras, A. ve Kačianauskas, R. (2008) Investigation of traffic-induced vibration in Vilnius Arch-Cathedral Belfry, *Transport*, 23(4), 323-329. doi:10.3846/1648-4142.2008.23.323-329
21. Koçak, A. ve Köksal, T. (2010) An example for determining the cause of damage in historical buildings: Little Hagia Sophia (Church of St. Sergius and Bacchus) – Istanbul, Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 17(4), 926–937. doi:10.1016/j.engfailanal.2009.11.004
22. Sağlamer, A. (2003) Küçük Ayasofya Camii Zemin ve Temel Mühendisliği Raporu, *İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Uygulama Arastırma Merkezi*, Tarih: 07/04/2003, No: B.30.2.ITU.061.00.00/04/83.
23. Sica, G., Peris, E., Woodcock, J.S., Moorhouse, A.T. ve Waddington, D.C. (2014) Design of measurement methodology for the evaluation of human exposure to vibration in residential environments, *Science of the Total Environment*, 482-483, 461–471. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.07.006
24. Srbulov, M. (2010) *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples*, Springer, London, United Kingdom.
25. Wiss, J.F. (1981) Construction Vibrations: State-of-the-art, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(2), 167–181.
26. Woods, R.D. (1997) *Dynamic effects of pile installations on adjacent structures*, Synthesis of Highway Practice (Book 253), National Academy Press, Washington, D.C. USA.
27. Xia, H., Zhang, N. ve Cao, Y.M. (2005) Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings, *Journal of Sound and Vibration*, 280(3-5), 1017–1029. doi:10.1016/j.jsv.2004.01.006
28. Yüzügülü, Ö. ve Durukal, E. (1997) The effects of the train traffic on the Küçük Ayasofya Mosque in İstanbul, *International Conference on Studies in Ancient Structures*, İstanbul, Turkey, 14-18 Temmuz 1997, 429-437.